

DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE
DISEÑO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

MATEUS ALONSO GALICIA CASTRO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA RISARALDA
2015

DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE
DISEÑO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

MATEUS ALONSO GALICIA CASTRO

Proyecto de grado para optar al título de
Tecnólogo en Electricidad

Director.
Carlos Julio Zapata Grisales
Dr. en ingeniería eléctrica
Docente programa de Tecnología Eléctrica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA RISARALDA
2015

Nota de aceptación:

Firma del director del proyecto

Firma del evaluador

AGRADECIMIENTOS.

A mí familia principalmente mi madre Emilce Castro Ramirez y mi hermano Victor Raúl López Castro, por su inagotable apoyo y por haber creído en esta propuesta que inició poco tiempo después de terminados los estudios secundarios, a mi novia Daniela Méndez Gaviria y su familia por recibirme en su hogar, a las personas que estuvieron cada día a mi lado en las aulas de clases, a mis amigos Andrés, Diego, Sebastián, Edison y Cristhian por estar a mi lado en los momentos difíciles, a mis maestros que se esforzaron para guiar mis aprendizajes, al director del proyecto por su interés en la didáctica del saber que enseña y a aquellos artesanos que contribuyeron con la construcción de este material.

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
4. MARCO REFERENCIAL.....	4
4.1. MARCO CONCEPTUAL.....	4
EQUIPOS DE PATIO.....	4
CONFIGURACIONES DE PATIO.....	6
CONFIGURACION DE CONEXIÓN DE BARRAS - TENDENCIA EUROPEA.....	7
CONFIGURACIÓN DE CONEXIÓN DE INTERRUPTORES - TENDENCIA AMERICANA.....	7
4.2. MARCO TEÓRICO.....	7
4.2.1. DISTANCIAS DE SEGURIDAD.....	7
4.3. DISTANCIAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SUBESTACIONES.....	11
Ancho de barras.....	12
Ancho de campo.....	12
Altura de campo.....	14
Longitud de campo.....	14

4.4.	APANTALLAMIENTO.	15
4.4.1.	Método electrogeométrico.	16
5.	METODOLOGÍA	19
6.	DESARROLLO DEL MÓDULO DIDÁCTICO.	20
6.1.	Selección del nivel de tensión.	22
6.2.	Cálculo de la escala.	24
6.3.	DISEÑO DE EQUIPOS.	25
	Transformador de potencial.	25
	Transformador de corriente.	26
	Interruptor.	27
	Pararrayos.	28
	Seccionador.	29
	Transformador de potencia.	31
	Pórticos, barrajes y aisladores de retención.	33
7.	EQUIPOS Y CONFIGURACIONES DEL MÓDULO DIDÁCTICO.	34
8.	CONCLUSIONES.	50
9.	BIBLIOGRAFÍA	51

LISTA DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 1. Tensiones para sistemas de más de 35 kV	5
Tabla 2. Nivel de aislamiento normalizado para las tensiones asignadas de rango I	8
Tabla 3. Correlación entre tensiones de soportabilidad al impulso atmosférico y distancias mínimas en aire ($U_m < 300$ kV).	9
Tabla 4. Distancias típicas entre equipos	15
Tabla 5. Equipos construidos para la simulación de las configuraciones.	20
Tabla 6. Valores asumidos para el desarrollo del módulo didáctico.	22
Tabla 7. Tensión de soportabilidad al impulso tipo rayo asumida	23
Tabla 8. Dimensiones transformador de potencial.	24
Tabla 9. Dimensiones transformador de corriente.	26
Tabla 10. Dimensiones interruptor LTB E1.	27
Tabla 11. Dimensiones pararrayos PEXLIM P-X XV 245.	28
Tabla 12. Dimensiones seccionador GW 55.	30

LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1. Circulación de personal	10
Figura 2. Circulación de vehículos.	11
Figura 3. Ancho de campo determinado por los equipos	12
Figura 4. Ancho de campo con seccionador de apertura central	13
Figura 5. Altura de campo.	14
Figura 6. Ilustración del concepto de la esfera de radio igual a la distancia de descarga S_m	16
Figura 7. Apantallamiento con cable de guarda cada campo o cada dos campos	18
Figura 8. Instrucciones de referencia para la construcción del transformador de potencial.	25
Figura 9. Instrucciones de referencia para la construcción del transformador de corriente.	26
Figura 10. Instrucciones de referencia para la construcción del interruptor LTB E1.	27
Figura 11. Instrucciones de referencia para la construcción del pararrayos.	29
Figura 12. Instrucciones de referencia para la construcción del seccionador.	30
Figura 13. Transformador de potencia	31
Figura 14. Vista lateral transformador de potencia	32
Figura 15. Vista superior del transformador de potencia.	32
Figura 16. Transformador de potencial del módulo didáctico.	34
Figura 17. Transformador de corriente del módulo didáctico.	35
Figura 18. Interruptor del módulo didáctico.	36
Figura 19. Pararrayos del módulo didáctico.	37
Figura 20. Seccionador del módulo didáctico.	38
Figura 21. Transformador de potencia del módulo didáctico.	38
Figura 22. Barra sencilla con el material didáctico vista lateral.	39
Figura 23. Barra sencilla con el módulo didáctico vista superior.	40
Figura 24. Barra principal y barra de transferencia.	41
Figura 25. Barra principal y de transferencia vista superior.	42
Figura 26. Doble Barra.	43
Figura 27. Doble barra vista superior.	44
Figura 28. Doble barra más barra de transferencia.	45
Figura 29. Doble barra más barra de transferencia vista superior.	46
Figura 30. Anillo de tres salidas con el módulo didáctico.	47
Figura 31. Anillo de tres salidas.	48
Figura 32. Simulación de un operario de subestaciones al lado del interruptor.	49

RESUMEN.

En este proyecto se desarrolló un kit didáctico de subestaciones eléctricas con el propósito de que los estudiantes puedan ver fácilmente las configuraciones de patio que se pueden construir.

Se compone de un transformador de potencia, transformador de potencial, transformador de corriente, pararrayos, interruptores, seccionadores, cadenas de aisladores y estructuras de barras colectoras y pórticos.

PALABRAS CLAVES

Palabras claves: subestaciones eléctricas, configuración de patio, diseño de patio.

ABSTRACT

In this project a didactical kit of power substations was developed with the purpose that students can easily see the several switchyard configurations that can be built.

It is composed by a power transformer, potential transformers, current transformers surge arresters, circuit breakers, disconnectors, insulator strings and structures for bus bars and portics.

KEYWORDS:

Power substations, switchyard design, switchyard configuration

1. INTRODUCCIÓN.

Las subestaciones eléctricas son parte fundamental para cualquier sistema eléctrico interconectado, en cuanto a que se construyen con el objetivo de elevar, reducir la potencia y transferir carga entre otros. Una subestación se conforma por equipos automáticos que controlan el flujo de la energía eléctrica y garantizan la seguridad del sistema con su equipo principal el interruptor seguidamente de los seccionadores, transformadores de instrumentación, transformadores de potencial y pararrayos que forman una bahía o diámetro.

Las configuraciones deben responder a parámetros como seguridad, confiabilidad, rentabilidad, mantenimiento, comunicación, medio ambiente y espacio además que el ciclo de vida de las subestaciones.

Este documento tiene la información precisa de la construcción de un módulo didáctico de subestaciones tridimensional a escala que da la facilidad al estudiante para identificar los equipos de patio utilizados para construir una bahía, las distancias de seguridad, las distancia entre equipos y la manera sistemática para construir cada una de las configuraciones.

En la primera parte de este documento se encontrará el proceso investigativo que se desarrolló para adquirir la información adecuada para la construcción de este material y el diseño del mismo.

En la segunda parte se encuentra el proceso constructivo que se llevó a cabo para la elaboración de cada pieza de este material didáctico y por último se entregan memorias de cálculo

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En la enseñanza del diseño de subestaciones eléctricas se ha detectado falencias por parte de los estudiantes en la identificación de las diferentes configuraciones de patio de subestaciones. Este problema se debe en parte, a la dificultad que tienen los estudiantes para visualizar cómo es que estas configuraciones se conforman a partir los equipos de subestación ya que no conocen equipos reales ni se dispone de modelos a escala tridimensionales.

Es por esto que surge la idea de construir un módulo didáctico que contenga modelos a escala de los diferentes equipos que conforman una subestación y de las estructuras asociadas, de tal forma, que los estudiantes puedan armar diferentes configuraciones a partir de estos y con lo cual puedan pasar a realizar los respectivos planos.

Actualmente, no existe en el programa de Tecnología Eléctrica un módulo didáctico como el que se propone construir.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un módulo didáctico para la enseñanza de diseño de patio de subestaciones eléctricas.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar modelos a escala de los principales equipos de patio, transformadores, bases de equipos para un nivel de tensión de alta tensión
- Desarrollar modelos a escala de estructuras metálicas que sean modulares para armar pórticos de llegada de líneas, barraje de un nivel y pórticos de patios de transformación.
- Desarrollar modelos a escala de cadenas de suspensión, barrajes y herrajes.

4. MARCO REFERENCIAL.

4.1. MARCO CONCEPTUAL.

BARRAJE: punto común de conexión de los diferentes circuitos asociados a una subestación (nodo del sistema) (1)

CAMPO DE CONEXIÓN (BAHÍA, MÓDULO): conjunto de equipos de una subestación para la maniobra, protección y medida de un circuito conectado a ella. (1)

CONFIGURACIÓN: ordenamiento dado a los equipos de maniobra de una subestación que permite definir sus propiedades y características de operación. (1)

EQUIPOS DE PATIO: elementos electromecánicos de alta tensión utilizados para realizar la maniobra, protección y medida de los circuitos y barrajes de la subestación. (1)

INTERRUPTOR: dispositivo de maniobra capaz de interrumpir, reestablecer y llevar corrientes normales o asignadas del circuito y las anormales o de cortocircuito, mediante la conexión o desconexión de circuitos. (1)

PARARRAYOS: dispositivo para la protección del sistema de potencia y sus componentes contra las sobretensiones, ya sean producidas por descargas atmosféricas o por maniobras en el sistema durante fallas. (1)

SECCIONADOR: dispositivo de maniobra utilizado para aislar los interruptores, porciones de la subestación o circuitos, para mantenimiento; en configuración de barras son utilizados para seleccionar la forma de conectar los circuitos a los barrajes. (1)

SUBESTACIÓN CONVENCIONAL O ABIERTA: subestación cuyos componentes se instalan de tal forma que el aislamiento para su nivel de tensión se obtiene a través del aire a presión atmosférica. Son también denominadas AIS (Air Insulated Substation), subestación aisladas al aire. (1)

TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN: dispositivos de monitoreo que censan por medio de un acople inductivo, capacitivo u óptico el cambio de estado de los parámetros de tensión y corriente del sistema. (1)

TENSIÓN NOMINAL: la tensión asignada de un sistema se define según la IEC 60038 como aquella con la cual se designa el sistema y a la cual se referencian ciertas características de operación. (1) Ver tabla 1.

TENSIONES ASIGNADAS Y TENSIONES DE SERVICIO EN LAS SUBESTACIONES.

Debido a que las tensiones de servicio no se mantienen constantes sino que varía de acuerdo con el funcionamiento del sistema eléctrico. Estas variaciones se deben mantener dentro de un rango establecido por los límites en aislamiento para evitar fallas por aislamiento. Es por esto que se debe plantear la tensión de servicio y la tensión asignada como se definirá a continuación.

Tensión asignada de un sistema se define, según IEC 60038, como aquella con la cual se designa el sistema y a la cual se referencian ciertas características de operación. (1)

Tensión de servicio en un punto cualquiera de un sistema eléctrico es el valor realmente existente en dicho punto, en un instante determinado. (1)

De acuerdo a estas disposiciones en la Tabla 1 se ilustran los valores de tensiones asignadas y tensiones máximas de servicio normalizadas por la Comisión Electrotécnica Internacional CEI o IEC [IEC 60038 (2002)] para niveles de tensión superiores a 35 kV.

Tabla 1. Tensiones para sistemas de más de 35 kV

Tensión asignada [kV]		Tensión máxima [kV]
(45)	-	(52)
66	69	72,5
110	115	123
132	138	145
(150)	-	(170)
220	230	245
(1)		(300)
(1)		362
(1)		420
(1)		550 o 525
(1)		800 o 765
(1)		1 050 o 1 100
(1)		1 200

Notas:

Tabla 1.2. de la referencia (1)

Los valores son aplicables para las series I y II, 50 y 60 Hz o 60 Hz respectivamente.

Los valores indicados son entre fases

Los valores indicados entre paréntesis no son comunes y no deben ser usados en sistemas nuevos

⁽¹⁾ valores no especificados por la norma.

Estos valores pueden agruparse en las siguientes categorías:

Alta tensión, AT:	$52 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$
Extra alta tensión, EAT:	$300 \text{ kV} \leq U_m \leq 550 \text{ kV}$
Ultra alta tensión, UAT:	$U_m \geq 800 \text{ kV}$

CONFIGURACIONES DE PATIO

Se denomina configuración al ordenamiento de equipos electromecánicos constitutivos de un patio de conexiones o pertenecientes a un mismo nivel de tensión de una subestación, de tal forma que su operación permita dar a la subestación diferentes grados de confiabilidad, seguridad o flexibilidad para el manejo, la transformación y distribución de la energía. (1)

Existen dos tendencias internacionales para subestaciones de alta tensión (AT) y extra alta tensión (EAT); estas son la tendencia europea o conexión de barras y la tendencia americana o conexión de interruptores, estas se seleccionaran de acuerdo a la necesidad, trascendencia o costos, la utilización de cualquiera de estas tendencia está ligada directamente a tradición, mantenimiento y operación mientras que la configuración la define directamente la empresa administradora del sistema de potencia. (1)

Flexibilidad: propiedad de la instalación para acomodarse a diferentes condiciones que se puedan presentar especialmente por cambios operativos en el sistema y, además por contingencias y/o mantenimiento del mismo. (1)

Confiabilidad: se define como la probabilidad de que una subestación pueda suministrar energía durante un periodo de tiempo dado, bajo condiciones de que al menos un componente de la subestación esté fuera de servicio. Es decir, que cuando ocurra una falla en un elemento de la subestación (interruptor, barraje, etc.) se pueda continuar con el suministro de energía después de efectuar una operación interna, mientras se ejecuta la reparación de dicho elemento. (1).

Seguridad: propiedad de una instalación de dar continuidad de servicio sin interrupción durante fallas de los equipos de potencia, especialmente interruptores y barrajes. La seguridad implica confiabilidad

CONFIGURACION DE CONEXIÓN DE BARRAS - TENDENCIA EUROPEA.

Por conexión de barras se entienden aquellas en las cuales cada circuito tiene un interruptor, con la posibilidad de conectarse a una o más barras por medio de seccionadores. Las configuraciones más utilizadas en esta tendencia para niveles de AT y EAT son:

- Barra sencilla.
- Barra principal y barra de transferencia.
- Doble barra.
- Doble barra más barra de transferencia.

CONFIGURACIÓN DE CONEXIÓN DE INTERRUPTORES - TENDENCIA AMERICANA.

Por configuración de conexión de interruptores se entienden aquellas en las cuales los circuitos se conectan a las barras o entre ellas por medio de interruptores.

- Anillo.
- Interruptor y medio.
- Doble interruptor.
- Anillo cruzado

La descripción detallada de cada una de estas configuraciones se encuentra en el capítulo 2 del libro de subestaciones de alta y extra alta tensión de Carlos Felipe Ramírez de la referencia (1).

4.2. MARCO TEÓRICO.

4.2.1. DISTANCIAS DE SEGURIDAD.

Se determina con la suma de un valor básico que determina una “zona de guarda” alrededor de partes energizadas y un valor en función del movimiento de personal de mantenimiento, transporte y maquinaria usada. Esto define una “zona de seguridad”.

Valor básico: distancia mínima fase-tierra en aire más 5% o 10% como factor de seguridad.

Distancias mínimas de seguridad.

Para definir estas distancias mínimas se debe calcular inicialmente el valor básico, este depende del nivel de tensión y el aislamiento.

Procedimiento para definir el valor básico:

1°. Definir el valor de tensión.

Se acude a la tabla 1. Donde se encuentran los valores de tensión asignada y tensión máxima,

2°. Nivel de asilamiento.

Se selecciona el valor de nivel de tensión de soportabilidad al impulso tipo rayo de la tabla 2. esto se hace dado que al cumplir con este valor, automáticamente se cumple con el valor de tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial.

Tabla 2. Nivel de aislamiento normalizado para las tensiones asignadas de rango I

Tensión máxima del equipo U_m [kV] (valor eficaz)	Tensión de soportabilidad normalizada de corta duración a frecuencia industrial [kV] (valor eficaz)	Tensión de soportabilidad normalizada al impulso tipo rayo [kV] (valor pico)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050

Nota: Tomada de IEC 60071-1 (1993).

Notas.

Tabla 3.1 del libro de subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión de la referencia (1).

Una vez obtenido el nivel de tensión de soportabilidad se determina la correlación entre tensiones de soportabilidad al impulso atmosférico y distancias mínimas en aire para valores inferiores a 300 kV.

3°. Distancias mínimas de seguridad.

Tabla 3. Correlación entre tensiones de soportabilidad al impulso atmosférico y distancias mínimas en aire ($U_m < 300$ kV).

Tensión nominal soportada al impulso tipo rayo [kV]	Distancia mínima [mm]	
	Punta-estructura	Conductor-estructura
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
200	380	
250	480	
325	630	
450	900	
550	1 100	
650	1 300	
750	1 500	
850	1 700	1 600
950	1 900	1 700
1 050	2 100	1 900
1 175	2 350	2 200
1 300	2 600	2 400
1 425	2 850	2 600
1 550	3 100	2 900
1 675	3 350	3 100
1 800	3 600	3 300
1 950	3 900	3 600
2 100	4 200	3 900

Notas.

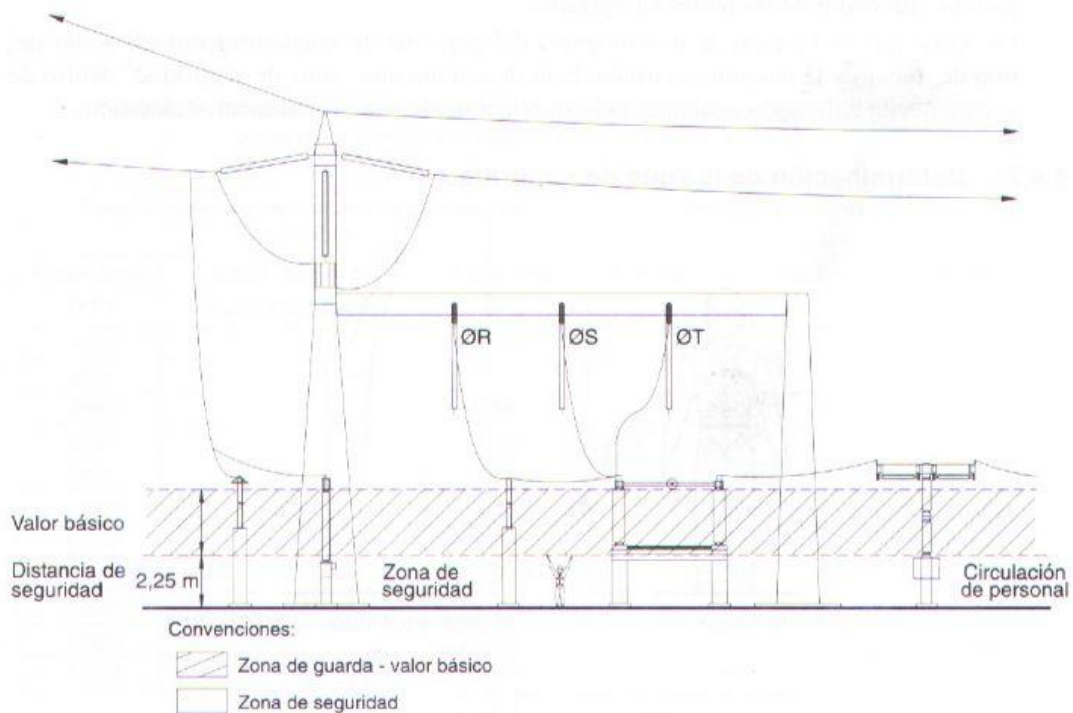
- Tabla 4.1 del libro de subestaciones de alta y extra alta tensión.
- Los impulsos atmosféricos normalizados son aplicables tanto fase-fase, como fase-tierra.
- Las distancias punta-estructura y conductor-estructura son aplicables a asilamiento fase-tierra
- La distancia punta-estructura es también aplicable a aislamientos fase-fase.

Por lo tanto el valor básico se toma de las distancias mínimas de la tabla 3. Para todos los niveles de tensión descritos allí.

La zona de seguridad como se ha mencionado depende directamente del movimiento de personal, mantenimiento y transporte dentro del patio de equipos. Para cumplir con estos requisitos se tiene en cuenta:

Circulación de personal.

Figura 1. Circulación de personal

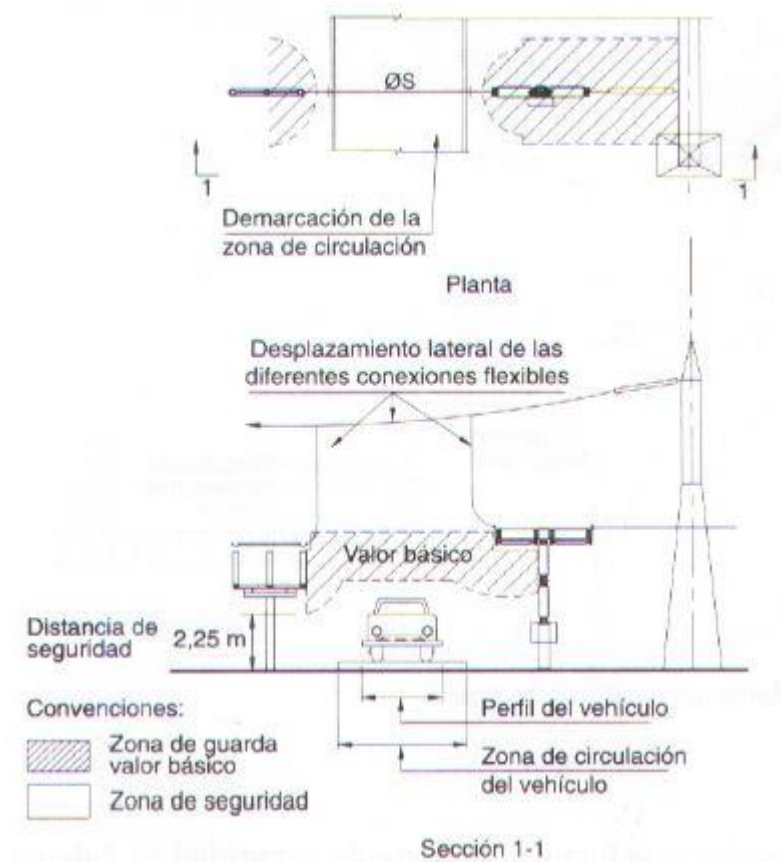


La altura de 2.25 m representa la altura promedio de un operario de subestaciones con los brazos estirados.

Circulación de vehículos.

En el montaje y mantenimiento de algunos equipos como interruptores es necesario utilizar grúa y por lo tanto se debe proveer de una zona de seguridad para estos casos, esta zona de seguridad la define el perfil del vehículo más 0.7 m para permitir la libre movilidad.

Figura 2. Circulación de vehículos.



4.3. DISTANCIAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SUBESTACIONES

El dimensionamiento de una subestación depende básicamente de:

- Ancho de barras.
- Ancho de campo.
- Altura de campo.
- Longitud de campo.

Ancho de barras.

Este módulo didáctico se ha diseñado sobre el caso más común para el dimensionamiento del ancho de barras que depende únicamente de las distancias mínimas de seguridad fase-fase y fase-tierra más el 5 % y 10 %.

Los aspectos técnicos detallados de los demás casos sobre dimensionamiento de ancho de barras pueden ser estudiados en el literal 4.5.1 del libro de subestaciones de alta y extra alta tensión de la referencia (1).

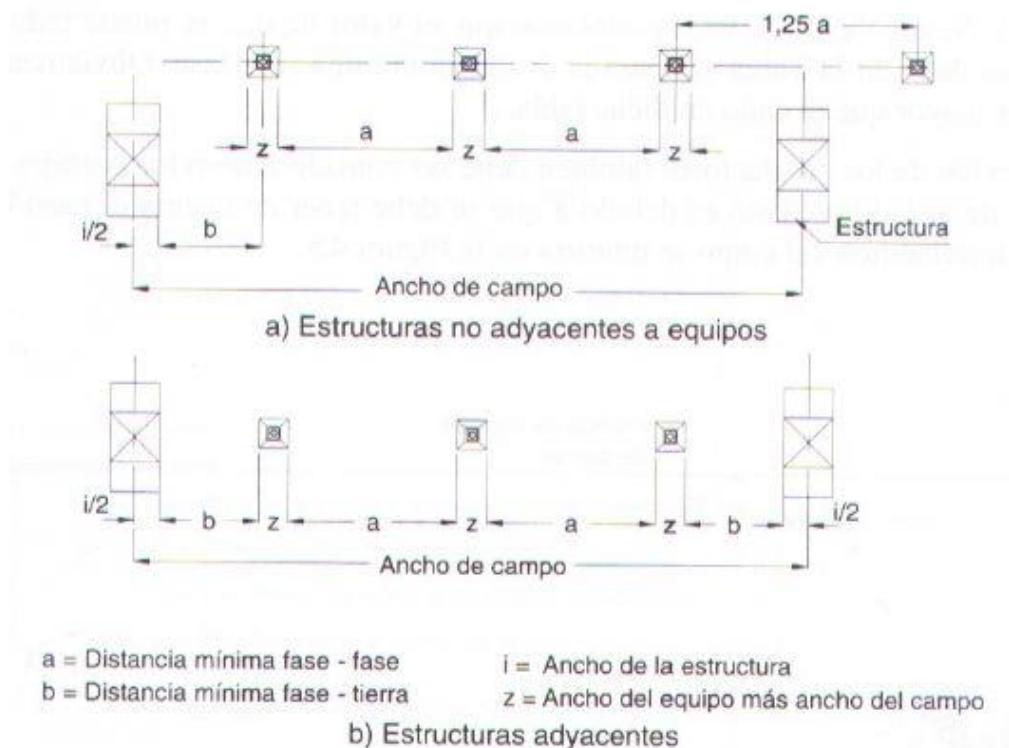
Ancho de campo.

Se define ancho de campo como la distancia entre ejes de las columnas que forman el pórtico de entrada de líneas, este depende de la configuración, dimensión de equipos y barrajes utilizados.

Para este módulo didáctico se dimensionó el ancho de campo con base al siguiente criterio:

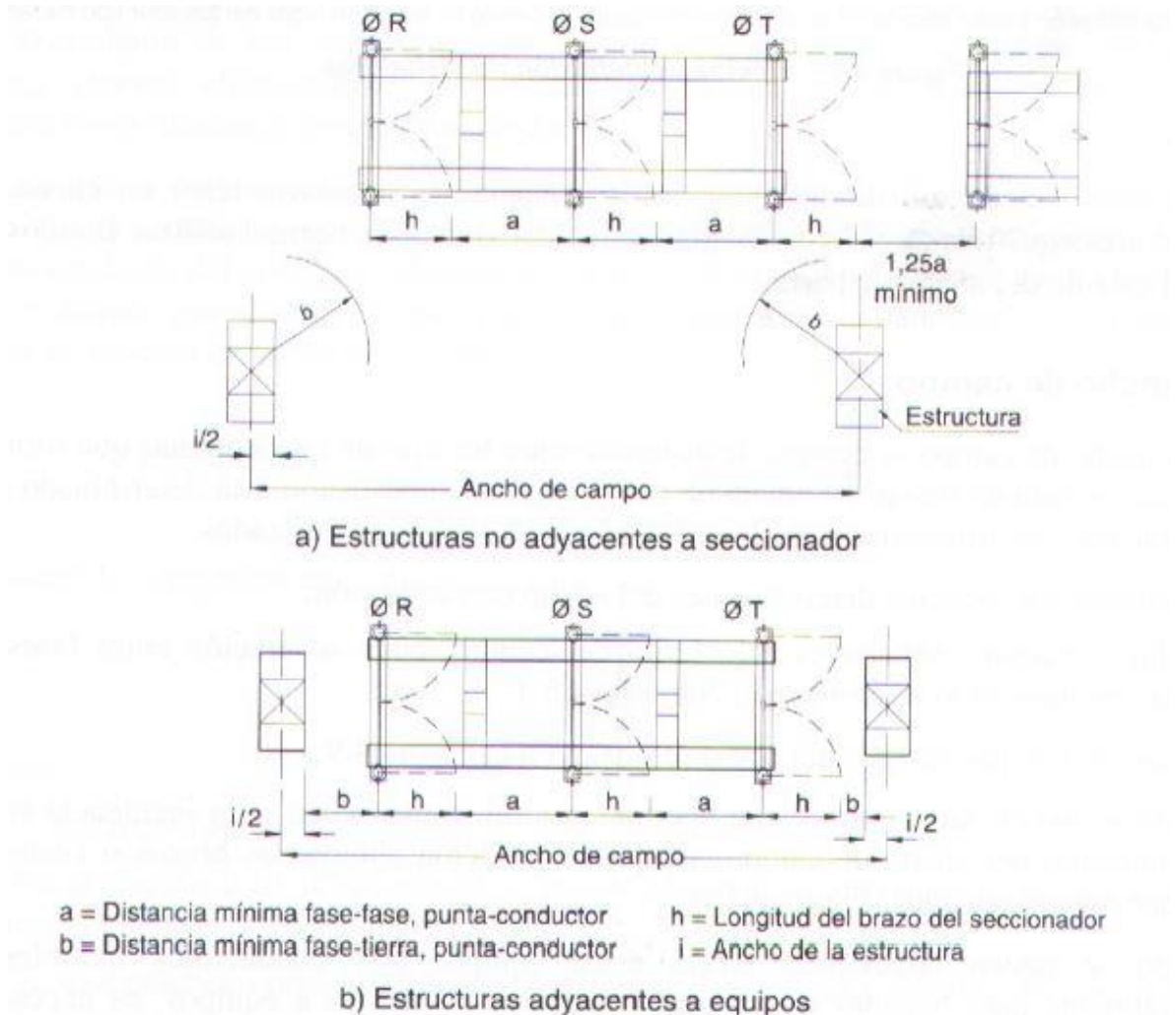
- Ancho de campo determinado por los equipos

Figura 3. Ancho de campo determinado por los equipos



El ancho de campo que muestra la figura 3. Puede ser visualizado en los pórticos, es ahí donde se encuentran los pararrayos. Por otro lado se tiene el caso típico, que es, la instalación de seccionadores debajo de los barrajes o entre pórticos.

Figura 4. Ancho de campo con seccionador de apertura central



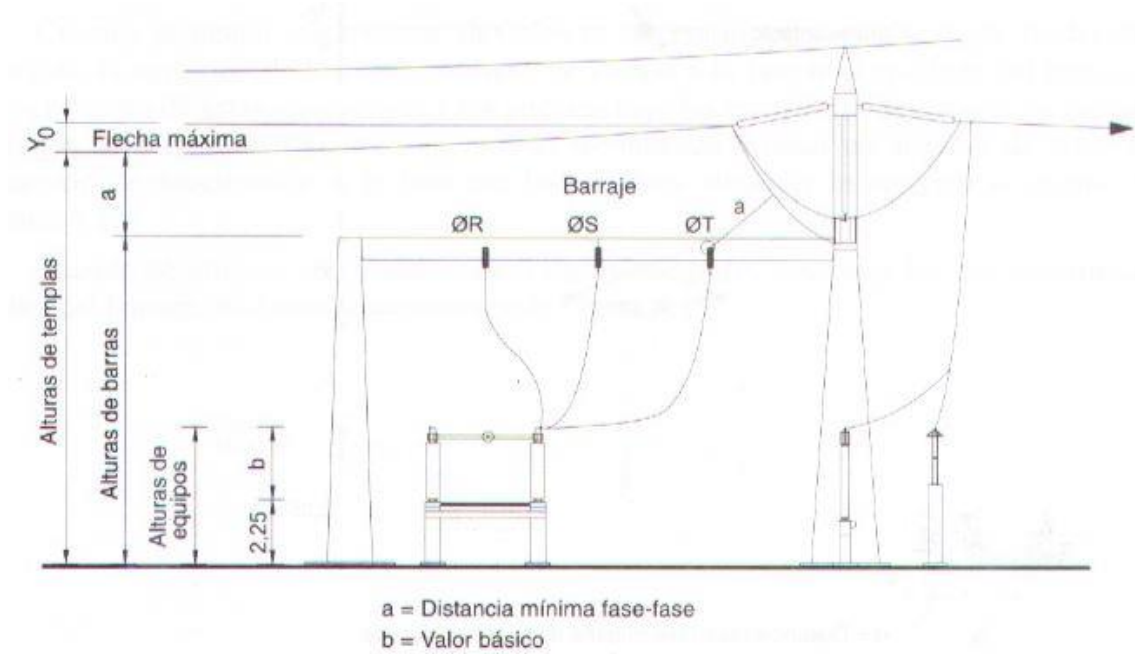
El ancho de campo seleccionado en este material didáctico se definió con base a las exigencias del seccionador como se ve en la figura 4. Este además de cumplir con las distancias mínimas de seguridad para el seccionador lo hace también para los demás equipos.

Para mayor eficiencia se dio simetría al ancho del campo, por posibles cambios en el seccionador, es decir, las longitudes h y b se tuvieron en cuenta a ambos lados del seccionador.

Altura de campo.

Esta depende directamente del tipo de conductores que se utilicen, de igual manera que por el número de niveles de conexión que requiera cada configuración, el primer nivel está conformado por la conexión entre equipos, cuya altura está determinada por las distancias de seguridad mencionadas anteriormente. El segundo nivel está conformado por los barrajes cuya altura debe ser igual o superior a las distancias mínimas de seguridad fase-fase y el tercer nivel está conformado por las templas de la línea cuya altura debe ser superior a las distancias mínimas de seguridad fase-fase más la flecha máxima de la templa. Por cuestiones de seguridad se sugiere aumentar estas longitudes un 10 % como factor de seguridad.

Figura 5. Altura de campo.



Nota.

La altura de equipos representa el primer nivel, la altura de barras el segundo y la altura de las templas representan el tercer nivel.

Longitud de campo.

La longitud de campo no depende de las distancias mínimas o de seguridad, sino del mantenimiento, tránsito a través de la subestación y estética. Se recomienda que los puntos de conexión de los equipos sean accesibles desde cualquier ubicación y se considera que una distancia mínima aceptable entre terminales de los equipos es de 1,0 m y 1,5 m para tensiones inferiores a 72,5 kV.

La longitud del campo se puede definir también con base a la distancia entre centros de equipos, como se ilustra en la tabla 10.

Tabla 4. Distancias típicas entre equipos

Equipos (entre equipo y equipo)		Distancia típica [m]				
		72,5 kV	123 kV	245 kV	550 kV	800 kV
1.	Transformador de instrumentación y seccionador	2,0	3,0	4,0	6,0	7,5
2.	Interruptor y seccionador	2,0	3,0	4,5 - 5,5	7,0 - 8,0	9,0 - 10,0
3.	Interruptor y seccionador con vía de circulación	5,5	7,5	8,0 - 9,5	12,0 - 14,0	14,0 - 16,0
4.	Interruptor y transformador de instrumentación	1,5	2,0	3,5 - 4,5	6,5	8,5
5.	Interruptor y transformador de instrumentación con vía de circulación	5,0	6,5	6,5	10,0 - 12,0	12,0 - 14,0
6.	Seccionador y seccionador	3,0	3,5	6,0	7,0 - 8,0	9,0 - 10,0
7.	Seccionador pantógrafo y seccionador pantógrafo	-	3,0	4,5	6,5	8,0
8.	Seccionador pantógrafo y transformador de instrumentación	-	2,5	3,5	5,5	7,0
9.	Interruptor y seccionador pantógrafo	-	3,0	5,0	10,0	13,0
10.	Interruptor y seccionador pantógrafo con vía de circulación	-	7,0	7,5 - 9,0	11,0 - 13,0	13,0 - 15,0
11.	Seccionador y seccionador pantógrafo	-	3,5	4,5	7,0	9,0
12.	Entre transformadores de instrumentación	1,5	2,0	3,0	4,0 - 5,0	6,0
13.	Pararrayos y transformadores de instrumentación	1,5	2,0	3,0	5,0	6,0
14.	Entre cualquier equipo y el cerco perimetral [IEEE Std 1119]	3,7	4,0	4,9	6,4	7,0

Los valores en el recuadro rojo determinan los asumidos para este material didáctico.

4.4. APANTALLAMIENTO.

Se conoce como apantallamiento al conjunto de elementos instalados con el objetivo principal de proteger los equipos y elementos de la subestación contra descargas atmosféricas directas (rayos).

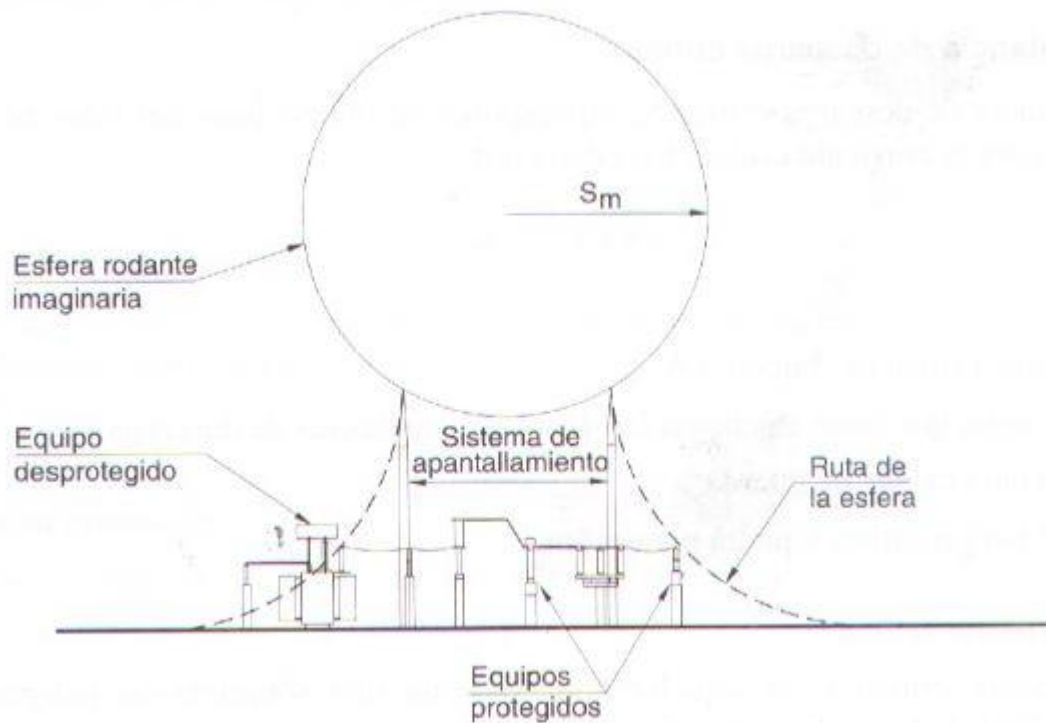
Son diversos los métodos de diseño de apantallamiento, en este capítulo se mencionan 3 de ellos y se calcula para este módulo didáctico con el tercer método; estos son:

1. Método clásico de ángulos fijos.
2. Método clásico de curvas empíricas
3. Método electrogeométrico.

4.4.1. Método electrogeométrico.

Se pretende que los objetos a ser protegidos sean menos atractivos a los rayos que los objetos apantalladores, esto se logra determinando la llamada “distancia de descarga” del rayo a un objeto, cuyo significado es “la longitud del último paso de un rayo bajo la influencia de la tierra o de un terminal que lo atrae”.

Figura 6. Ilustración del concepto de la esfera de radio igual a la distancia de descarga S_m



S_m : Distancia de descarga.

Para el cálculo del apantallamiento se realiza el siguiente procedimiento, tanto para cables guarda como para mástiles:

1. Cálculo de la altura promedio de los barrajes, h_{av} .
2. Cálculo de la impedancia impulso del barraje teniendo en cuenta el radio corona, Z_0 .
3. Cálculo de la corriente crítica de descarga, I_c .

4. Cálculo de la distancia de descarga crítica, S_m . Lo cual se convierte en el radio de la esfera.

Del ejemplo de aplicación de apantallamiento por cables guardas en el literal 5.5.6.1. del libro de subestaciones de alta y extra alta tensión tomamos el cálculo realizado para nivel de tensión a 230 kV, en el cual el barraje superior está conformado por cables aislados por cadenas de aisladores soportados en pórticos.

Ancho de campo 14 m (módulo didáctico)

Impedancia característica del barraje, Z_0 : 336 Ω

Tensión crítica de flameo de los aisladores, CFO: 900 kV

- Corriente crítica de descarga

$$I_c = \frac{2,06\text{CFO}}{Z_0} = \frac{2,068*900}{336} = 5,539 \text{ kA} \quad (1)$$

- Distancia de descarga crítica

$$S_m = 8 k I_c^{0,65} = 8 * 1 * 5,539^{0,65} = 24,339 \text{ m} \quad (2)$$

$$k = 1$$

Donde

k: coeficiente que tiene en cuenta las diferentes distancias de descarga, 1 para cables guarda.

- Altura efectiva del cable de guarda

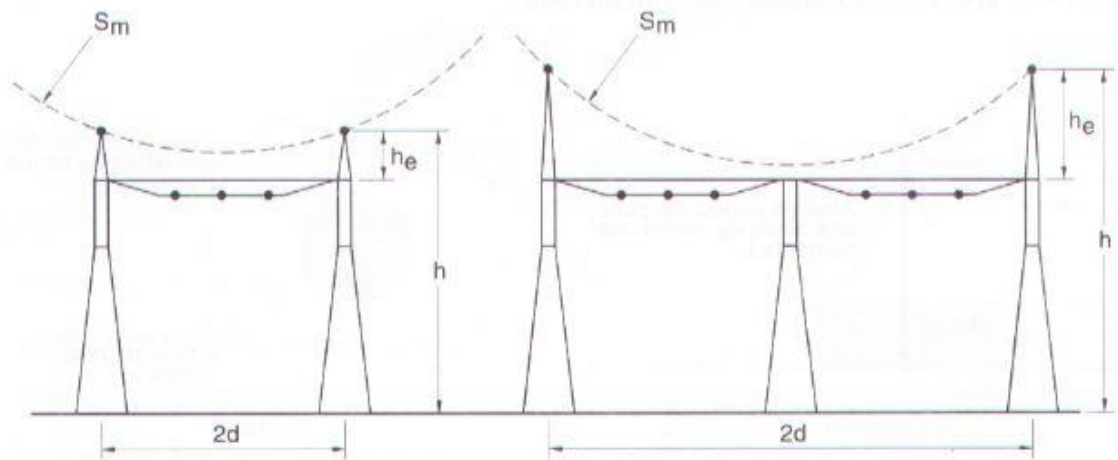
$$h_e = S_m - \sqrt{S_m^2 - d^2} = 24,339 - \sqrt{24,339^2 - 7^2} = 1,02 \text{ m}$$

Donde

d: la mitad del ancho de campo.

Por lo tanto para apantallar con dos cables de guarda en cada campo se requiere un castillete con una altura mínima de 1,02 m. y para dos campos como es el caso de la configuración anillo se necesitan castilletes de 4,42 m con un ancho de campo de 28 m.

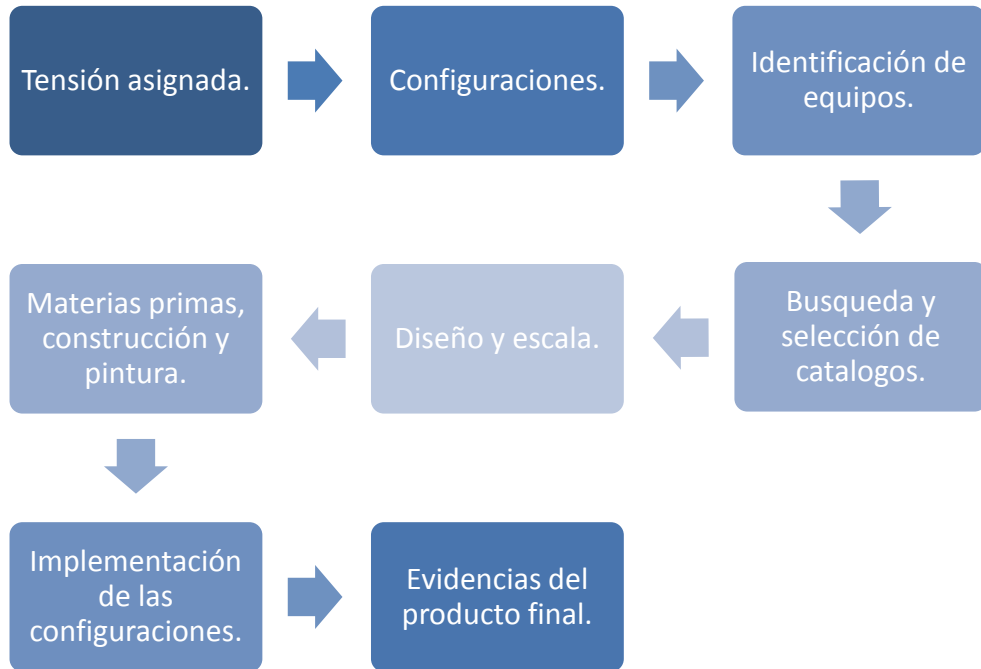
Figura 7. Apantallamiento con cable de guarda cada campo o cada dos campos



Con base a los cálculos, la distancia de descarga crítica no cambia por lo tanto, si aumenta el ancho de campo debe aumentar la altura del apantallamiento para garantizar que las descargas no caigan sobre los equipos.

5. METODOLOGÍA

Para la elaboración de este módulo didáctico se siguieron los siguientes pasos de manera secuencial.



6. DESARROLLO DEL MÓDULO DIDÁCTICO.

Se hizo la búsqueda de los fabricantes de los equipos y se determinó utilizar los manuales de la empresa ABB dado que es la empresa que oferta la totalidad de los equipos y tiene en su plataforma virtual los manuales de uso, fabricación, adquisición de repuestos y transporte de cada uno de ellos.

Cada equipo está conformador por tres polos, a excepción del seccionador que los tiene los tres polos conformados cada uno de ellos de dos piezas móviles. Por simplicidad se simularon los equipos básicos en una subestación eléctrica; Interruptor, seccionador, transformador de corriente, transformador de potencial, pararrayos y transformador de potencia.

Tabla 5. Equipos construidos para la simulación de las configuraciones.

Cantidad	Polos	Descripción	Catálogo
18	54	Interruptor	ABB live tank circuit breakers – buyer’s guide, LTB E1 model. (2).
12	72	Seccionador	ABB horizontal center break disconnecter type GW 55, up to 245 kV (3).
18	54	Transformador de corriente (CT)	Transformadores de medida exterior, guía para el comprador, modelo IMB 245. (4)
18	54	Transformador de potencial (PT)	Transformadores de medida exterior, guía para el comprador, modelo CPB 245. (4)
18	54	Pararrayos (DPS)	ABB Surge arresters – buyer’s guide, PEXLIM PX VX245 model. (5).
1	1	Transformador de potencia	ABB Data sheet transformer VN00200 model. (6)
4	24	Barraje *	-----
5	30	Pórtico *	-----
15	45	Aislador de retención *	-----

Notas.

* Los barrajes, pórticos y aisladores de retenciones se determinaron con base al nivel de aislamiento debido a la carencia de estos catálogos, es por esto que no aparecen los catálogos correspondientes.

Este módulo didáctico cuenta con las piezas suficientes para simular configuraciones de las dos tendencias, por un lado de la tendencia europea; barra sencilla, barra principal y barra de transferencia, doble barra, doble barra más seccionador de transferencia y doble barra más barra de transferencia. Y de la tendencia americana; anillo e interruptor y medio.

Inicialmente se había propuesto construir los equipos con espuma de poliuretano, para esto se construyó un torno para espuma y se moldearon todas las piezas cilíndricas de este módulo didáctico. Pero por cuestiones técnicas y químicas estas piezas con el paso del tiempo se deterioraron y hubo que cambiar de material.

Se eligió una clase de madera denominada carrá por su dureza, y se contrató a un artesano experimentado que torneó las 154 piezas cilíndricas que conforman este material didáctico. Además se eligió otro tipo de madera denominado algarrobo por su peso, dado que es liviano y suave para construir las bases rectangulares de los equipos, los pórticos y las vigas de los barrajes.

Para los bornes de conexión de los equipos se eligió; para los interruptores, lámina de aluminio y tornillos y para los demás equipos, partes de una bornera de conexiones.

Se pintaron las piezas con esmalte en base de aceite de colores; aluminio, gris metalizado, gris humo y tabaco claro.

Los barrajes y líneas del apantallamiento se modelaron con cuerdas por su versatilidad y peso.

6.1. Selección del nivel de tensión.

Tabla 6. Valores asumidos para el desarrollo del módulo didáctico.

Tensión asignada [kV]		Tensión máxima [kV]
(45)	-	(52)
66	69	72,5
110	115	123
132	138	145
(150)	-	(170)
220	230	245
(1)		(300)
(1)		362
(1)		420
(1)		550 o 525
(1)		800 o 765
(1)		1 050 o 1 100
(1)		1 200

Notas:

Valores tomados de la Tabla 1.

Los valores en el recuadro rojo de la Tabla 6. Corresponden al nivel de tensión seleccionado para este módulo didáctico, seleccionando según la clasificación anterior las subestaciones de alta tensión, menores a 300 kV.

Los pasos para el diseño de subestaciones eléctricas están especificados en detalle en el capítulo 1 del libro de subestaciones de alta y extra alta tensión de la referencia (1). Para este trabajo se diseñó un proceso análogo llevado a la didáctica de la enseñanza de diseño de subestaciones eléctricas

Tabla 7. Tensión de soportabilidad al impulso tipo rayo asumida

Tensión máxima del equipo U_m [kV] (valor eficaz)	Tensión de soportabilidad normalizada de corta duración a frecuencia industrial [kV] (valor eficaz)	Tensión de soportabilidad normalizada al impulso tipo rayo [kV] (valor pico)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050

Nota: Tomada de IEC 60071-1 (1993).

Notas.

Valores tomados de la tabla 2.

El recuadro rojo representa el nivel de tensión máximo en los equipos seleccionados.

El recuadro azul determina el nivel de la tensión de soportabilidad al impulso tipo rayo.

6.2. Cálculo de la escala.

Se definió que un transformador de potencial en el módulo didáctico tenga una altura de 12 cm (120 mm), con base a esta referencia se elaboraran todos los demás elementos.

Del manual del transformador de potencial se tomó los siguientes datos:

Tabla 8. Dimensiones transformador de potencial.

Cantidad de dispositivos de condensador y dimensiones								
Tipo	Cantidad de dispositivos de condensador	Capacitancia alta Para las tensiones de prueba del IEC pF (+10; - 5%)	A Altura total ³⁾ mm	B Distancia de descarga Polimero/Porcelana mm	C Altura a la brida ⁴⁾ mm	D Distancia entre los agujeros de montaje mm	E Altura plana de tierra Polimero/Porcelana mm	F Tanque de expansión del diámetro mm
CPB 245 ¹⁾	1	5600	2905	2005/1985	225	335	640/650	335
CPB 245 ¹⁾	1	7700	2940	1960	225	335	675	355
CPB 245 ²⁾	1	7700	3015	1960	305	335	750	355
CPB 245 ²⁾	2	12100	3405	1960	305	335	750	355

Notas.

Esta tabla ha sido modificada de la original del catálogo del transformador de potencial en la página 50.

El recuadro en rojo representa las dimensiones asumidas para este módulo didáctico.

$$\begin{aligned} \text{Altura real del PT} &= 2905 \text{ mm} \\ \text{Altura en el módulo didáctico del PT} &= 120 \text{ mm} \end{aligned}$$

Con una regla de tres simple se define qué.

$$\begin{aligned} \text{altura real del equipo en cm} &\rightarrow \text{altura en la maqueta en mm} \\ \text{equivalencia en cm de 1 mm} &\leftarrow 1 \text{ mm} \end{aligned} \quad (1)$$

De (1) tenemos.

$$\begin{aligned} 290,5 \text{ cm} &\rightarrow 120 \text{ mm} \\ X &\leftarrow 1 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$1 \text{ mm} = 2,42 \text{ cm} \quad (2)$$

De (2) se dice entonces qué, 1 mm en la maqueta equivale a 24,2 mm en la realidad

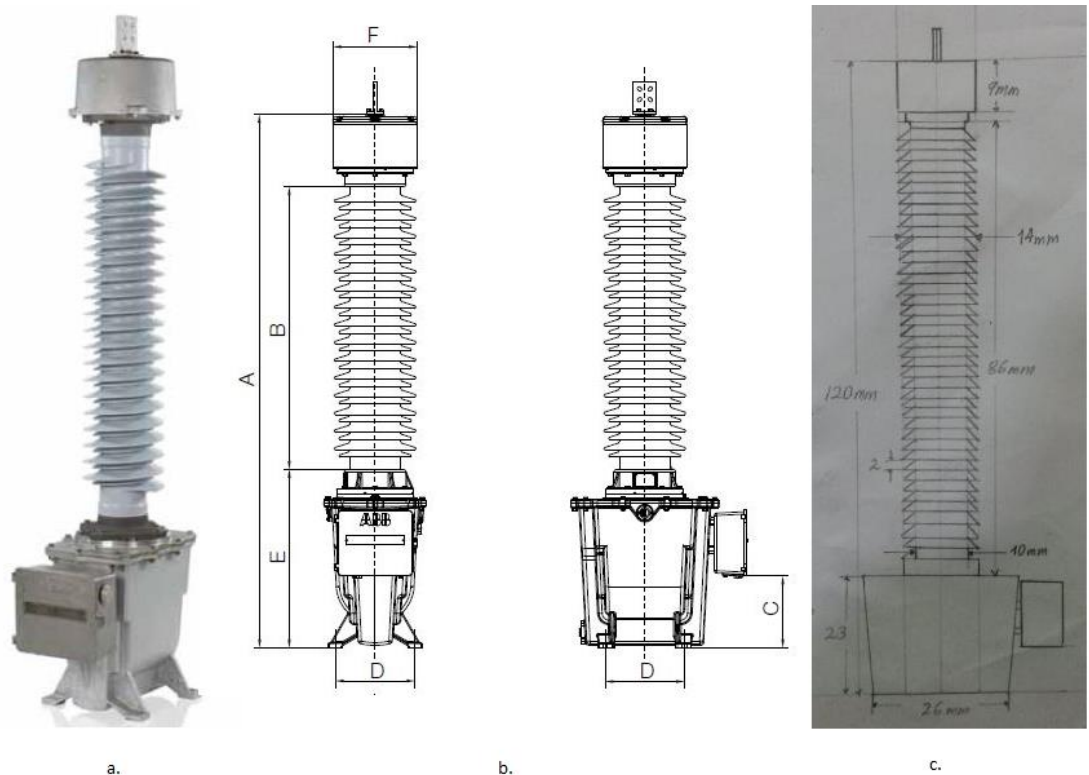
Entonces la escala es:

1/24,2

6.3. DISEÑO DE EQUIPOS.

Transformador de potencial.

Figura 8. Instrucciones de referencia para la construcción del transformador de potencial.



- a. Equipo real como se encontrará en una subestación eléctrica.
- b. Diagrama pictórico con el rotulado de las dimensiones de la Tabla 3.
- c. Diseño a escala con las dimensiones en el módulo didáctico.

Imágenes a y b tomadas del catálogo del transformador de potencial propiedad de ABB ©.

Como se puede observar en la figura 8. Este equipo consta de un solo punto de conexión al barraje esto se debe a que este instrumento de medida funciona como un gran voltímetro y se conecta a la red en paralelo y la referencia que se usa es la tierra.

Transformador de corriente.

Tabla 9. Dimensiones transformador de corriente.

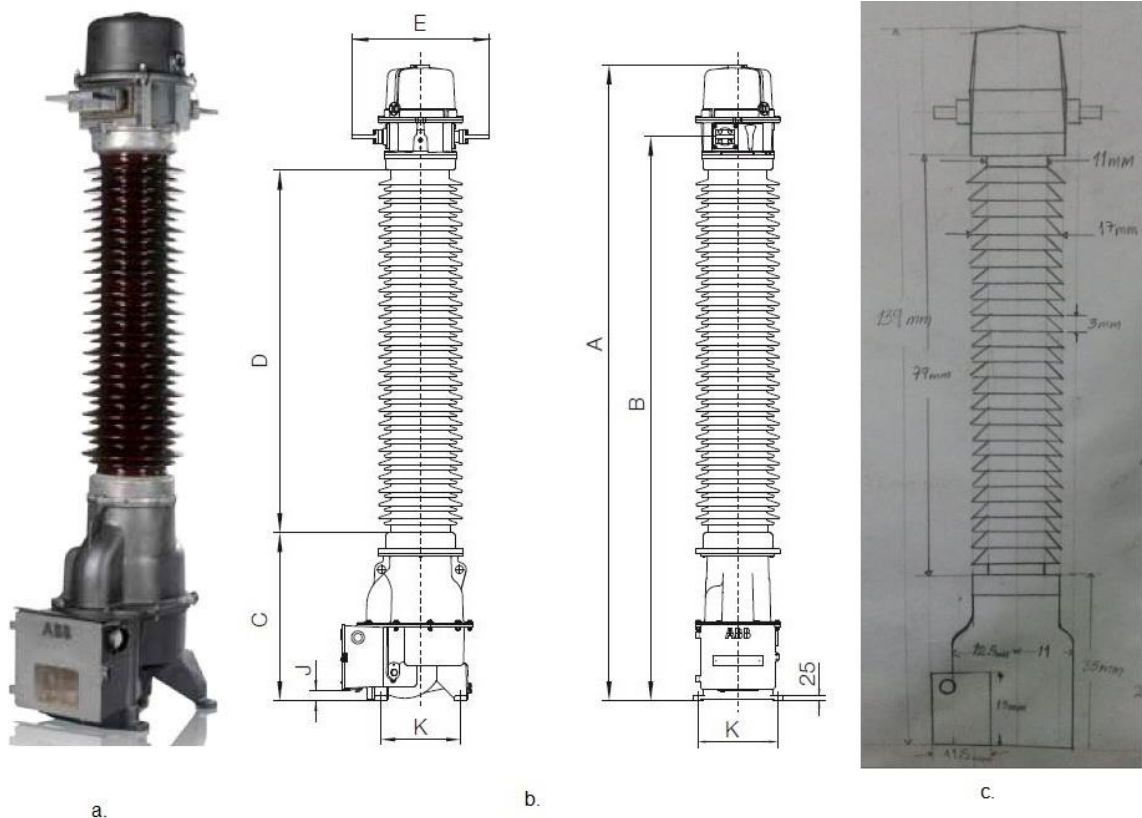
Dimensiones										
Tipo	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
	Altura total	Altura de conexión primaria	Altura plano de tierra	Distancia de descarga	Distancia entre las conexiones primarias		Dimensión del tanque inferior		Altura a la caja de conexión	Separación entre los agujeros de montaje
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
IMB 245 ¹⁾	3320	2950	860	1915	439	270	410	460	60	410
IMB 245 ²⁾	3640	3050	965	1915	439	270	395	885	485	450

Nota.

Esta tabla ha sido modificada de la original del catálogo del transformador de corriente en la página 26.

El recuadro en rojo representa las dimensiones asumidas para este módulo didáctico.

Figura 9. Instrucciones de referencia para la construcción del transformador de corriente.



- Equipo real como se encontrará en una subestación eléctrica.
- Diagrama pictórico con el rotulado de las dimensiones de la Tabla 4.
- Diseño a escala con las dimensiones en el módulo didáctico.

Imágenes a y b tomadas del catálogo del transformador de corriente propiedad de ABB ©.

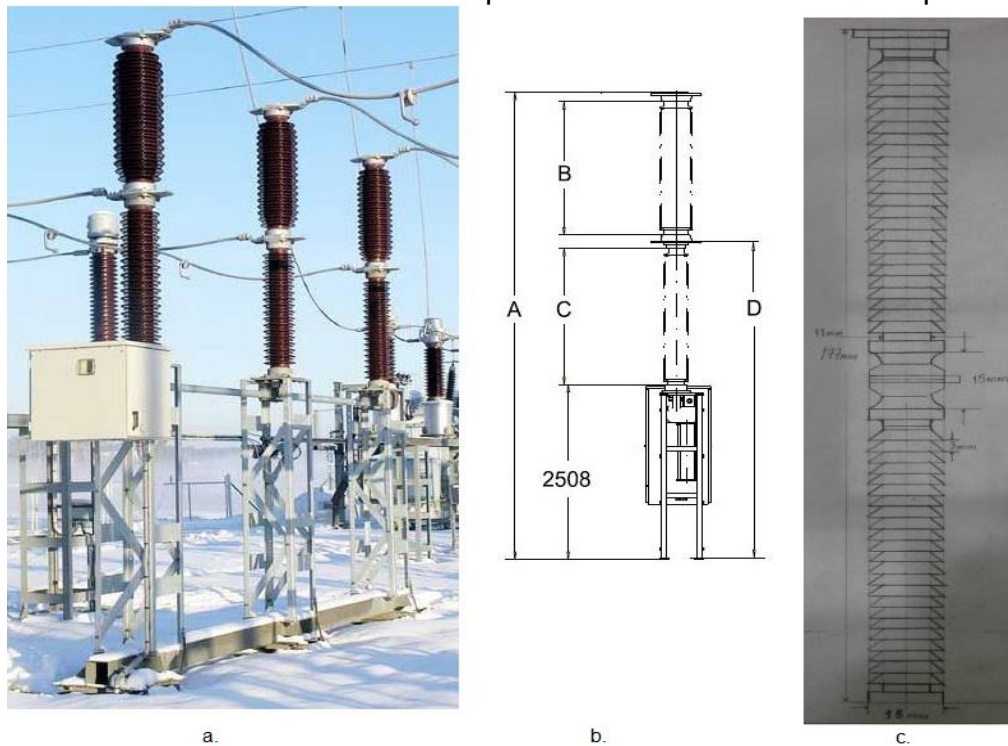
El transformador de corriente a diferencia del transformador de potencial tiene dos puntos de conexión, este análogamente al amperímetro se conecta en serie con la carga.

Interruptor.

Tabla 10. Dimensiones interruptor LTB E1.

Dimensions (mm)						
Rated voltage	A	B	C	D	E	F
72.5 kV	4790	1292	655	3244	1100	3590
170 kV	5400	1292	1265	3854	2500	6390
245 kV	6703	1914	1955	4544	3500	8390

Figura 10. Instrucciones de referencia para la construcción del interruptor LTB E1.



- Equipo real como se encontrará en una subestación eléctrica.
- Diagrama pictórico con el rotulado de las dimensiones de la Tabla 5.
- Diseño a escala con las dimensiones en el módulo didáctico.

Imágenes a y b tomadas del catálogo del interruptor de propiedad de ABB ©

El interruptor es el equipo principal de una subestación dado que es el elemento con la capacidad de interrumpir el flujo de la corriente eléctrica y el enlace magnético que esta genera, cabe mencionar que este modelo trabaja con corrientes superiores a 4000 Amperes [A] y la apertura por corto circuito con corrientes de 50 kA. (2).

Pararrayos.

Tabla 11. Dimensiones pararrayos PEXLIM P-X XV 245.

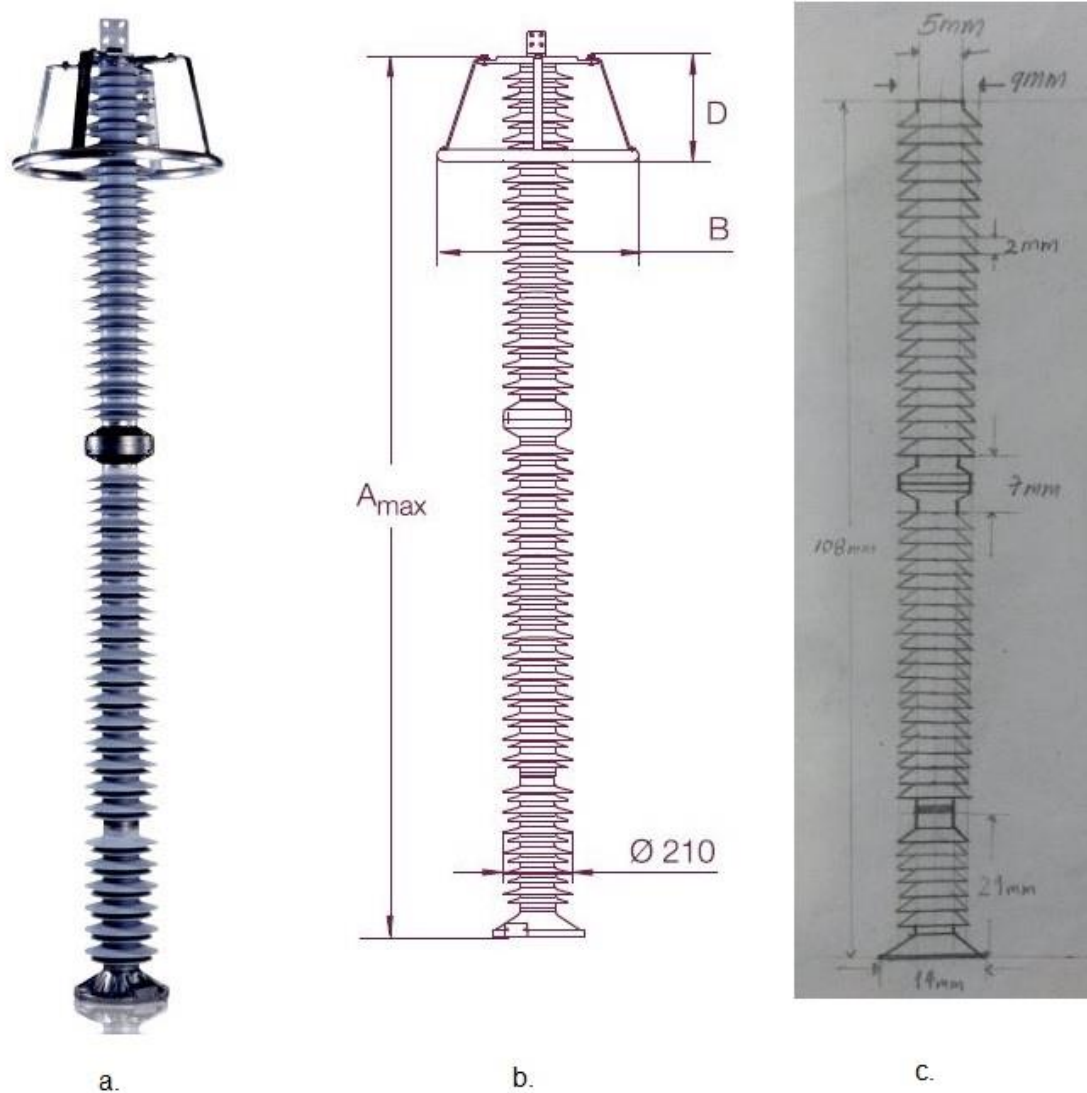
Max. system voltage U_m	Rated voltage U_r	Housing	Creepage distance	External insulation *)				Dimensions					
				1.2/50 μ s dry kV_{peak}	50 Hz wet (60s) kV_{rms}	60 Hz wet (10s) kV_{rms}	250/2500 μ s wet kV_{peak}	Mass kg	A_{max} mm	B mm	C mm	D mm	Fig.
245	180-192	XM245	5895	978	480	480	792	66	1744	400	-	160	3
	180-228	XH245	7250	1156	586	586	924	83	2088	400	-	160	3
	180-198	XV245	8613	1439	712	712	1166	101	2647	800	-	500	4
	210-228	XV245	8613	1439	712	712	1166	98	2617	600	-	300	4

Notas.

Esta tabla ha sido modificada de la original del catálogo del pararrayos en la página 51.

El recuadro en rojo representa las dimensiones asumidas para este módulo didáctico.

Figura 11. Instrucciones de referencia para la construcción del pararrayos.



- Equipo real como se encontrará en una subestación eléctrica.
- Diagrama pictórico con el rotulado de las dimensiones de la Tabla 6.
- Diseño a escala con las dimensiones en el módulo didáctico.

Imágenes a y b tomadas del catálogo del pararrayos de propiedad de ABB ©

Seccionador.

El seccionador aunque cumple una función similar al interruptor dado que impide el flujo de la corriente eléctrica tiene la cualidad de que en este si es posible visualizar la apertura mientras que en el interruptor se puede verificar solo por medio del sistema de control.

La selección del seccionador depende del esquema de maniobras a realizar. Se cuenta con diversos tipos constructivos de seccionadores, los principales utilizados en subestaciones son:

- **Seccionadores de doble apertura o rotación central.**
- **Seccionadores de apertura vertical.**
- **Seccionadores tipo pantógrafo o semipantógrafo.**

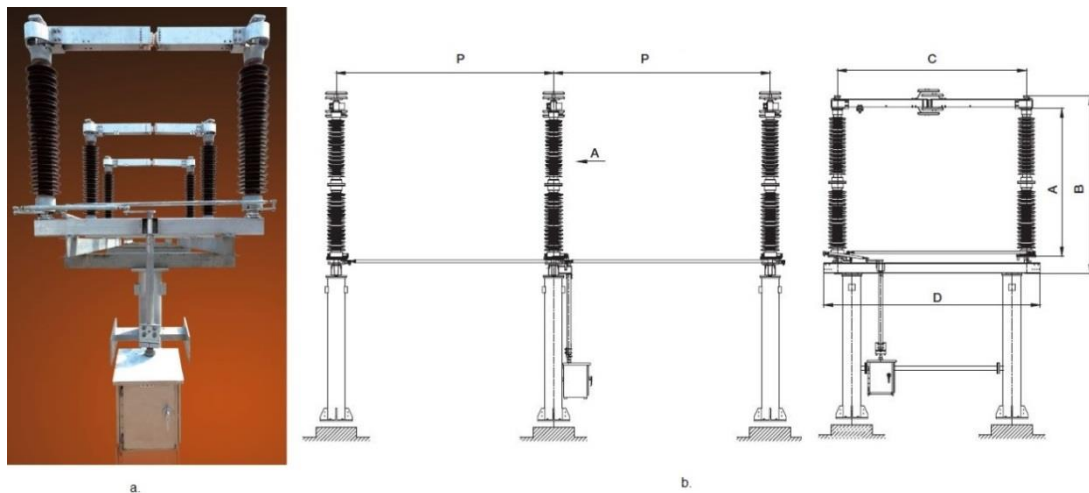
Para este módulo didáctico se seleccionó por practicidad el tipo doble apertura, eligiendo el modelo GW55 de la marca ABB.

Tabla 12. Dimensiones seccionador GW 55.

	Rated Voltage (kV)	Outline Dimensions (mm)					P
		A	B	C	D		
Center Break Disconnecter – GW55	72.5	770	1215	700	1060	Depend on the substation layout	
	123	1220	1635	1650	2100		
	145	1500	1915	1650	2100		
	245	2300	2785	2950	3380		

También hay que decir que el seccionador es el equipo que define el ancho de campo, dado que sus piezas móviles pueden estar energizadas y se deben cumplir las distancias de seguridad por coordinación de aislamiento, sobre esto se enfatizará más adelante.

Figura 12. Instrucciones de referencia para la construcción del seccionador.



- Equipo real como se encontrará en una subestación eléctrica.
- Diagrama pictórico del seccionador con las respectivas dimensiones.

Imágenes tomadas del catálogo del seccionador de propiedad de ABB ©.

En la figura 12. a. se puede observar que el rotulo P corresponde a la distancia entre aisladores y ésta en tabla 7 depende del ancho del campo.

Transformador de potencia.

Para diseñar este transformador se acudió al catálogo de un transformador elevador de 10 kV a 115kV. Dado que el nivel escogido para este diseño fue 230 kV, las dimensiones del mismo fueron modificadas en un 125%, es decir una medida en el catálogo de 1000 mm representa 1250 mm en nuestro diseño.

Figura 13. Transformador de potencia



Nota.

Transformador convencional para elevar el potencial utilizado en una planta de generación.

Figura 14. Vista lateral transformador de potencia

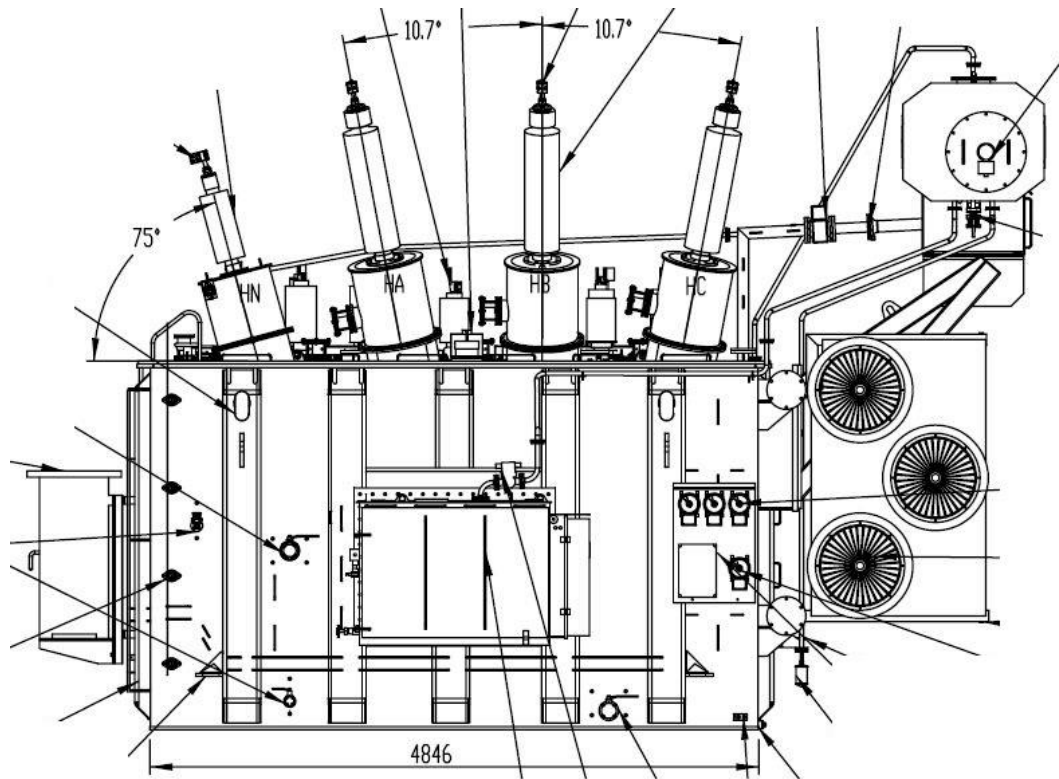
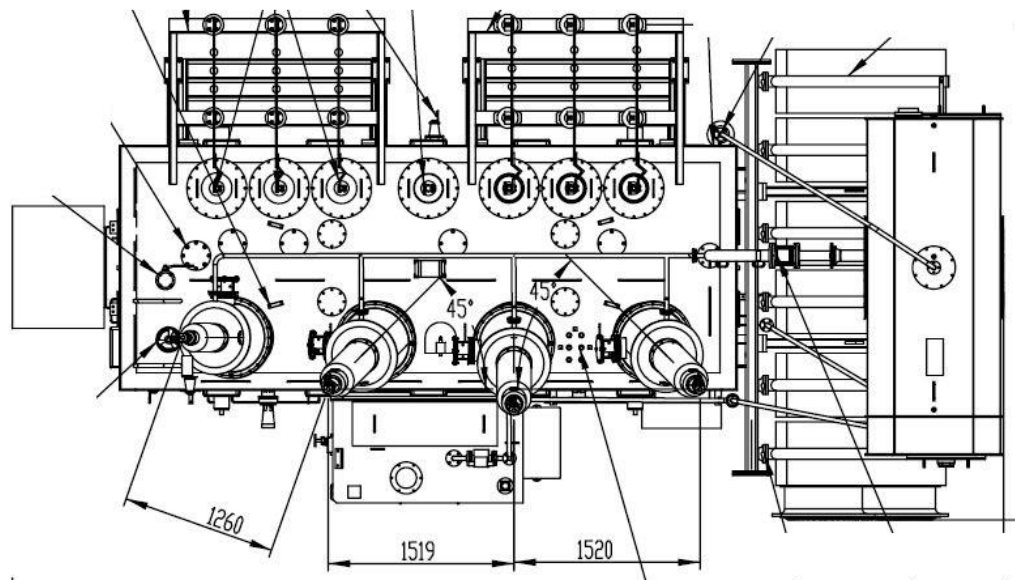


Figura 15. Vista superior del transformador de potencia.



Las figuras 13, 14 y 15 se tomaron del catálogo del transformador de potencia de propiedad de ABB ©.

Las figuras 14 y 15 muestran las distancias entre los puntos de conexión del transformador, como se puede observar la distancia entre HC y HB es de 1520 mm, esta distancia en este nivel de tensión cumple pero para un nivel de 230 kV no, es por esto que se aplica la corrección del 125 %, si aplicamos esta corrección al mayor valor que es 1520 mm el resultado es 1900 mm que es la distancia mínima permitida por coordinación de aislamiento para este nivel de tensión. Este último valor al igual que 1700 mm son valores fundamentales en este trabajo.

Pórticos, barrajes y aisladores de retención.

Como se mencionó en la tabla 2. Del literal 4 el diseño de estos se realizó para que cumplan con las distancias mínimas de seguridad y de aislamiento, para el caso de los barrajes se definió que la altura mínima fuera; la altura del seccionador más la distancia mínima de seguridad para este nivel de tensión entre partes energizadas, fase-fase o fase tierra. A su vez los pórticos tienen la altura de los barrajes más la distancia mínima de seguridad más el 15 % de esta por la catenaria de la línea.

7. EQUIPOS Y CONFIGURACIONES DEL MÓDULO DIDÁCTICO.

Figura 16. Transformador de potencial del módulo didáctico.



Figura 17. Transformador de corriente del módulo didáctico.



Figura 18. Interruptor del módulo didáctico.



Figura 19. Pararrayos del módulo didáctico.



Figura 20. Seccionador del módulo didáctico.

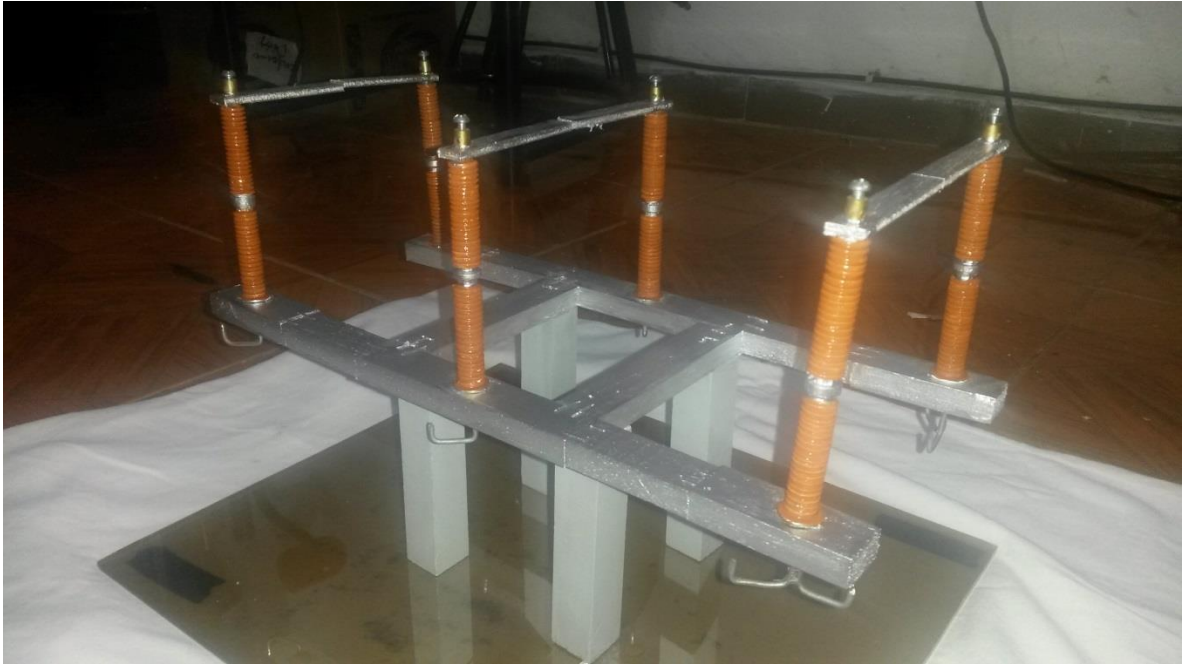


Figura 21. Transformador de potencia del módulo didáctico.



Figura 22. Barra sencilla con el material didáctico vista lateral.



Figura 23. Barra sencilla con el módulo didáctico vista superior.



Figura 24. Barra principal y barra de transferencia.



Figura 25. Barra principal y de transferencia vista superior.



Figura 26. Doble Barra.



Figura 27. Doble barra vista superior.



Figura 28. Doble barra más barra de transferencia.



Figura 29. Doble barra más barra de transferencia vista superior.



Figura 30. Anillo de tres salidas con el módulo didáctico.



Figura 31. Anillo de tres salidas.



Figura 32. Simulación de un operario de subestaciones al lado del interruptor.



En esta imagen se puede visualizar a un operario típico de 1.75 m de altura hasta la cabeza (CA) o con los brazos estirados (BE).

8. CONCLUSIONES.

- Se entrega un material didáctico de subestaciones eléctricas que permitirá al estudiante visualizar de manera tridimensional y a escala las diferentes configuraciones de subestaciones eléctricas más comunes.
- Se hace un aporte a la didáctica de la enseñanza de diseño de subestaciones eléctricas.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. **Ramirez, Carlos Felipe.** *Subestaciones de alta y extra alta tensión.* Cali : MEJÍA VILLEGAS SA, 2003. ISBN 958-33-5295-0.
2. **ABB.** *live tank circuit breakers.* [Documento] 5, Ludvika : High voltage products, 2009. 1HSM 9543 22-00en.
3. —. *Horizontal center break disconnecter type GW55, up to 245 kV.* [Documento] Beijing : High voltage switchgear, 2013. 1YVA000106.
4. —. *Transformadores de medida exteriores, guía para el comprador.* [Documento] 6.1, Ludvika : High Voltage products, 2011. 1HSM 9543 42-00es.
5. —. *High voltage surge arresters buyer's guide.* [Documento] 10, Ludvika : High voltage products, 2014. 1HSM 9543 12-00en.
6. —. *Data sheet transformer.* Hoang Hoa : ABB high voltage, 2007. 1ZVN460100-E.
7. —. *Horizontal center break disconnecter type GW55, up to 245 kV.* Beijing : ABB High Voltage Switchgear Co., Ltd Beijing, 2013. 1YVA000106.