

Planeamiento del diseño de subestaciones eléctricas

Electrical Substation Design Planning

FERNANDO GÓMEZ TAPIAS*

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES**

RESUMEN

Este artículo establece la lista las actividades generales que deben adelantarse para la elaboración del diseño completo de una subestación eléctrica, de acuerdo con el marco regulatorio establecido por la normatividad internacional vigente; esto según los criterios de seguridad, confiabilidad, flexibilidad, de operación y economía que deben tenerse en cuenta para éstas. El procedimiento sugerido puede modificarse dependiendo del tipo y de la función de la subestación que se diseñe, pues todos los pasos citados son necesarios y deben estar a cargo de un grupo multidisciplinario de profesionales.

Palabras clave: sistema eléctrico de potencia, subestación, seguridad, confiabilidad, flexibilidad, operación, apantallamiento.

ABSTRACT

This article lists the general activities to be carried out for the full design of an electrical substation, based on the regulatory framework established by current international standards. It also follows a series of security, reliability, operation and economic criteria that must be taken into account when performing such activities. The suggested procedure may be modified depending on the type and function of the designed substation, as all the steps are necessary and must be managed by a multidisciplinary group of professionals.

Keywords: power system, security, reliability, flexibility, operation, screening.

FECHA DE ENVÍO: 1 DE AGOSTO DE 2010 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 30 DE NOVIEMBRE DE 2010

*Ingeniero electricista; Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: fergota2003@yahoo.com.

**Ingeniero industrial; Profesor asociado, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: hrvargas@uis.edu.co.

Introducción

El propósito de todo sistema eléctrico de potencia es suministrar la energía necesaria para el desarrollo de un sector o país. Para alcanzarlo es necesario generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica desde los centros de generación, ubicados estratégicamente con base en la disponibilidad de fuentes primarias de energía como el gas, el carbón, el agua o la energía nuclear hasta los centros de distribución y consumo, considerando en todo momento las limitaciones económicas y condiciones de seguridad, de confiabilidad y de calidad del servicio requeridos.

Una subestación eléctrica es la muestra física de un nodo de un sistema eléctrico de potencia, en el cual se puede transformar la energía eléctrica a niveles adecuados de tensión para su transporte, distribución y consumo bajo determinados requerimientos técnicos de calidad, confiabilidad, flexibilidad y eficiencia.

Además las subestaciones eléctricas están conformadas por un conjunto de equipos que permiten: a) controlar el flujo de energía a través de los transformadores de potencia, convirtiendo la tensión de suministro a niveles de tensión más bajos o altos de acuerdo con la necesidad preestablecida, b) adelantar la interconexión de diferentes rutas del flujo de energía al mismo nivel de tensión.

Tensiones asignadas y de servicio de las subestaciones eléctricas

La tensión de servicio en un sistema eléctrico no permanece constante; éste varía de acuerdo con sus condiciones de funcionamiento, lo cual determina que debe mantenerse dentro de los límites establecidos por las características de aislamiento de los equipos que conforman el sistema para evitar la aparición de fallas de aislamiento.

De acuerdo con lo anterior, los equipos que componen las subestaciones eléctricas se construyen para determinada tensión asignada y para una máxima tensión de servicio. La tensión asignada se define como aquella con la cual se designa al sistema y a la que se referencian ciertas características de su operación; y la tensión de servicio en un punto cualquiera del sistema eléctrico corresponde al valor que se tiene realmente en dicho punto en un instante determinado.

El mayor valor de tensión que se obtiene en un sistema eléctrico dentro de los límites admisibles y de operación normal, se define como la tensión máxima del sistema. Lo anterior deriva el concepto de tensión máxima de un equipo como el valor máximo de tensión asignada del sistema para la cual el equipo puede ser utilizado sin presentar fallas de aislamiento (ver valores normalizados en tablas 1 y 2).

Tabla 1. Tensiones para sistemas de menos de 35 kV (Norma IEC 60038)

SERIE I		SERIE II		
TENSIÓN ASIGNADA (kV)		TENSIÓN MÁXIMA (kV)	TENSIÓN ASIGNADA(kV)	TENSIÓN MÁXIMA(kV)
3,3 ^a	3 ^a	3,6 ^a	4,16 ^a	4,4 ^a
6,6 ^a	6 ^a	7,2 ^a	-	-
11	10	12	-	-
-			12,47 ^b	13,2 ^b
-			13,2 ^b	13,97 ^b
-			13,8 ^a	14,52 ^a
-	(15)	(17,5)	-	-
22	20	24	-	-
-	-	-	24,94 ^b	26,4 ^b
33 ^c	-	36	-	-
-	35 ^c	-	34,5 ^b	36,5 ^b
-	35 ^c	40,5 ^c	-	-

Notas: la serie I es para 50 y 60 Hz; la serie II es para 60 Hz; los valores indicados son entre fases y para sistemas de tres hilos; los valores indicados entre paréntesis no son comunes y no deben ser usados en sistemas nuevos.

^a Estos valores no deben ser usados en sistemas de distribución pública; ^b estos valores son para sistemas de cuatro hilos; ^c la unificación de estos valores está bajo consideración.

Tabla 2. Tensiones para sistemas de más de 35 kV (Norma IEC 60038)

SERIE I-SERIE II		
TENSIÓN ASIGNADA (kV)		TENSIÓN DE SERVICIO (kV)
(45)	-	(52)
66	69	72,5
110	115	123
132	138	145
(150)	-	(170)

Continúa

SERIE I-SERIE II		
TENSIÓN ASIGNADA (kV)		TENSIÓN DE SERVICIO (kV)
220	230	245
	a	(300)
	a	362
	a	420
	a	550 o 525
	a	800 o 765
	a	1050 o 1100
	a	1200

Notas: valores aplicables a las dos series; los valores indicados son entre fases; los valores en paréntesis no son comunes y no deben ser usados en sistemas nuevos.

^a Valores no especificados por la norma.

Procedimiento general para el diseño de una subestación eléctrica

La base para el desarrollo de un proyecto de diseño de una subestación eléctrica es la normatividad vigente, junto con las nuevas tecnologías, los requerimientos que establecen las compañías operadoras del sector eléctrico y las necesidades de demanda de energía de los usuarios de un sistema eléctrico.

La normativa internacional más considerada es la elaborada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC); le sigue en importancia la normativa estadounidense (ANSI). Para cada proyecto de diseño se debe tener en cuenta igualmente la normativa interna de las empresas del sector eléctrico de cada país, En consecuencia todas servirán de soporte como documentos de consulta.

Anteproyecto

Antes de elaborar el proyecto definitivo se deben establecer varias alternativas con respecto a posibles tipos y configuraciones de la subestación requerida que logren reducir al máximo la superficie de terreno por utilizar, que permitan optimizar los criterios de seguridad, flexibilidad y que posibiliten las maniobras de operación y mantenimiento del equipo por instalar.

La empresa del sector eléctrico encargada de la producción y suministro de energía, que requiera del montaje de una nueva subestación eléctrica dentro de su sistema (ver ejemplo en figura 1), es la encargada de establecer el número de circuitos de transmisión, el número de circuitos de transformación, el nivel de tensión de servicio, el nivel de tensión asignada, el número de patios de conexión, el nodo de amarre dentro de su sistema eléctrico, la altura sobre el nivel del mar del posible sitio de ubicación y el nivel requerido de aislamiento para los equipos.

Una vez disponibles estos datos iniciales, se procede a determinar la importancia y las necesidades de la subestación dentro del sistema eléctrico, y se determina una configuración de acuerdo con las preferencias y requerimientos que establezca la compañía propietaria del proyecto.

Con la configuración asignada, la disposición física y los niveles de aislamiento definidos, se elabora un prediseño, el cual permitirá establecer las áreas de los patios, el área del edificio de control y bodega, las vías perimetrales, las vías de circulación, las vías de acceso, las zonas de parqueo, el patio de transformadores con sus carrileras de acceso, las servidumbres de acceso de los circuitos de línea y las áreas de futura ampliación. Lo anterior obliga a elaborar y evaluar varios esquemas urbanísticos de tal manera que permitan determinar la opción más favorable desde el punto de vista funcional y que ocupe menos área.

Una vez aprobada la alternativa urbanística favorable, por parte de la compañía se debe adelantar el proceso de consecución y de compra del lote con las dimensiones adecuadas, a fin de evitar inconvenientes con respecto a nuevas ampliaciones que surgen con posterioridad a lo planteado inicialmente.

Cuando el área del lote adquirido es limitado se establecen restricciones para el diseño, lo cual puede dar como resultado una subestación con características inferiores a las requeridas por el sistema.

Datos generales para el proyecto

Una vez asegurado el predio donde se adelantará el proyecto, se debe proceder a complementar los datos necesarios para el montaje del proyecto de diseño de la subestación:

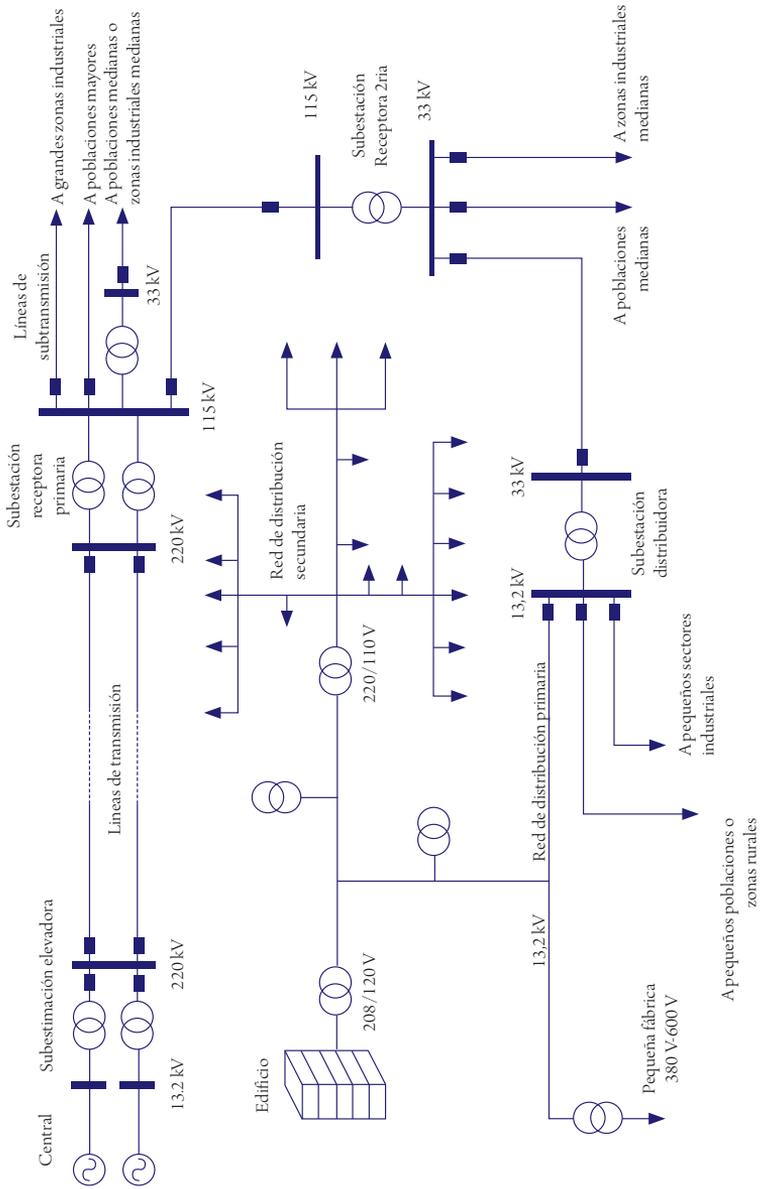


Figura 1. Sistema eléctrico

Fuente: los autores.

- Datos del sitio seleccionado
 - Altura sobre el nivel del mar.
 - Temperatura mínima, media y máxima anual y mensual.
 - Humedad relativa.
 - Viento máximo.
 - Grado de contaminación ambiental.
 - Nivel cerámico o de descargas atmosféricas.
 - Estudio de suelos.
 - Levantamiento topográfico.
 - Plano general de ubicación mediante la identificación de las vías de acceso y líneas de transmisión.
 - Resistividad del terreno.
- Datos del sistema eléctrico
 - Estudio de flujos de carga y fallas del sistema.
 - Corriente de corto circuito máxima.
 - Requerimientos de estabilidad del sistema.
 - Longitud de las líneas de transmisión y capacidad máxima.
 - Requerimientos de compensación del sistema en el nodo de la subestación.
 - Sobretensiones transitorias y de régimen permanente para las subestaciones de alta tensión.

Programación y elaboración del diseño eléctrico del proyecto

Selección de configuración y disposición física

Se establece como configuración en una subestación eléctrica al arreglo de los equipos electromecánicos que conforman un patio de conexiones pertenecientes a un mismo nivel de tensión, de tal forma que su operación permita establecer en la subestación diferentes grados de confiabilidad y seguridad para el manejo, transformación y distribución de la energía:

- Parámetros de flexibilidad, confiabilidad y seguridad para el manejo, transformación y distribución de la energía en subestaciones eléctricas. Idealmente todo sistema seguro y confiable es aquel en que todos sus elementos están duplicados y la pérdida de uno de ellos no afecta a ninguno de los otros; por lo anterior, por razones económicas ninguna subestación puede ser 100% segura y confiable, con base en ello es que se establece la selección del tipo de configuración requerida de acuerdo con las necesidades de flexibilidad, confiabilidad y seguridad de ésta dentro del sistema eléctrico, lo que permite establecer que:
 - La flexibilidad de una subestación se define como la propiedad de la instalación para ajustarse a las diferentes condiciones técnicas que se pueden presentar por cambios operativos, por fallas o mantenimiento del sistema.
 - La confiabilidad de una subestación se explica como la probabilidad de que la subestación continúe suministrando energía durante un tiempo dado, de acuerdo con la condición de que al menos uno de sus componentes esté fuera de servicio. Lo anterior se produce en una condición de falla o proceso de mantenimiento en uno de los elementos de la subestación (barraje, interruptor, etc.); y que se sobrepasa después de efectuar una operación interna en uno o más de los demás elementos (seccionador, interruptor, etc.) mientras se efectúa la reparación de dicho elemento.
 - La seguridad en una subestación se establece como la propiedad de dar continuidad de servicio sin interrupción alguna durante las fallas de los equipos de corte (interruptores) y barrajes; por lo general la seguridad está

determinada por la potencia que se pierde en una falla y su impacto en la estabilidad y del comportamiento del resto del sistema.

- Tipos de subestación por seleccionar. Depende de la función principal que vaya a cumplir dentro del sistema eléctrico; para ello se definen los siguientes tipos:
 - Subestaciones de generación: se consideran aquellas que sirven como punto de conexión al sistema de una central generadora. La necesidad primordial de este tipo de subestación es la confiabilidad, mientras que el nivel de seguridad y flexibilidad se determinarán por la importancia y ubicación de la subestación dentro del sistema eléctrico.
 - Subestaciones de maniobra: son aquellas que sirven para interconectar sistemas eléctricos o dentro de un sistema es la que distribuye la energía a las subestaciones de transformación. La necesidad primordial de estas subestaciones es la de flexibilidad; en cambio las necesidades de seguridad y confiabilidad estarán definidas por la ubicación de ésta dentro del sistema eléctrico.
 - Subestaciones de transformación: estas se definen también como subestaciones de distribución o de carga cuyo objetivo consiste en suministrar energía a un nivel de tensión diferente, ya sea menor o mayor que la tensión de entrada dentro de un sistema eléctrico. Cuando son subestaciones elevadoras su necesidad primordial es la de seguridad, la cual está relacionada con la seguridad del nivel de tensión más alto del sistema eléctrico; y cuando son subestaciones reductoras su necesidad principal es de confiabilidad, aunque también puede ser la de seguridad; si la cargabilidad del secundario está muy por debajo del 100% y tiene más de un circuito de alimentación la necesidad primordial es la de confiabilidad, pero si la cargabilidad del secundario está cerca del 100% y tiene un circuito de alimentación la necesidad primordial es la de seguridad. Estas subestaciones pueden requerir también cierto nivel de flexibilidad en caso de existir un gran número de circuitos de conexión para adelantar su operación.
- Características de mantenimiento de cada configuración. De acuerdo con el tipo de configuración de la subestación por seleccionar se definen las facilidades

de mantenimiento que se tienen en ellas y que permitirán de acuerdo con el nivel de seguridad y confiabilidad requeridas al seleccionar la configuración requerida. En las tablas 3 y 4 se definen para cada configuración las facilidades que ellas presentan.

Tabla 3. Facilidades de mantenimiento por efecto de mantenimiento en interruptor de cada configuración

CONFIGURACIÓN	EFECTO DE MANTENIMIENTO EN INTERRUPTOR		
	NORMAL	FALLA EN CIRCUITO	FALLA EN BARRA
Barra sencilla	Pérdida de circuito	-	Pérdida de todos los circuitos
Barra sencilla seccionada	Pérdida de circuito	-	Pérdida de la mitad de los circuitos
Doble barra	Pérdida de circuito	-	Pérdida de todos los circuitos a la barra en falla, mientras se conmutan a la barra sana
Doble barra más <i>bypass</i>	Ninguna, si el interruptor está disponible	Pérdida de circuito si la falla es en el interruptor donde se adelanta el mantenimiento	Si no es la barra que está siendo utilizada como transferencia se pierden todos los circuitos. Mientras se conmutan a la barra sana
Anillo	Ningún circuito se pierde pero se abre el anillo	Pérdida de circuito; el siguiente circuito puede quedar aislado dependiendo del sitio de falla	-

Fuente: los autores.

Tabla 4. Facilidades de mantenimiento por efecto de mantenimiento en barras de cada configuración

CONFIGURACIÓN	EFECTO DE MANTENIMIENTO EN BARRAS		
	NORMAL	FALLA EN CIRCUITO	FALLA EN BARRA
Barra sencilla	Pérdida de circuito	-	Pérdida de todos los circuitos
Barra sencilla seccionada	Pérdida de la mitad de los circuitos	Pérdida de circuito	Pérdida de todos los circuitos
Doble barra	Ninguno, siempre y cuando la falla no sobrepase el nivel máximo de corto circuito	Pérdida de circuito	Pérdida de todos los circuitos
Doble barra más <i>bypass</i>	Ninguno, siempre y cuando la falla no sobrepase el nivel máximo de corto circuito	Pérdida de circuito	Pérdida de todos los circuitos
Anillo	-	Pérdida de circuito	Pérdida de todos los circuitos

Fuente: los autores.

- Selección de la configuración requerida. Para llevar a cabo la selección de la configuración de la subestación de acuerdo con los requerimientos técnicos exigidos para el proyecto, entonces se debe adelantar un análisis detallado de los siguientes aspectos:
 - Identificar el tipo o función principal de la subestación y la función secundaria si la tiene.
 - Determinar el número de módulos de conexión de la subestación estableciendo si los circuitos son de generación o transformación.
 - Establecer las necesidades de flexibilidad, confiabilidad y seguridad derivadas de la función principal y secundaria.
 - Determinar los tipos de configuración que llenen los requisitos anteriores.
 - Evaluar el costo, área requerida y confiabilidad de las configuraciones seleccionadas.
 - Evaluar en las configuraciones seleccionadas el factor de mantenimiento y expansión, el grado de contaminación ambiental.
 - Establecer cuáles de las configuraciones son las más usadas por la compañía dentro de su sistema eléctrico.
 - Con las consideraciones anteriores determinar la configuración, el tipo y el desarrollo tecnológico de los equipos por utilizar en la subestación.

Proceso de ejecución para el diseño de una subestación

Selección del sitio

Para obtener en detalle las características y la información del sitio donde se ubicará la subestación, es necesario adelantar los estudios que se relacionan en la tabla 5.

Tabla 5. Estudios técnicos por realizar en el sitio de la subestación

ESTUDIOS	INFORMACIÓN OBTENIDA
Topográficos	<ul style="list-style-type: none"> Levantamiento planimétrico y altimétrico del área del lote de la subestación. Identificación de coordenadas del punto de amarre con respecto al sistema de información geográfica establecida para el sistema eléctrico.
Geotécnicos	<ul style="list-style-type: none"> Estudio del subsuelo con el fin de recomendar los criterios técnicos requeridos para la construcción de la obra en contacto con el suelo y que garantice su comportamiento adecuado.
Sísmicos	<ul style="list-style-type: none"> Permiten evaluar los efectos sísmicos por considerar para el diseño de las obras civiles y estructuras metálicas de la subestación. En Colombia se utiliza la información suministrada en los catálogos sísmicos de la red sísmológica nacional de Ingeominas.
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> Estudio del impacto ambiental en el sitio de ubicación de la subestación acorde con la legislación vigente, que permita identificar, evaluar y mitigar los impactos ambientales mediante un plan de manejo ambiental a fin de lograr una adecuada aceptación del proyecto en la región en la cual se construirá. El estudio de impacto ambiental tendrá en cuenta aspectos como: la contratación de mano de obra local, capacitación y educación vial, señalización vial, protección del patrimonio ecológico, abastecimiento de agua, gestión de residuos sólidos, gestión de residuos líquidos, control de erosión y sedimentación, control de vegetación, manejo de fauna, normas básicas para el desmonte, descapote y revegetalización, adecuación paisajista del área, etc.
Urbanización y disposición física	<ul style="list-style-type: none"> En este estudio se realiza la urbanización del predio y las disposiciones físicas definitivas de los diferentes patios de conexión que se tendrán en la subestación. Conociendo la configuración, disposición física y niveles de aislamiento se elaboran planos preliminares determinando las áreas de los patios y se establecen las demás áreas, como la caseta de control, las vías perimetrales, las zonas de circulación y de acceso, las zonas de parqueo, la zona para bodega y talleres, el área del patio de los transformadores y sus carrileras de acceso, las áreas de acceso de los circuitos de línea y las áreas para ampliaciones futuras de la subestación. Una vez definidas las diferentes áreas requeridas, se procede a urbanizar el predio de la subestación, lo cual consiste en distribuir las áreas en el predio de tal forma que se ocupe el menor espacio sin que existan interferencias entre éstas.

Fuente: los autores.

Estudios por realizar al sistema eléctrico

Éstos cubren los análisis técnicos que, a partir de las condiciones estacionarias y transitorias del sistema eléctrico en el que se va a instalar la subestación, permiten la definición de los parámetros fundamentales exigidos para su correcta operación y conexión. Ver relación de estudios fundamentales y de estudios transitorios requeridos en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Estudios fundamentales

ESTUDIOS	INFORMACIÓN OBTENIDA	USO DE LA INFORMACIÓN
Flujos de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos máximos de potencia • Corrientes máximas • Tensiones máximas 	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustes de protecciones • Requerimientos de compensación • Relación de los TC y TT
Cortocircuito	<ul style="list-style-type: none"> • Corrientes de cortocircuito • Distribución de corrientes y aportes • Relación X/R • Sobre tensiones fallas asimétricas 	<ul style="list-style-type: none"> • Equivalente de Thevenin • Coordinación de protecciones • Selección de pararrayos
Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempos máximos de despeje de falla • Sobretensiones por rechazo de carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de tiempos de recierre • Selección de pararrayos
Sobretensiones temporales	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente capacitiva de línea • Máxima tensión de extremo abierto • Sobretensiones fases sanas 	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de pararrayos • Selección de interruptores • Selección de compensaciones • Ajustes de relés de sobretensión
Armónicos	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de resonancia 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de la necesidad de filtros (sistemas de compensación)

Fuente: los autores.

Tabla 7. Estudios de transitorios

ESTUDIOS	INFORMACIÓN OBTENIDA	USO DE LA INFORMACIÓN
Sobretensiones de maniobra	<ul style="list-style-type: none"> • Sobretensiones máximas • Corrientes de energización • Corrientes máximas • Bobinas limitadoras • Energía pararrayos 	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de reactancias limitadoras • Selección de interruptores • Selección de pararrayos
Sobretensiones atmosféricas	<ul style="list-style-type: none"> • Máximas sobretensiones • Energía pararrayos • Distancia de pararrayos a equipos 	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de pararrayos • Coordinación de aislamientos

Fuente: los autores.

Selección de equipos

En esta etapa se realiza la selección de equipos de la subestación con los datos técnicos obtenidos para el sistema eléctrico donde se ubicará la subestación proyectada y la configuración seleccionada para ésta. En la tabla 8 se describen los equipos de la subestación.

Tabla 8. Equipos de la subestación

EQUIPOS	RELACIÓN DE EQUIPOS	
Alta tensión	<ul style="list-style-type: none"> • Interruptores automáticos • Seccionadores • Seccionadores de puesta a tierra • Aisladores 	<ul style="list-style-type: none"> • Transformador de corriente • Transformador de tensión • Pararrayos • Material de conexión
Equipos de transformación y compensación	<ul style="list-style-type: none"> • Autotransformadores y transformadores • Reactores de línea • Reactores de neutro 	<ul style="list-style-type: none"> • Baterías de condensadores • Compensación serie • Compensación estática • Transformador de puesta a tierra
Equipos de media tensión	<ul style="list-style-type: none"> • Celdas • Interruptores • Seccionadores de puesta a tierra • Transformadores de corriente 	<ul style="list-style-type: none"> • Transformadores de tensión • Pararrayos • Aisladores de soporte • Cables y terminales

Fuente: los autores.

Malla de puesta a tierra

El diseño de la malla de tierra para la subestación debe cubrir la totalidad del predio urbanizado de la subestación. En ocasiones se dispone también por fuera del círculo perimetral; y parte de la medida de resistividad del terreno obtenida en los estudios técnicos realizados al suelo anteriormente.

La función principal de la malla de puesta a tierra consiste en suministrar la adecuada protección al personal y al equipo que dentro o fuera de la subestación puedan quedar expuestos a tensiones peligrosas cuando se presente una falla dentro de la subestación. La metodología establecida para el cálculo de la malla de puesta a tierra es la definida en la norma IEEE Std 80. Supone la práctica más común el diseño de una malla horizontal de conductores enterrados, complementada con un número adicional de varillas

Debido a la importancia de contar con una resistividad baja en el sitio de la subestación, es necesario determinar las características del suelo que permitan definir los componentes de éste, como adecuadas para abatir la resistencia de la red de tierra de la subestación.

Las mediciones de la resistividad permitirán establecer la representación del suelo a través de un modelo homogéneo, por lo que se deben realizarse en varios lugares dentro de la superficie o donde se proyecte instalar la subestación. El método gene-

ralmente utilizado es el de los cuatro electodos desarrollado por el alemán Frank Wenner. Este método se utiliza cuando se tiene por lo general suelo homogéneo, el cual es de una sola capa y se pueden realizar mediciones de resistividad con diferentes separaciones de electodos, obteniéndose valor de resistividad constante; en cambio, para un suelo heterogéneo, las mediciones serán diferentes al cambiar la separación de electodos. Y éste es el mayormente utilizado para medir la resistividad promedio del terreno.

Para realizar las mediciones se requieren cuatro pequeñas varillas localizadas sobre una línea recta, las cuales se entierran a una profundidad b y espaciadas a una misma distancia entre sí a . Así, se hace circular una corriente de prueba de baja frecuencia entre los dos electodos extremos (electodos de corriente $C1, C2$) y se mide la caída de potencial con un voltímetro de alta impedancia entre los dos electodos interiores electodos de tensión ($P1, P2$), tal como se muestra en la figura 2.

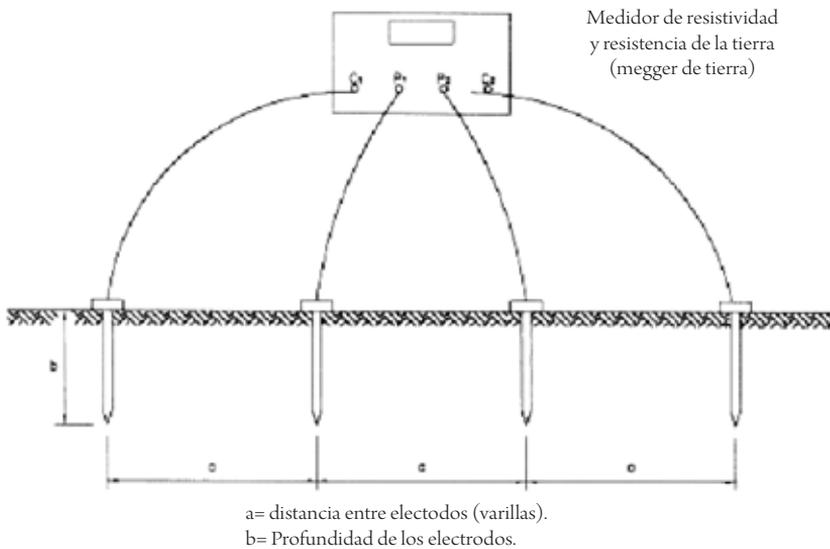


Figura 2. Medición de la resistividad del terreno por el método de Wenner

Fuente: los autores.

Por tanto, la relación entre la tensión y la corriente determina la lectura de la resistencia R , y con la ecuación (1) se calcula la resistividad del terreno.

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (1)$$

ρ : resistividad del terreno (Ω)

R: resistencia medida del terreno (Ω -m)

a: distancia entre electrodos (m)

b: profundidad de los electrodos (m)

En las figuras 3 y 4 se muestran las diferentes formas de contactos circunstanciales que una persona puede tener entre dos puntos dentro de una subestación, presentándose para cada caso un tipo de tensión de contacto las cuales son de paso, de contacto y de transferencia.

La tensión de paso se define como la máxima diferencia de tensión entre el punto de contacto de los pies de una persona que se encuentra parada en el área de la subestación cuando ocurre una falla de fase a tierra.

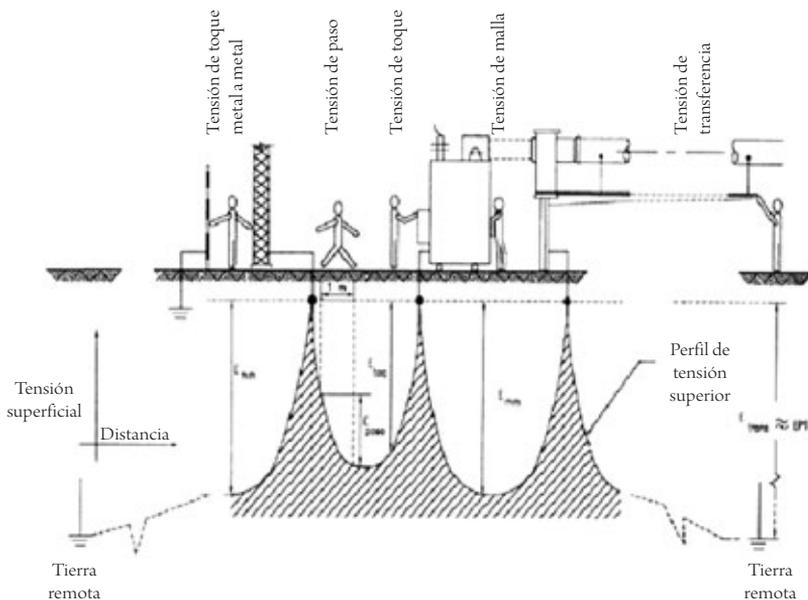


Figura 3. Situaciones básicas de choque eléctrico

Fuente: los autores.

La tensión de toque se especifica como la máxima diferencia de tensión entre el punto de contacto de los pies de una persona que se encuentra parada en el área de la subestación y el punto de contacto de una o de sus dos manos al tocar una estructura metálica cuando ocurre una falla de fase a tierra.

La tensión de transferencia es un caso especial de la tensión de toque donde la tensión es transferida dentro o fuera de la subestación desde o hacia un punto remoto externo al área de la subestación.

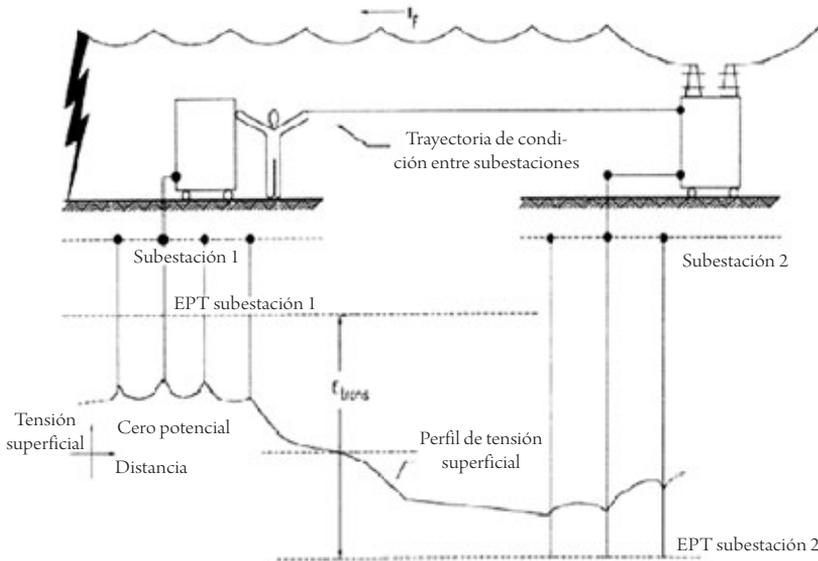


Figura 4. Situación típica del riesgo de tensión de transferencia

Fuente: los autores.

La tensión de transferencia ocurre cuando una persona que está dentro del área de la subestación toca un conductor aterrizado en un punto remoto, o una persona que está parada en un punto remoto toca un conductor conectado en la red de tierra de la subestación.

La metodología en la norma IEEE Std 80- 2000, la cual se resume en la figura 5, básicamente calcula las tensiones de paso, de toque máximas que soporta el cuerpo humano para diferentes parámetros de diseño, así como las tensiones de malla y del sistema máximas, las cuales por norma para asegurar un sistema de tierra deben ser:

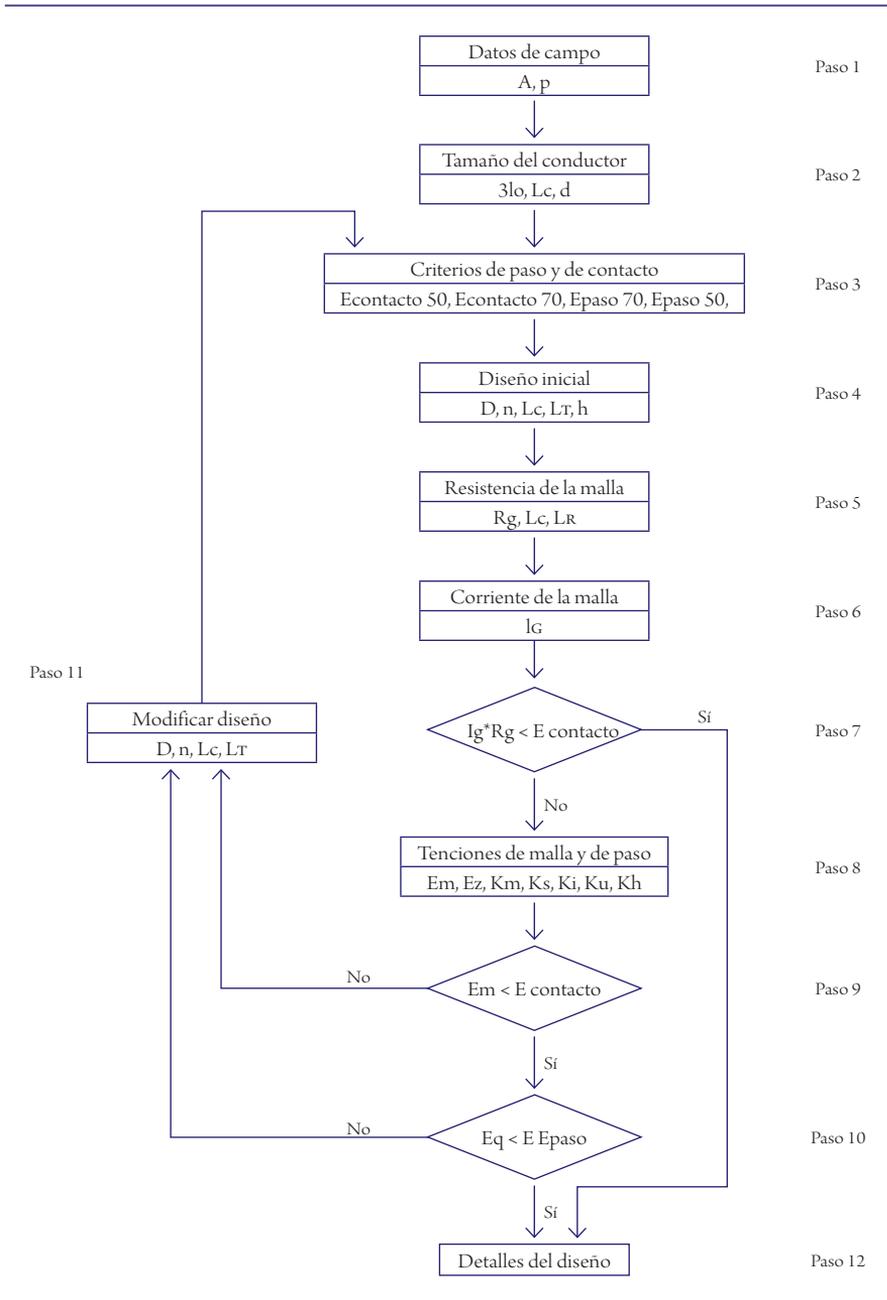


Figura 5. Metodología de cálculo. Malla de puesta a tierra. Norma IEEE 80 de 2000

Fuente: los autores.

Sistema de comunicaciones

La selección del sistema de telecomunicaciones debe ser el más apropiado para la intercomunicación de la subestación con las otras subestaciones asociadas al proyecto y con el centro de control del sistema eléctrico. Para adelantar la selección se debe tener en cuenta el diseño mismo, la configuración, sus niveles de calidad, confiabilidad y seguridad, al igual que el desempeño dentro del sistema general de comunicaciones del sistema. Inicialmente debe identificarse el sistema de telecomunicaciones de la compañía propietaria del proyecto para luego proceder a seleccionarlo entre los siguientes tipos:

- Red de radio microondas.
- Sistema de fibra óptica.
- Enlace de onda portadora por línea de potencia.
- Estación satelital.
- Red de radio móvil.
- Red telefónica pública.

Sistema de auxiliares de CA y CC

Aparte de otras funciones secundarias asignadas, los servicios auxiliares constituyen la fuente de alimentación de los sistemas de mando, control y protecciones de las subestaciones; por ello deben ser diseñados con el objeto de mantener la propia confianza de los elementos principales de estos sistemas.

El criterio fundamental de diseño de un sistema de servicios auxiliares debe ser el de garantizar los suministros de energía necesarios para los diferentes sistemas que lo componen, aunque se produzcan fallas en el propio sistema o en las fuentes que lo alimentan. Para el diseño de los sistemas de auxiliares de la subestación debe tenerse en cuenta también los aspectos de operación de la subestación como:

- **Confiabilidad:** la cual debe ser mayor que la confiabilidad evaluada para la subestación.
- **Cargabilidad:** se deben definir las cargas y consumos para las cargas de operación de la subestación misma, como las cargas complementarias para la totalidad del proyecto.
- **Modularidad:** la cual busca que al ampliarse en algún momento la subestación no requiera cambiarse el sistema de auxiliares.
- **Flexibilidad:** en ella se busca optimizar la topología de conexión del sistema de auxiliares.
- **Simplicidad:** busca eliminar las complejidades operativas del sistema.
- **Mantenibilidad:** la cual busca garantizar los procesos de mantenimiento del sistema.
- **Optimización de costos.**

Normalmente en las subestaciones se dispone de dos servicios de auxiliares: los de corriente alterna y los de corriente continua.

El servicio de auxiliar de corriente alterna se utiliza para alimentar las cargas de mayores consumos como son ventilaciones y bombas de equipo de patio y transformación; y demás sistemas complementarios de la misma como son iluminación, sistema contraincendios, sistemas de seguridad, aires acondicionados, instalaciones internas de edificios y como fuente de los sistemas de corriente continua. Las fuentes principales para el servicio de auxiliares de corriente alterna deben disponer de una redundancia del 100%. Las fuentes pueden ser:

- **Internas:** dependen de la energía que suministra la propia subestación.
- **Externas:** dependen de la energía que suministra una red de media tensión independiente de las presentes en la subestación.

- De apoyo: para establecer la redundancia requerida para el sistema de auxiliares se definen dos fuentes adicionales como son:
 - Grupo de generación de emergencia Diesel: se establece para cubrir ciertas situaciones de falla que pudieran producirse dentro de la subestación. Este grupo no constituye un apoyo del 100%, sino que alimentará únicamente los “servicios esenciales” a fin de garantizar el funcionamiento de líneas, transformadores, etc.
 - Sistemas de alimentación ininterrumpida: Este sistema se establece para la alimentación de equipos de control digital (terminales, etc.) y otros que lo precisen dentro de la subestación.

El servicio de auxiliar de corriente continua se usa como respaldo por ser un sistema de mayor confiabilidad, encargado de alimentar los sistemas secundarios de la subestación: protección, control, medida y comunicaciones. Usualmente este sistema de auxiliares de corriente continua requiere alimentaciones a dos o más valores de tensión, atendiendo las especificaciones técnicas de los diferentes sistemas presentes de control convencional, de control digital, de comunicaciones, etc. Igualmente, las fuentes principales para el servicio de auxiliares de corriente continua deben disponer de una redundancia del 100%. Las fuentes pueden ser:

- Equipos rectificador-batería: El estudio de la necesidad o conveniencia de instalar fuentes de corriente continua redundantes debe ser realizado para cada tensión o sistema de suministro. Por ello hay que determinar las características de cada equipo rectificador-batería en función de los consumos y del tiempo especificado de mantenimiento de la tensión de servicio en caso de ausencia de corriente de carga.
- Utilización de “doble canal” para los sistemas de protección.

Niveles de tensión normalizados para sistemas de auxiliares

Los niveles de tensión normalizados para los servicios auxiliares se definen como la tensión asignada de los elementos de cierre y apertura de los equipos de maniobra

y la tensión asignada a los circuitos auxiliares. Los valores normalizados se definen en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Tensiones normalizadas. Servicio de auxiliares. Norma IEC 60694 (2002)

TENSIÓN CORRIENTE CONTINUA (V)	TENSIÓN CORRIENTE ALTERNA		
	SISTEMA TRIFÁSICO TRES O CUATRO HILOS (V)	SISTEMA MONOFÁSICO TRES HILOS (V)	SISTEMA MONOFÁSICO DOS HILOS (V)
24	-	120/240	120
48	120/208	-	120
60	(220/380)	-	(220)
110 ó 125	230/400	-	230
220 ó 250	(240/415)	-	(240)
	277/480	-	277
	347/600	-	347

Notas. Para tensión corriente alterna: los valores más bajos son los de fase y los valores más altos son los de línea; el valor 230/400 V será en el futuro el único valor normalizado de la IEC y se recomienda su adopción para sistemas nuevos.

Fuente: los autores.

Tabla 10. Tensiones normalizadas. Servicio de auxiliares. Norma ANSI c84.1 (2001)

SISTEMA TRIFÁSICO TRES O CUATRO HILOS (V)	SISTEMA MONOFÁSICO DOS HILOS (V)
-	120
120/208	-
127/220	120/240
220	-
277/480	-
480	-

Fuente: los autores.

Sistema de protección y análisis de fallas

El sistema de control y protección de un sistema eléctrico de potencia lo conforman todos los medios e instalaciones necesarias para la óptima supervisión, protección, control y gestión de todos los parámetros y componentes del sistema y, en particular, de los equipos de alta, media y baja tensión. Existen dos conceptos de control: el convencional y los sistemas automatizados.

El sistema de protección es, sin embargo, el más importante de cualquier instalación eléctrica y subestación. Los equipos de protección son los encargados de aislar selectivamente las partes del sistema eléctrico afectadas por una falla en el menor tiempo posible minimizando los daños en las instalaciones y procurando la continuidad del suministro del servicio eléctrico.

El alcance del sistema de control y protección incluye desde los relés de señalización dispuestos en los propios aparatos eléctricos, hasta los complejos sistemas para la gestión de redes de orden superior. Los sistemas de control ofrecen la posibilidad de maniobrar los equipos y aparatos.

En subestaciones eléctricas el sistema de protección y control está formado por un conjunto de funciones y subsistemas; la información para la operación de estos sistemas se obtiene directamente de los equipos de alta, media y baja tensión en los patios de la subestación.

Los sistemas de control y protección han evolucionado aceleradamente en los últimos años. El avance de la electrónica digital, los microprocesadores y sus buenos resultados, ha permitido el desarrollo de sistemas digitales tanto de protección como de control, e incluso el desarrollo de sistemas que integran las funciones de protección, control, medida y que además incorporan amplias facilidades de comunicación.

Sistema de control

Para la operación coordinada de los diferentes niveles de control de una subestación se emplean redes y medios de comunicación. Es de tener en cuenta además que pueden existir varios niveles de control dependiendo de las necesidades de operación en particular que se presenten, las cuales pueden ser:

- De operación local: Las que se adelantan en el propio equipo.
- De operación remota: Las que se adelantan desde un edificio de control ubicado dentro de la subestación o las que se realizan en un edificio de despacho alejado de ésta.

La estructura general del sistema de control de una subestación, por lo general, está dividida en tres niveles:

- Primer nivel de control (nivel de campo): se presenta en el ámbito de los equipos primarios de la subestación (seccionadores, interruptores, transformadores de corriente y tensión). La operación de los interruptores y seccionadores se hace, por lo general, en el mando del propio equipo. El control en este nivel reside en el propio mando del interruptor y seccionador y en la lógica de control implementada en el propio gabinete de mando.
- Segundo nivel (nivel de control de posición): conformado por elementos intermedios de la subestación como: armarios de agrupamiento, unidades de control de posición (unidades de control digital o control convencional mediante manetas, pulsadores y relés auxiliares, dependiendo de la tecnología de control empleada) y todos aquellos elementos encargados de las funciones asociadas al conjunto de la posición, como: control, supervisión, enclavamientos, regulación de voltaje, protección y medición.
- Tercer nivel de control: en éste se realizan las tareas de supervisión, maniobra y control del conjunto de toda la subestación, incluyendo todos los equipos y las posiciones de alta, media y baja tensión.

Lo anterior permite definir una estructura lógica del sistema de control, con dos niveles jerárquicos superiores:

- El nivel de control de posición, desde donde pueden ejecutarse órdenes y supervisar el sistema o parte de éste.
- El nivel de campo desde donde se realiza la adquisición de datos fundamentales para la operación y control de la subestación, tales como el estado de los equipos de maniobra, las tensiones y corrientes en el sistema, la temperatura en los devanados de los transformadores, el nivel de aceite en los transformadores, el nivel de gas en los interruptores, etc. Para tener un sistema de control efectivo, todos sus niveles deben estar interconectados para lograr el mayor intercambio de información. En el diseño de los sistemas de control de una subestación se deben tener en cuenta los siguientes requerimientos:

- Facilidad de expansión.
- Automatización de las funciones con el objeto de tener la información disponible de la subestación, donde la acción que tomen los dispositivos de control pueda ser ordenada a control remoto e inclusive realizada localmente.
- Establecer altos márgenes de seguridad: redundancia de equipos de control.
- Prever un margen alto de disponibilidad de equipos para garantizar la redundancia del sistema de control, ya que ello implica un nivel alto de seguridad, lo que permitirá en caso de que se presente una falla total, se tengan equipos adicionales para asegurar que la falla se reduzca a proporciones tolerables por el sistema.
- Establecer un alto margen de flexibilidad del sistema de control para que se pueda acomodar a las condiciones de contingencia de la subestación, lo anterior obliga a: Prever la extensión o modificación parcial del sistema de control; prever la posibilidad de intercambiar equipos de diferentes fabricantes; efectuar el diseño inicial de tal manera que se reduzcan gastos cuando se realicen ampliaciones o modificaciones futuras teniendo en cuenta los estándares de sistemas abiertos permitiendo que el sistema de control y los diferentes equipos puedan intercambiar información y compartir recursos entre diferentes tecnologías.
- Establecer para el sistema de control un alto grado de simplicidad en su diseño para aumentar su grado de confiabilidad, ya que éste debe coordinar el manejo de una gran cantidad de información de los equipos de patio y del manejo de la información de las señales de maniobra, para cambiar el estado de la subestación o proceder a aislar un sector de la misma cuando ésta se encuentre en falla.
- El mantenimiento del sistema de control debe ser simple y práctico, para ello se debe definir un sistema automático de supervisión y reconocimiento de fallas.

Sistema de protección

Los equipos de protección son los encargados de aislar selectivamente las partes del sistema eléctrico afectadas por una falla, en el menor tiempo posible, minimizando los daños en las instalaciones y procurando la continuidad del suministro del servicio eléctrico.

Los equipos de protección se ubican en el nivel de control de posición, en muchos casos los equipos de protección suelen ser equipos que además de proporcionar las funciones de protección propias de la posición, también son capaces de controlar la posición y hasta realizar las funciones de medición de las variables eléctricas de la posición, tales como tensión, corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva, etc. Estos equipos suelen contar con interfaces de comunicación o contactos auxiliares que permiten su interacción con el resto del sistema.

Los algoritmos de protección contienen magnitudes y variables de referencia que pueden ajustarse a discreción del usuario, lo que determina la actuación o no del equipo de protección ante la presencia de determinadas condiciones. Según las magnitudes, el umbral de actuación y el tiempo de actuación, existen diferentes funciones de protección. Dependiendo del tipo de posición que se desee proteger en una subestación, se emplearán una o varias funciones de protección y, por tanto, uno o varios equipos de protección. Los relés más empleados para la protección de las diversas posiciones eléctricas en una subestación son:

- Relés de sobreintensidad instantánea o con retardo de tiempo: detectan las corrientes por encima de un valor de umbral ajustable en una o más fases y actúan después de un tiempo preestablecido. El tiempo de actuación es el mismo sin importar cuánto se ha excedido el umbral ajustado.
- Relés de sobrecarga: la condición de operación en el elemento protegido se simula con la misma constante de tiempo en el relé. Cualquier componente de carga es tomado en consideración por la réplica térmica en el relé, de acuerdo con las curvas de temperatura. En caso de que se sobrepase la temperatura ajustada, se emiten señales de alarma u órdenes de disparo según el caso. Los relés de sobrecarga se emplean usualmente en máquinas que puedan recalentarse, tales como transformadores y alternadores y ocasionalmente en cables.

- Relés diferenciales: la corriente medida a la entrada y salida del elemento protegido se corresponde en fase, ángulo y magnitud y además se corresponden con una medida de referencia. En caso de que se sobrepase la corriente diferencial ajustada, el relé emite una orden de disparo. Los relés diferenciales se aplican principalmente a transformadores o generadores.
- Relés de distancia: la distancia entre una falla y el relé es asignada a un rango de disparo con la medición de la resistencia con referencia a la tensión y corriente de falla. De acuerdo con la característica distancia versus tiempo ajustada en el relé, éste dispara el interruptor apropiado o sirve como protección de respaldo.
- Relés de protección de barras: es un sistema conformado por un circuito de medición que evalúan las magnitudes medidas de determinado número de puntos, en las líneas o en el barraje. Usualmente el sistema de protección diferencial de barras incluye una protección de respaldo como la protección de falla de interruptor; además, su fin consiste en limitar el impacto de una falla en las barras de distribución sobre toda la red. Los esquemas de protección de las barras deben ser muy confiables de modo que no se produzcan disparos innecesarios y se seleccionen sólo los interruptores apropiados para aislar el fallo de la barra de distribución.
- Relés de frecuencia: en caso de que la frecuencia supere los límites preajustados o en caso de una tasa de fluctuación inaceptable (df/dt), tal situación es detectada por un relé de frecuencia, siendo el resultado una desconexión o rechazo de carga.
- Relés de tensión: estos relés actúan desconectando la carga en caso de que aparezcan desviaciones de la tensión preajustada.

Además existen otros equipos de protección aplicados específicamente a determinados componentes de la subestación, que requerirán un análisis específico para cada caso en especial; tales equipos serían: relés de secuencia negativa, relés de potencia inversa para generadores, relés Buchholz para transformadores, etc.

Conductores, barras aisladores y conectores

Para las conexiones en subestaciones de alta tensión se consideran conductores de cobre, aluminio, aleación de aluminio o ACSR, los cuales al ser seleccionados deben garantizar condiciones mecánicas adecuadas para los vanos de instalación, soportar los esfuerzos electrodinámicos presentes en las subestaciones y proveer un medio de transporte de corriente con capacidad adecuada de acuerdo con los niveles de tensión y potencia que se manejen.

Inicialmente los conductores se seleccionan por la capacidad de corriente nominal de la subestación que depende de su nivel de tensión y su potencia. Igualmente, debe tenerse en cuenta aspectos tales como corriente de carga, corriente de cortocircuito, temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar.

Los conductores del barraje de campo dependen del límite térmico del circuito de interconexión asociado, el cual se refiere a la capacidad máxima de potencia que puede transportarse por el circuito sin que los niveles de tensión caigan por debajo de los niveles mínimos preestablecidos. Los conductores del barraje de colectores que interconectan los diferentes campos de la subestación, deben ser seleccionados para cada caso por separado, ya que dependerán del flujo de corrientes en sus barras y circuitos.

Una vez seleccionados los conductores por capacidad de corriente debe preverse la eliminación de las pérdidas considerables por el efecto corona, cuyo efecto se define como una descarga causada por la ionización del aire que rodea al conductor cuando éste se encuentra energizado.

Estructuras metálicas

El diseño de las estructuras metálicas de los pórticos y soportes de equipos requeridos debe adelantarse de acuerdo con las necesidades de la subestación y realizarse por un ingeniero idóneo en el tema, quien debe profundizar sobre los tipos de estructuras más utilizadas y los factores de diseño por tener en cuenta: tipos de carga, combinaciones de carga, factores de sobrecarga y criterios de fabricación.

Adecuación del predio

Esta labor cubre la ejecución de todos los estudios técnicos necesarios que permitirán establecer los movimientos de tierra requeridos para disponer de las áreas necesarias del proyecto, teniendo en cuenta criterios económicos, técnicos y ambientales. Adicionalmente, se deben adelantar estudios para el diseño de la protección de taludes y el sistema de recolección de aguas freáticas y de drenajes.

Diseño de obras civiles

Esta actividad cubre la ejecución de los diseños de las vías interiores y de acceso de la subestación, los drenajes de aguas lluvias, los tipos y longitudes de cárcamos y ductos, la ubicación de la caja de tiro, cerramientos, señalización interior y ubicación de las casetas para el sistema contraincendios, cimentaciones de pórticos y equipos de patio foso y cimentación para los transformadores, autotransformadores, reactores de terciario, retores de neutro, transformadores zigzag, carrileras, tanques separadores de aceite; muros cortafuego; el alumbrado exterior y perimetral, el alumbrado de seguridad de patio, el alumbrado del equipo de patios y el alumbrado de acceso de la subestación

Edificaciones

Dependiendo de las características técnicas del proyecto en esta actividad se definen y diseñan las edificaciones que conformarían la subestación como: el edificio de control, las casetas de control, la portería y los parqueaderos.

Coordinación de aislamiento

Al diseñar una subestación es necesaria protegerla contra dos tipos de sobretensiones:

Sobretensiones debidas a descargas atmosféricas. Son las originadas por las descargas atmosféricas, donde la magnitud de la onda es inferior al nivel de aislamiento de la línea y no alcanzan a ser detectadas por los aisladores de la instalación, lo que conlleva a instalar protecciones contra estas sobretensiones, para ello se usan dos sistemas:

- *El DPS (pararrayo)*: dispositivo que debe seleccionarse tal que su tensión nominal es la tensión máxima a frecuencia nominal, a la cual se debe interrumpir la corriente remanente de una descarga transitoria, quedando después como si fuera un aislador
- *Blindaje*: dispositivo que corresponde a una malla formada por cables de guarda que se instalan sobre las estructuras metálicas del barraje de la subestación. Para el cálculo del blindaje se pueden utilizar cualquiera de los siguientes métodos: electro-geométrico, método de Bewley o el método de las bayonetas.

Sobretensiones debidas a maniobra de interruptores. Las sobretensiones más elevadas se obtienen por la apertura o cierre de interruptores de potencia, que controlan las maniobras de recierre o apertura de líneas cargadas a una tensión elevada al producirse la desconexión inicial. El fenómeno que al abrir una corriente se produce una sobretensión, se basa en el principio de la conservación de la energía; es decir, existe una energía cinética debido al flujo de corriente; al interrumpirse el flujo, la energía cinética se convierte en potencial, apareciendo una tensión eléctrica entre los terminales de los contactos abiertos. Lo anterior obliga por norma a cuando se seleccione un interruptor se debe establecer que cuando éste se abra en ningún caso debe producir una sobretensión mayor a 2,5 veces la tensión nominal

Distancias de seguridad

Al diseñar una subestación es necesario tener en cuenta la integridad de las personas que adelantarán actividades de operación y mantenimiento. Por ello se deben definir las diferentes zonas de seguridad necesarias dentro de la subestación:

Zona de circulación de personal. Define la altura mínima desde el suelo a las partes vivas de la subestación por donde circula personal, y se establece como la distancia de fase a tierra aumentada en 2,25 m, que corresponde a la altura máxima que puede alcanzar un operador con los brazos levantados. En zonas que por circunstancias especiales las partes vivas están a menor altura con respecto a las especificadas, se deben instalar barandas de protección; la distancia de seguridad en aire está dada por:

$$dh = dft + 0,9 [m] \quad (2)$$

$$dv = dft + 2,25 [m] \quad (3)$$

dh: Distancia horizontal por respetar en las zonas de circulación en m.

dv: Distancia vertical por respetar en las zonas de circulación en m y no debe ser inferior a 3 m.

dft: Distancia mínima de fase a tierra correspondiente al nivel al nivel básico de aislamiento (NBI) en la zona.

En subestaciones o sitios donde circule personal, las distancias mínimas de seguridad deben contemplarse así:

$$dmc = hb + 2,25 [m] \quad (4)$$

dmc: Distancia mínima de circulación personal.

hb: Equivalente a la distancia base *dft*.

En zonas donde por motivos especiales no se cumplen con las distancias mínimas de seguridad, se exige la instalación de barandas de seguridad de altura mínima 1,2 m.

$$dhm = hb + 0,90 [m] \quad (5)$$

dhm: Distancia horizontal mínima, m

hb: Equivalente a la distancia base *dft*.

Zona de circulación de vehículos. En las zonas de circulación de vehículos se establecen distancias horizontales mínimas a las partes vivas de 0,7 m mayor que la distancia de fase tierra; y las distancias verticales será por lo menos igual a la distancia base para conexiones rígidas y en el caso de conductores es igual a la distancia base más 0,5 m. El ancho del espacio de circulación se establece teniendo en cuenta las dimensiones exteriores del vehículo de mayor tamaño que se prevé entrará a la subestación, incluido el tamaño del transformador más voluminoso por instalar.

Zonas de trabajo. Se determinan teniendo en cuenta que en cualquier sección de alta tensión de una subestación que se pretenda laborar, debe garantizar la seguridad

del personal de mantenimiento y se define tomando la distancia base más una longitud, que en total no debe ser inferior a 3 m.

Conclusiones

- Adelantar el proyecto del diseño de una subestación eléctrica involucra la participación de un grupo multidisciplinario de profesionales con suficiente formación y experiencia, ante su alto nivel de dificultad, responsabilidad y compromiso, los cuales asimismo deben ser dirigidos por un profesional con vastos conocimientos en el área de subestaciones, quien coordinará a los arquitectos, ingenieros civiles, ingenieros electricistas, ingenieros mecánicos e ingenieros ambientales para el adelanto de todos los diseños de obras arquitectónicas, obras civiles, obras eléctricas, obras mecánicas, obras sanitarias, obras hidráulicas y estudios ambientales requeridos, que cubrirán las necesidades técnicas y económicas del proyecto.
- El proyecto del diseño de una subestación eléctrica partirá de una ingeniería básica, para posteriormente finalizar con una ingeniería de detalle que permita la definición pormenorizada del diseño y de los requerimientos técnicos para la compra de todos los materiales necesarios para la subestación; así como su adecuada instalación, montaje y puesta en servicio.
- Uno de los aspectos importantes del diseño de una subestación eléctrica es la definición de la configuración del sistema, de las corrientes de cortocircuito y de estado permanente, las cuales establecerán las condiciones de conducción y apantallamiento de los equipos, y la cantidad por seleccionar; definiendo desde el punto de vista económico la viabilidad del proyecto.

Referencias

- Atanackovic, D.; McGill, D.T., & Galiana F.D. (1998). The Application of Multi-Criteria Analysis to Substation Design. *IEEE Transactions on Power System*, 13 (3), 1172-1178.
- Billinton R. & Allan R. N. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*. Plenum Press.
- CREG, Código de redes, Resolución 025-1995.

- ICONTEC (2004). Norma Técnica Colombiana, NTC 4552, Primera actualización.
- IEC 274, Pruebas de aisladores de porcelana o vidrio destinados a las líneas aéreas de tensión nominal superior a 1000 V. 1ª edición, 1968.
- IEC 60038, IEC Standard Voltages, International Electro Technical Commission, 21 pp.
- IEC 60071, Insulation coordination. Part 1: Definitions, principles and rules. 1993, 47 pp.
- IEC 60071, Insulation coordination. Part 2: Definitions, principles and rules. 1996, 251 pp.
- IEC 60694, Common Specifications for High Voltage Switchgear and control gear. Consolidated Edition 2002, 225 pp.
- IEC 60865, Short circuit currents, calculation of effects. Part 1: Definitions and calculation methods. 1993, 15 pp.
- IEC 60865, Short circuit currents, calculation of effects. Part 2. : Examples of calculation methods. 1994, 81 pp.
- IEC 60865-1, Short-circuit currents- calculation of effects. Definitions and calculation methods, 115 pp.
- IEC 60865-2, Short-circuit currents- calculation of effects. Examples of calculation, 81 pp.
- IEEE Standard 60099-1. "Surge arresters – Part 1. Non linear resistor type gapped surge arrester for ac systems", 1999, 93 pp.
- IEEE Standard 60099-3. "Surge arresters – Part 3. Artificial pollution testing of surge arresters". 1990, 23 pp.
- IEEE Standard 60099-5. "Surge arresters – Part 4. Metal oxide surge arrester without gaps for ac systems", 2001, 261 pp.
- IEEE Standard 60099-5. "Surge arresters – Part 5. Selection and application recommendation", 2000, 111 pp.
- IEEE Standard 605-1987. "Guide for Design of Substation Rigid-Bus Structures."
- IEEE Standard 80-2000. "Guide for Safety in Substation Grounding", "The Rolling Sphere Method of Lightning Protection for Substations: A Practical Application," by Jeff C. Camden, Black & Veatch, 1990.
- IEEE Standard 998-1996, Guide for direct lightning stroke shielding of substations.
- IEEE. Standard 367-1987. "Guide for Determining the Maximum Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced voltage from a Power Plant."
- Martín, J.R. (1992). *Diseño de subestaciones eléctricas*. McGraw-Hill.
- Moreno Ospina, G. y Valencia, J.A. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra*. Medellín: Ed. Universidad de Antioquia.
- Ramírez G., C.F. (1991). *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. Medellín: Mejía Villegas S.A..
- Ramírez G., C.F. (2003). *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. Medellín: Mejía Villegas S.A.
- Ramírez G., C.F. (2008). *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. Medellín: Mejía Villegas S.A.

RETIE (2007). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, resolución 184766 del 2 de abril.

Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, NFPA-780, 2000.

Torres, H. (2008). Protección contra rayos. ICONTEC, Universidad Nacional, Bogotá.

US Department of Agriculture (1978). Design Guide for Rural Substations, Rural Electrification Administration Bulletin 65-1, June.