



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Universidad de Cádiz
Facultad de Ingeniería
Escuela de Superior de Ingeniería

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y
VISTA GRÁFICA DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD
EN SUBESTACIÓN AISLADA EN AIRE, SEGÚN NORMA CEI 60071**

Stuardo Andrés López Méndez

Asesorado por: PhD. Higinio Sánchez Sáinz

PhD. Carlos Rioja del Río

e Ing. José Guillermo Bedoya

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ



FACULTAD DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y
VISTA GRÁFICA DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD
EN SUBESTACIÓN AISLADA EN AIRE, SEGÚN NORMA CEI 60071**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

STUARDO ANDRÉS LÓPEZ MÉNDEZ

ASESORADO POR EL PhD. HIGINIO SÁNCHEZ SÁINZ

PhD. CARLOS RIOJA DEL RIO

E ING. JOSE GUILLERMO BEDOYA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. José Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y VISTA GRÁFICA DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD EN SUBESTACIÓN AISLADA EN AIRE, SEGÚN NORMA CEI 60071

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha de agosto de 2013.



Stuardo Andrés López Méndez

Guatemala, 14 de agosto de 2014

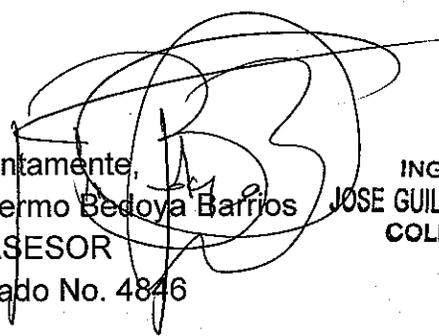
Ing. Francisco Javier González López
Coordinador de Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero González:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y VISTA GRÁFICA DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD EN SUBESTACIÓN AISLADA EN AIRE, SEGÚN NORMA CEI 60071”**, desarrollado por el estudiante Stuardo Andrés López Méndez con **carne No. 2007-14199**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,
Ing. Jose Guillermo Bedoya Barrios
ASESOR
Colegiado No. 4846



ING. ELECTRICISTA
JOSE GUILLERMO BEDOYA BARRIOS
COLEGIADO No. 4846



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 45.2014
Guatemala, 28 de AGOSTO 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y VISTA GRÁFICA DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD EN SUBESTACIÓN AISLADA EN AIRE, SEGÚN NORMA CEI 60071**, del estudiante **Stuardo Andrés López Méndez**, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑADA TODOS

Ing. **Francisco Javier González López**
Coordinador Área Potencia



SFO

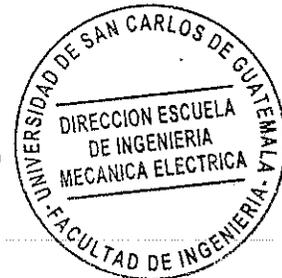


FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 45. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; STUARDO ANDRÉS LÓPEZ MÉNDEZ titulado: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y VISTA GRÁFICA DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD EN SUBESTACIÓN AISLADA EN AIRE, SEGÚN NORMA CEI 60071, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 24 DE SEPTIEMBRE 2014.



DTG. 604.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y VISTA GRÁFICA DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD EN SUBESTACIÓN AISLADA EN AIRE, SEGÚN NORMA CEI 60071**, presentado por el estudiante universitario **Stuardo Andrés López Méndez**, como parte de la política de Internacionalización y el Programa de Intercambio de Movilidad Académica de la Facultad de Ingeniería, con la Universidad de Cádiz, España y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Decano en Funciones

Guatemala, 6 de noviembre de 2014.

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser lo más importante en mi vida.
- Mi madre** Por ser el mejor regalo que Dios me dio y por enseñarme que los mejores hombres se forman en las peores adversidades y en que en la vida, debemos hacer la diferencia.
- Mi padre** Por ser el mejor ingeniero eléctrico que conozco e influenciarme para seguir esta carrera.
- Mi hijo** José Andrés López Ismatul, por ser la fuente de energía más grande, que mueve mi vida.
- Mi hermano** Kevin Roberto López, por enseñarme a través del ejemplo, la perseverancia.
- Mis hermanas** Emily Andrea y Hania Esther López Méndez, por enseñarme que en la vida no siempre necesitamos una mente brillante que nos hable, sino un corazón paciente que nos escuche.
- Mi cuñado** Estuardo Morales, por ser de gran ejemplo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la vida y oportunidad de todo.
Mi madre	Por trabajar constante y arduamente para que esto fuese posible.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de realizarme como profesional y ser mi alma máter.
Facultad de Ingeniería	Por ser el pilar de mis conocimientos y desarrollo profesional.
La Universidad de Cádiz	Por otorgarme la beca para desarrollar este trabajo de graduación en España, enriqueciendo mi vida, social, cultural y profesionalmente.
Mi asesores	Los doctores Carlos Rioja e Higinio Sánchez y el ingeniero José Bedoya, por su tiempo, dedicación y colaboración en el desarrollo de este trabajo de graduación.
Mis compañeros y amigos	Carlos Girón, Herber Corado, Werner Zepeda, Oscar Padilla y Erick Morales.
Ing. Manuel Lagos	Por darme trabajo y la oportunidad de estudiar.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. CONSIDERACIONES Y ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO DE SUBESTACIONES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Tensión asignada y tensión de servicio	1
1.3. Diseño de subestaciones.....	4
1.3.1. Generalidades	5
1.3.2. Procedimiento general de diseño	5
1.3.3. Procesos de ejecución.....	6
1.3.3.1. Estudios del sistema	7
1.3.3.2. Características generales del sitio	7
1.3.3.3. Estudios topográficos	7
1.3.3.4. Estudios geotécnicos	8
1.3.3.5. Estudios sísmicos	8
1.3.3.6. Aspectos ambientales.....	8
1.3.3.7. Urbanización y disposición física	8
1.3.3.8. Equipos de tensión	9
1.3.3.9. Equipos de transformación y compensación.....	9

1.3.3.10.	Equipos de media tensión	10
1.3.3.11.	Malla de tierra.....	10
1.3.3.12.	Sistema de protección y análisis de falla.....	11
1.3.3.13.	Sistemas de telecomunicaciones	11
1.3.3.14.	Cables de media y baja tensión	12
1.3.3.15.	Sistemas de automatización de la subestación	12
1.3.3.16.	Estructuras metálicas	12
1.3.3.17.	Diseños de obras civiles.....	12
1.3.4.	Recomendaciones y normas	13
2.	TIPOS DE CONFIGURACIÓN.....	15
2.1.	Configuraciones de conexión de barras, tendencia europea ..	15
2.1.1.	Barra sencilla.....	15
2.1.2.	Barra principal y barra de transferencia	16
2.1.3.	Doble barra.....	17
2.1.4.	Doble barra más seccionador de <i>bypass</i> o paso directo.....	18
2.1.5.	Doble barra más seccionador de transferencia	19
2.1.6.	Doble barra más barra de transferencia	20
2.2.	Configuraciones de conexión de interruptores, tendencia americana	21
2.2.1.	Anillo	21
2.2.2.	Interruptor y medio	22
2.2.3.	Doble barra con doble interruptor.....	23
2.2.4.	Anillo cruzado.....	24
3.	COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO.....	27

3.1.	Introducción	27
3.2.	Sobretensiones.....	27
3.2.1.	Tipos de sobretensiones.....	28
3.2.1.1.	Tensiones permanentes (frecuencia industrial)	28
3.2.1.2.	Sobretensiones temporales	29
3.2.1.3.	Sobretensiones de frente lento	29
3.2.1.4.	Sobretensiones de frente rápido	30
3.2.1.5.	Sobretensiones de frente muy rápido ..	30
3.3.	Niveles de aislamiento normalizados	30
3.4.	Condiciones atmosféricas de referencia normalizadas	33
3.5.	Coordinación de aislamiento	33
3.5.1.	Características de la rigidez del aislamiento.....	33
3.5.2.	Procedimientos para la coordinación de aislamiento.....	34
3.5.2.1.	Método determinista	35
3.5.2.2.	Método estadístico.....	36
3.6.	Contaminación.....	37
4.	DISTANCIAS MÍNIMAS EN EL AIRE Y DISTANCIAS DE SEGURIDAD	39
4.1.	Introducción	39
4.2.	Dimensionamiento de distancias mínimas en aire.....	39
4.3.	Distancia de seguridad	40
4.3.1.	Cálculo del valor básico	40
4.3.2.	Determinación de las zonas de seguridad.....	42
4.3.2.1.	Movimiento del personal	43
4.3.2.2.	Movimiento de vehículos	43

	4.3.2.3.	Trabajos sobre equipos o sobre conductores.....	44
4.4.		Distancias para el dimensionamiento de subestaciones.....	45
	4.4.1.	Primer nivel de barras	45
	4.4.2.	Segundo nivel de barras	46
	4.4.3.	Altura de líneas	47
	4.4.4.	Distancia de barras	48
	4.4.5.	Ancho de campo	49
	4.4.6.	Demarcación de las zonas	50
5.		DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE	51
	5.1.	Desarrollo de página principal.....	51
	5.2.	Desarrollo de plataforma de ingreso de datos.....	52
	5.3.	Desarrollo de plataforma de cálculos	55
	5.4.	Desarrollo de plataforma de planos.....	57
	5.5.	Impresión dentro del programa	59
	5.6.	Impresión dentro de AutoCAD	60
	5.7.	Resultado final	61
6.		MANUAL DEL SOFTWARE.....	63
	6.1.	Acceso	63
		6.1.1. Interna	63
		6.1.2. Externa	63
	6.2.	Instrucciones	63
		6.2.1. Página principal.....	64
		6.2.2. Parámetros de subestación.....	64
		6.2.3. Parámetros del sitio.....	65
		6.2.4. Datos generales (opcional).....	65
		6.2.5. Opciones	66

6.3.	Resumen de realización de los cálculos.....	66
6.4.	Tabla de resultados	67
6.5.	Descarga e impresión de planos	68
CONCLUSIONES		71
RECOMENDACIONES.....		73
BIBLIOGRAFÍA.....		75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Barra sencilla	16
2.	Barra principal y barra de transferencia	17
3.	Doble barra	18
4.	Doble barra más seccionador <i>bypass</i> o paso directo.....	19
5.	Doble barra más seccionador de transferencia.....	20
6.	Doble barra más barra de transferencia.....	21
7.	Anillo	22
8.	Interruptor y medio	23
9.	Doble barra con doble interruptor.....	24
10.	Anillo cruzado.....	25
11.	Dimensiones medias de un operador.....	42
12.	Mantenimiento de equipos	44
13.	Ancho de campo	49
14.	Captura de pantalla del código HTML.....	51
15.	Captura de pantalla de página principal.....	52
16.	Captura de pantalla del código HTML + JavaScript	53
17.	Captura de pantalla ingreso de datos	54
18.	Captura de pantalla del código PHP	55
19.	Captura de pantalla del código PHP + CSS.....	56
20.	Captura de pantalla del resultado (tabla I)	56
21.	Captura de pantalla del resultado (tabla II)	57
22.	Captura de pantalla del botón de descarga de planos	58
23.	Captura de pantalla del código HTML + PHP + CAD.....	58

24.	Captura de pantalla de descarga	59
25.	Captura de pantalla de impresión WampServer	59
26.	Captura de pantalla de impresión AutoCAD	60
27.	Captura de pantalla resultado final	61
28.	Vista principal	64
29.	Ingreso de datos	65
30.	Botones de acción	66
31.	Distancias en el aire (minúsculas)	67
32.	Distancias de seguridad.....	68
33.	Plano vista en corte	69
34.	Plano vista en planta.....	69
35.	Plano vista en 3D.....	70

TABLAS

I.	Tensiones para sistemas menores de 35 kV	2
II.	Tensiones para sistemas mayores de 35 kV	4
III.	Nivel de aislamiento normalizado	28
IV.	Niveles de aislamiento normalizados gama I	31
V.	Niveles de aislamiento normalizados gama II	32
VI.	Líneas de fuga recomendada	38

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Hz	Frecuencia de la red (Hertz)
Us	Máxima tensión de operación que se puede presentar durante operación normal
kV	Medida de voltaje (Kilovoltio)
Um	Valor eficaz más alto de la tensión fase-fase

GLOSARIO

Acople	Operación mediante la cual se enlazan los barrajes constitutivos de una subestación.
Aislamiento externo	Son las distancias en el aire y las superficies en contacto con aire del aislamiento sólido del equipo, que están sujetas a los esfuerzos dieléctricos y a los efectos atmosféricos y otras condiciones externas, tales como contaminación, humedad y demás.
Aislamiento interno	Son las partes internas sólidas, líquidas o gaseosas del aislamiento del equipo, las cuales están protegidas de los efectos atmosféricos y otras condiciones externas.
Barraje	Punto común de conexiones de los diferentes circuitos asociados a una subestación (nodo del sistema).
Confiabilidad	Se define como la probabilidad de que una subestación pueda suministrar energía durante un periodo de tiempo dado, bajo la condición de que al menos un componente de la subestación esté fuera de servicio.

Configuración	Ordenamiento dado a los equipos de maniobra de una subestación, que permite definir sus propiedades y características de operación.
Factor Kc	Es el factor con el cual se deberá multiplicar la sobretensión representativa para obtener el valor de la tensión de coordinación soportada.
Fase-fase	Es una configuración trifásica de aislamiento donde un terminal de fase no se considera. En casos particulares, las terminales de neutro y tierra tampoco son tomadas en cuenta.
Fase-tierra	Es una configuración de aislamiento trifásico en la cual dos terminales de fase no se consideran y, excepto en casos particulares, el terminal de neutro es aterrizado.
Flexibilidad	Propiedad de la instalación para acomodarse a las diferentes condiciones que se puedan presentar, especialmente por cambios operativos en el sistema y, además, por contingencias y/o mantenimiento del mismo.
Seguridad	Propiedad de una instalación de dar continuidad de servicio (suministro de energía) sin interrupción alguna durante fallas de los equipos de potencia.

RESUMEN

El diseño de las distancias mínimas en el aire y de seguridad en subestaciones eléctricas, necesita de un análisis y proceso de cálculos para garantizar el adecuado nivel de aislamiento, tomando en cuenta las condiciones atmosféricas prevalecientes en el sitio. Por lo cual el objetivo de realizar este trabajo de graduación fue desarrollar un software que pudiera ahorrar tiempo al ingeniero diseñador de subestaciones eléctricas aisladas en aire, que pudiera ser una herramienta para el uso didáctico al momento de estudiar cursos relacionados con el tema, para realizar capacitaciones eficientes al personal técnico y de mantenimiento. Además, que aportara profesionalismo a la hora de desarrollar, presentar y ofertar proyectos eléctricos de este tipo.

Se utilizaron plataformas de programación de última tecnología y código abierto, y herramientas de diseño asistido por computador para lograr estos objetivos. Para crear un software de alto desempeño de una forma gratuita para los estudiantes de la Universidad de San Carlos de Guatemala, alma máter y para la Universidad que otorgó la beca (Universidad de Cádiz) PIMA (Programa de Intercambio y Movilidad Académica) como agradecimiento por el enriquecimiento cultural, social y profesional.

Se desarrollaron y usaron técnicas de programación, investigación, documentación y pruebas, para poder realizar este software paralelamente con el trabajo de graduación. Este es un trabajo de 7 meses de dedicación, 742 horas de programación, 345 de documentación y 528 horas de diseño; de los cuales 2 fueron en Guatemala y 5 en España.

OBJETIVOS

General

Diseñar e implementar un software para el cálculo y vista gráfica de las distancias mínimas de seguridad en subestación aislada en aire, según norma CEI 60071

Específicos

1. Presentar las consideraciones y aspectos generales del diseño de subestaciones.
2. Dar a conocer las configuraciones y diferencias de las conexiones de barras tanto en tendencia europea como americana.
3. Presentar las consideraciones técnicas para la selección de los niveles de aislamiento y coordinación de aislamiento de las subestaciones.
4. Presentar el procedimiento de cálculo de las distancias mínimas en el aire y de seguridad para garantizar el adecuado nivel de aislamiento.
5. Implementar el software para el cálculo y vista gráfica de las distancias mínimas de seguridad en subestación aislada en aire.
6. Realizar un manual de usuario del software.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de graduación se desarrolla básicamente en seis capítulos, cuatro de ellos de índole eléctrica y dos de sistemas informáticos.

En el primer capítulo se detallan los aspectos generales de cualquier subestación aislada en aire y las consideraciones que deben tomarse a la hora de diseñar, tales como los procedimientos generales que deben llevarse a cabo para cuantificar de manera general una subestación, además de los estudios que deben realizarse para el desarrollo eficaz del proyecto. Se da un panorama general de los equipos que pueden instalarse en el sitio, tanto de transformación como de compensación. Al final se dan recomendaciones de otras normativas a tener en cuenta para el diseño de subestaciones, y metodología de selección de equipos.

En el segundo capítulo se tratarán las distintas configuraciones que pueden darse a la hora de diseñar en dos tendencias distintas: europea y americana.

La tendencia europea, también llamada conexión de barras, es aquella en la cual cada circuito tiene un interruptor, con la posibilidad de conectarse a una o más barras por medio de seccionadores.

Por otra parte, la tendencia americana, también llamada conexión de interruptores, es aquella en la cual los circuitos se conectan a las barras o entre ellas por medio de interruptores.

En el capítulo tres se describen las bases para seleccionar adecuadamente los niveles de aislamiento de cada parte de la subestación, basados en normas internacionales; norma CEI 60071-1 (términos, definiciones, principios y reglas), CEI 60071-2 (guía de aplicación) y la CEI 60694 (cláusulas comunes para los equipos de alta tensión).

En el capítulo cuatro se detallan ordenadamente las ecuaciones y parámetros que deben conocerse para determinar las distancias mínimas en el aire y las distancias de seguridad. Esto con el objetivo de garantizar el adecuado nivel de aislamiento, tomando en cuenta las condiciones atmosféricas que puedan prevalecer en el sitio de montaje. También se detallan los requerimientos de seguridad para la operación y mantenimiento de la instalación. Se realizaron gráficas (imágenes) para ilustrar estas distancias y comprenderlas fácilmente.

En el capítulo cinco se describen los pasos del desarrollo del software. Se explica en qué plataformas se programa, el código que se utiliza y la vista del usuario de cada parte del programa.

En el capítulo seis se incluye un pequeño manual del software, en donde se dan las instrucciones básicas del manejo del programa. Se incluyen gráficos de los botones para utilizar el programa ágilmente. Cabe mencionar que el programa se desarrolló de manera que fuera intuitivo, es decir, que se pueda utilizar sin instrucciones, ya que utiliza una plataforma en la cual no se necesita un conocimiento específico.

1. CONSIDERACIONES Y ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO DE SUBESTACIONES

1.1. Introducción

El objetivo de un sistema eléctrico de potencia es suministrar la energía eléctrica para el desarrollo de un país o un sector específico. Para ello es necesario generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica, realizando los cambios de niveles de tensión entre cada fase mencionada, para lo cual se utilizan las subestaciones eléctricas.

Una subestación eléctrica es una instalación destinada a modificar, transformar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica para mejorar y facilitar el transporte, la distribución y el consumo de la energía eléctrica, cumpliendo requisitos técnicos de calidad, confiabilidad, flexibilidad y eficiencia. En este capítulo se detallan a grandes rasgos las consideraciones para el diseño de subestaciones, así como los aspectos generales, logrando realizar un esquema rápido de los requisitos y parámetros iniciales para la elaboración del diseño completo.

1.2. Tensión asignada y tensión de servicio

La tensión de servicio en un sistema eléctrico no permanece constante; esta 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 según la norma CEl 60038:2009, como un valor aproximado adecuado de la tensión utilizada para designar o identificar un sistema, y la tensión de servicio en un punto cualquiera del sistema eléctrico corresponde al valor más alto de la tensión de funcionamiento de un sistema en condiciones normales, en cualquier momento y punto del sistema.

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 la que fue asignada al sistema, para la cual el equipo puede ser utilizado sin presentar fallas de aislamiento (valores normalizados en tablas I y II).

Las tensiones para un sistema trifásico de corriente alterna con una tensión nominal superior a 1 kV y que no supere los 35 kV, deberían elegirse entre los valores dados en la tabla I.

Tabla I. **Tensiones para sistemas menores de 35 kV**

SERIE I		SERIE II		
Tensión asignada [Kv]	Tensión máxima [Kv]	Tensión asignada [Kv]	Tensión máxima [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

Continuación de la tabla I.

-			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 0	-	-

Notas: la serie I es para 50 y 60 Hz; la serie II es para 60 Hz; los valores indicados 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.

Fuente: elaboración propia, con base en la Norma CEI 60038:2009.

Las tensiones para un sistema trifásico de corriente alterna con una tensión nominal superior a 35 kV y que no supere los 230 kV deberían elegirse entre los valores dados en la tabla II.

Tabla II. Tensiones para sistemas mayores de 35 kV

SERIE I - SERIE II		
Tensión asignada [kV]		Tensión máxima [kV]
45	-	52
66	69	72,5
110	115	123
	138	145
	-	170
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 fase; los valores en paréntesis no son comunes y no deben ser usados en sistemas nuevos.

^aValores no especificados por la norma.

Fuente: elaboración propia, con base en la Norma CEI 60038:2009.

1.3. Diseño de subestaciones

La base para desarrollar un proyecto de diseño de una subestación eléctrica son las normas vigentes, junto con los equipos y procedimientos de nuevas tecnologías, los requerimientos que establecen las compañías operadoras del sector eléctrico y las necesidades de energía (demanda) del usuario final en un sistema eléctrico.

1.3.1. Generalidades

La normativa mas considerada es la elaborada por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), misma que se toma como referencia y base para la documentación y el software; le sigue en importancia la norma del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI). Por lo cual para cada proyecto se debe considerar la normativa interna de las empresas que operan el sector eléctrico de cada país, todas servirán como documentos de consulta.

Para elaborar el proyecto final se establecen primeramente algunas alternativas respecto de posibles tipos y configuraciones de la subestación requerida, para que estas logren reducir al máximo la superficie de terreno a utilizar, que logren optimizar los criterios de seguridad y flexibilidad, y que posibiliten las maniobras de operación y mantenimiento del equipo por instalar. La empresa del sector eléctrico es la encargada de establecer el número de circuitos de transmisión, transformación, nivel de tensión de servicio asignado, la altura sobre el nivel del mar, el sitio de ubicación y el nivel requerido de aislamiento para los equipos.

1.3.2. Procedimiento general de diseño

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

- 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 y descargas atmosféricas
 - Estudios de suelos
 - Levantamiento topográfico
 - Plano general de ubicación
 - Resistividad del terreno
- Datos del sistema eléctrico:
 - Estudio de flujo de cargas 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.

1.3.3. Procesos de ejecución

Se presentan las diferentes actividades relacionadas con los diseños civiles, ambientales y electromecánicos de una subestación. El orden no representa una secuencia obligatoria de ejecución, ya que estas actividades de diseño pueden realizarse simultáneamente.

1.3.3.1. Estudios del sistema

Se realizan todos los estudios eléctricos que permiten definir los parámetros útiles para el diseño de la subestación. Se realizan con las condiciones estacionarias y transitorias del sistema de potencia. Con los datos de planeación y ubicación aproximada, además de su altura sobre el nivel del mar, se puede asignar el nivel de aislamiento de los equipos.

En esta actividad se determina los requerimientos técnicos o restricciones especiales, como niveles de tensión, tamaño de la subestación, número de circuitos y ampliaciones futuras, hasta llegar a la propuesta final del sitio recomendado. Luego de verificar las condiciones mínimas y evaluación ambiental en campo, se selecciona la mejor opción para la localizar la nueva subestación.

1.3.3.2. Características generales del sitio

Para obtener en detalle las características requeridas para realizar los respectivos diseños civiles y electromecánicos, se realiza una visita de reconocimiento y actividades de recopilación de información, tanto en el lugar como en las entidades públicas y privadas, ubicación y orientación de la subestación, establecimiento de los parámetros ambientales y meteorológicos, determinación y medida de la resistividad del terreno.

1.3.3.3. Estudios topográficos

Estos indican el levantamiento planimétrico y altimétrico del área del lote de la subestación, las coordenadas del punto de amarre respecto del sistema de información geográfica establecida para el sistema eléctrico.

1.3.3.4. Estudios geotécnicos

Un estudio geotécnico indica los criterios técnicos para la construcción de la obra en contacto con el suelo, para garantizar su comportamiento adecuado.

1.3.3.5. Estudios sísmicos

Los estudios permitirán conocer los efectos sísmicos para diseñar la obra civil y estructuras metálicas de la subestación. Se pueden utilizar catálogos sísmicos, de estar disponibles para el lugar deseado.

1.3.3.6. Aspectos ambientales

Se identifican y evalúan los impactos que podría causar una subestación en el entorno en cada una de sus etapas de construcción y operación, para cubrir la demanda cultural, política, económica, física y biótica. Se elaboran documentos de posibles escenarios, con los cuales se puede construir un documento ambiental, según la legislación vigente, en el sitio de instalación de la subestación.

1.3.3.7. Urbanización y disposición física

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, la zona para bodega y talleres, caseta de control, vías perimetrales, zonas de circulación y de acceso, zonas de parqueo, patio de transformadores y carrileras de acceso, las áreas de acceso de los circuitos de línea y las áreas para ampliaciones futuras de la subestación.

En este estudio se realiza la urbanización del predio y disposiciones físicas definitivas de los diferentes patios de conexión.

1.3.3.8. Equipos de tensión

Se realiza la selección y definición de los equipos de tensión y protección a instalar en la subestación, correspondiente a:

- Transformadores de corriente y tensión
- Seccionadores
- Seccionadores de puestas a tierra
- Interruptores automáticos
- Pararrayos para los sistemas
- Aisladores

1.3.3.9. Equipos de transformación y compensación

Se realiza la selección y definición de los equipos de transformación y compensación a instalar en la subestación, correspondiente a:

- Autotransformadores y transformadores
- Reactores de línea, terciario y neutro
- Baterías de condensadores
- Compensación serie
- Sistemas de compensación estática
- Transformadores zigzag de puesta a tierra

1.3.3.10. Equipos de media tensión

Bajo esta actividad se realizan la definición y especificación de los equipos de maniobra. Estos pueden diseñarse para instalación exterior o en celdas. Los equipos de media tensión son los siguientes:

- Celdas
- Interruptores automáticos; pueden ser extraíbles (celdas)
- Seccionadores de puesta a tierra
- Transformadores de tensión
- Pararrayos para el sistema
- Aisladores de soporte para el sistema
- Cables y terminales de media tensión

1.3.3.11. Malla de tierra

El cálculo del sistema de tierra y elaboración de planos correspondientes se realiza tomando en consideración la resistencia del suelo y urbanización del predio.

La función principal 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.

1.3.3.12. Sistema de protección y análisis de falla

En esta parte se seleccionan los sistemas de protección y se realizan análisis de falla que requiera el proyecto; se toma en cuenta si las líneas involucradas son nuevas o existentes, y su interacción con campos de subestaciones remotas, nuevas o existentes.

Para diseñar los sistemas de protección y registros de fallas se debe conocer la información de los tipos y cantidades de campo que conformarán la subestación y la longitud de las líneas, y si tendrán equipo de compensación reactiva en cualquiera de los dos extremos, además de requerir control de sobretensiones por disparo transferido, en caso sea necesario.

1.3.3.13. Sistemas de telecomunicaciones

La selección del sistema de telecomunicaciones debe ser la más apropiada para la intercomunicación de la subestación con otras subestaciones asociadas y con el centro de control del sistema eléctrico. 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 ondas portadoras por línea de potencia - PLP
- Estación satelital
- Red telefónica pública local - RTPL
- Red de radio móvil

1.3.3.14. Cables de media y baja tensión

Se determina el calibre de los cables aislados de media y baja tensión para los servicios auxiliares de equipos de patio, gabinetes y otros equipos, tanto en edificio como en casetas de control, así como la cantidad a utilizar.

1.3.3.15. Sistemas de automatización de la subestación

Esta actividad se refiere a la selección de los tipos de controladores que componen el sistema de automatización de la subestación y la señalización para cada tipo de controlador.

1.3.3.16. Estructuras metálicas

Se realizan los diseños de estructuras metálicas de soportes y pórticos de equipos para la subestación.

1.3.3.17. Diseños de obras civiles

Se deben diseñar las vías interiores y de acceso a la subestación, drenajes de aguas de lluvia, tipos y longitudes de cárcamos y ductos, ubicados en cajas de tiro, cerramiento, señalización interior, ubicación de las casetas para el sistema de transformadores y autotransformadores, reactores de línea, reactores de terciario, reactores neutro, carrileras y tanques separadores de aceite, muros cortafuego, alumbrado exterior tanto del alumbrado perimetral de seguridad como el del patio de equipos, y el alumbrado de las vías de acceso subestación.

1.3.4. Recomendaciones y normas

Para la elaboración de diseños y selección de equipos se considera la utilización de las normas establecidas por la compañía dueña de la instalación; dentro de las recomendaciones de la CEI, las siguientes son las más importantes en el área de subestaciones.

- CEI 60038 Tensiones asignadas
- CEI 60044 Transformadores de instrumentos
- CEI 60071 Coordinación de aislamiento
- CEI 60076 Transformadores de potencia
- CEI 60099 Pararrayos
- CEI 60114 Barraje de aluminio
- CEI 60255 Relés de protección
- CEI 60502 Cables de potencia XLPE (también CEI 60840)
- CEI 60517 Equipos encapsulados para tensiones superiores a 72.5 kV
- CEI 60815 Selección de aisladores
- CEI 60865 Cálculo de corrientes de cortocircuito
- CEI 61109 Aisladores compuestos
- CEI 62271-100 Interruptores
- CEI 62271-102 Seccionadores

En cuanto al diseño de la malla de tierra, la norma más utilizada es la IEEE Std 80; para el diseño de baterías la IEEE Std 450 y la IEEE Std 485; para el diseño sismorresistente la IEEE Std 693 y para el diseño de sistemas contra incendios la IEEE Std 979. Por otro lado, para el diseño de los conectores se emplea la norma NEMA CC 1.

2. TIPOS DE CONFIGURACIÓN

2.1. Configuraciones de conexión de barras, tendencia europea

A continuación se describen las diferentes configuraciones de conexión de barra, cómo están integradas a través de los circuitos, y sus ventajas y desventajas.

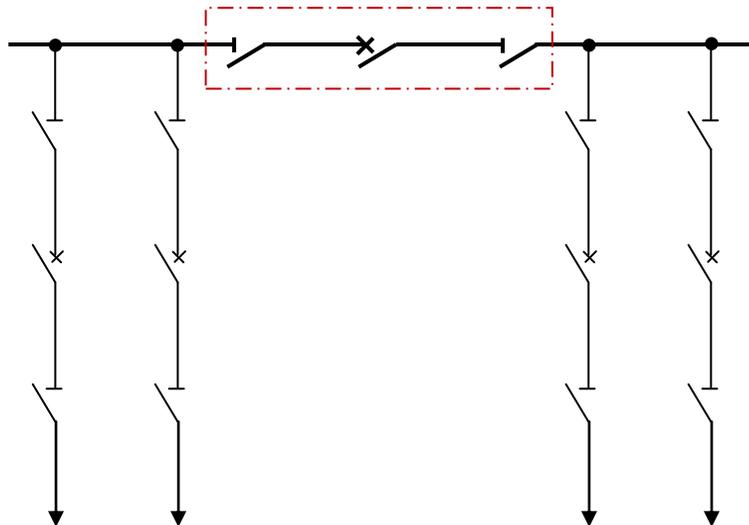
2.1.1. Barra sencilla

Esta configuración cuenta con un solo barraje colector al cual se deben conectar los circuitos por medio de un interruptor (figura 1). El flujo de energía se distribuye desde un solo barraje que une como mínimo dos campos o bahías.

Es económica, simple, fácil de proteger, ocupa poco espacio y no presenta muchas posibilidades de operación incorrecta.

La desventaja más grande es la falta de confiabilidad cuando se requiera hacer una revisión o reparación en la barra colectora, o del circuito cuando la revisión o reparación es en el interruptor. Las líneas discontinuas (color rojo) significan que es una parte opcional en el diseño.

Figura 1. Barra sencilla



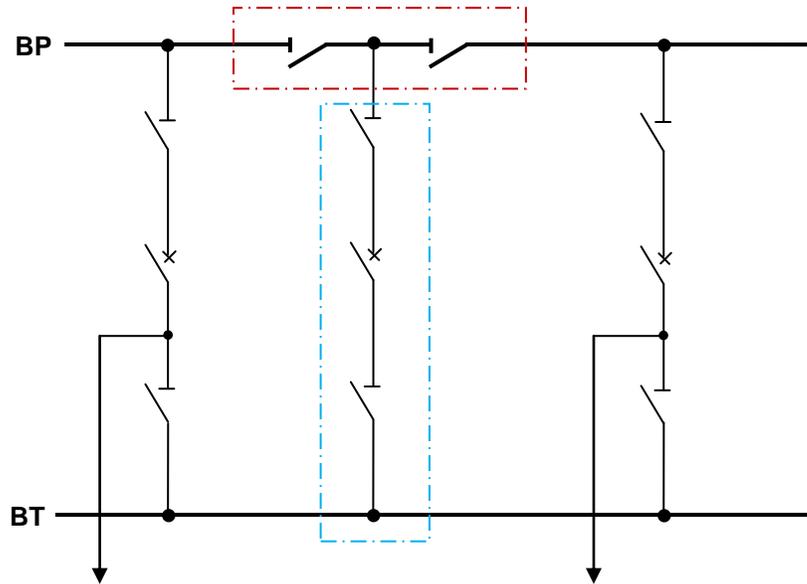
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

2.1.2. Barra principal y barra de transferencia

A la configuración barra sencilla se le puede mejorar la confiabilidad (falla en interruptores) agregando una barra auxiliar o de transferencia a cada circuito, un seccionador (de transferencia) para la conexión a dicha barra y un interruptor (de transferencia) para unir las dos barras, logrando así la configuración de barra principal (BP) y de transferencia (BT) (figura 2).

Esta configuración es económica a pesar de exigir un interruptor de transferencia. Las líneas discontinuas de color rojo señalan que es una parte opcional en el diseño, y las celestes señalan la transferencia.

Figura 2. Barra principal y barra de transferencia



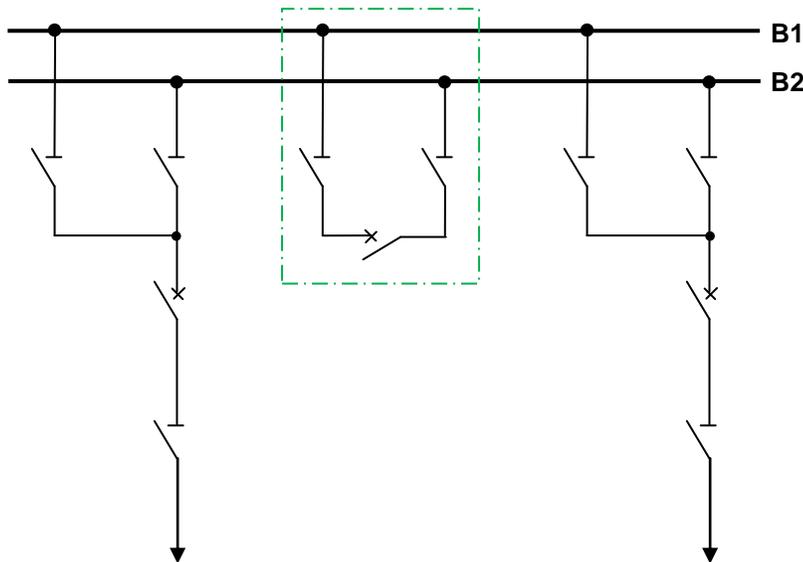
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

2.1.3. Doble barra

A la configuración barra sencilla se le puede aumentar la flexibilidad, adicionando una segunda barra principal y un interruptor para el acoplamiento de las dos barras; logrando así una configuración llamada de doble barra (B1 y B2, figura 3).

Esta configuración es flexible ya que permite separar circuitos en cada una de las barras, pudiéndose así dividir sistemas. Es posible hacer mantenimiento en barras sin suspender el servicio y por ello se usa en áreas de alta contaminación ambiental. Las líneas discontinuas de color verde señalan el acople del diseño.

Figura 3. Doble barra



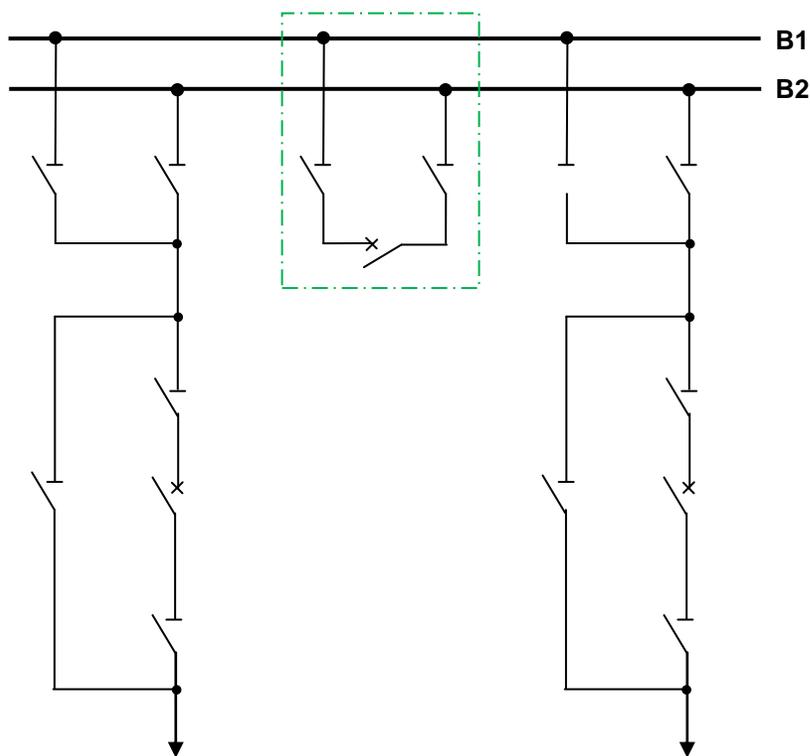
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

2.1.4. Doble barra más seccionador de *bypass* o paso directo

Esta configuración tiene las características de la barra principal y de transferencia, y la doble barra (B1 y B2). Se realiza partiendo de la doble barra al conectar un seccionador de *bypass* (paso directo) al interruptor de cada salida y adicionando otro seccionador adyacente al interruptor para poder aislarlo (figura 4).

En esta configuración se requiere un mayor número de equipos por campo, conllevando a una elevada posibilidad de operación incorrecta durante las maniobras. No se le explota su flexibilidad, pues se usa una de las barras como simple barra de reserva y/o transferencia, no compensándose así la alta inversión que ella implica. Las líneas discontinuas de color verde señalan el acople del diseño.

Figura 4. **Doble barra más seccionador *bypass* o paso directo**

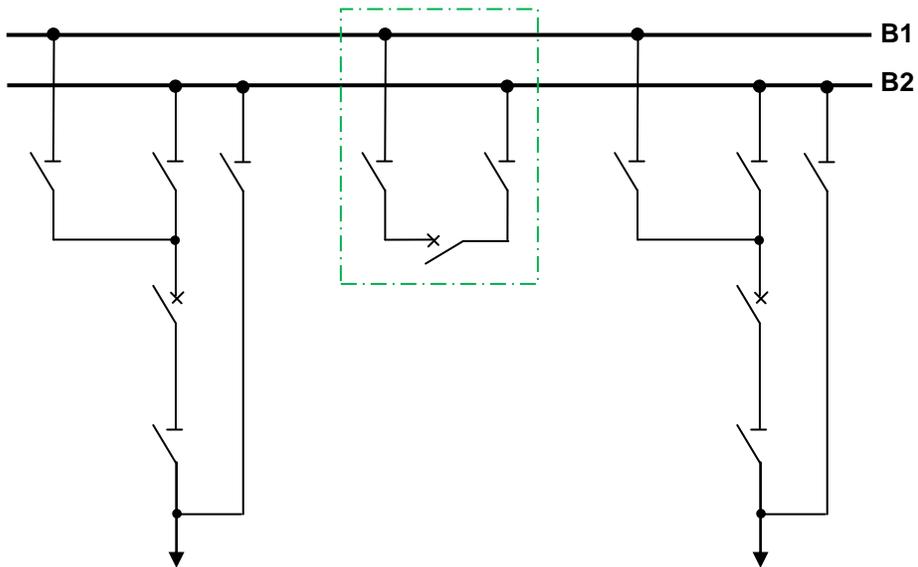


Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

2.1.5. **Doble barra más seccionador de transferencia**

Esta configuración de barras está relacionada con la anterior (figura 4) con algunas variantes, utilizando un seccionador menos (figura 5). Para lograr esta configuración de manera práctica se requiere la utilización de seccionadores tipo pantógrafo o semipantógrafo (la conexión o desconexión se realiza verticalmente) o seccionadores instalados en los pórticos de la subestación, como mínimo en una de las conexiones a las barras. Tiene las mismas características generales de la doble barra (B1 y B2) con seccionador de *bypass*. Las líneas discontinuas de color verde señalan el acople del diseño.

Figura 5. **Doble barra más seccionador de transferencia**



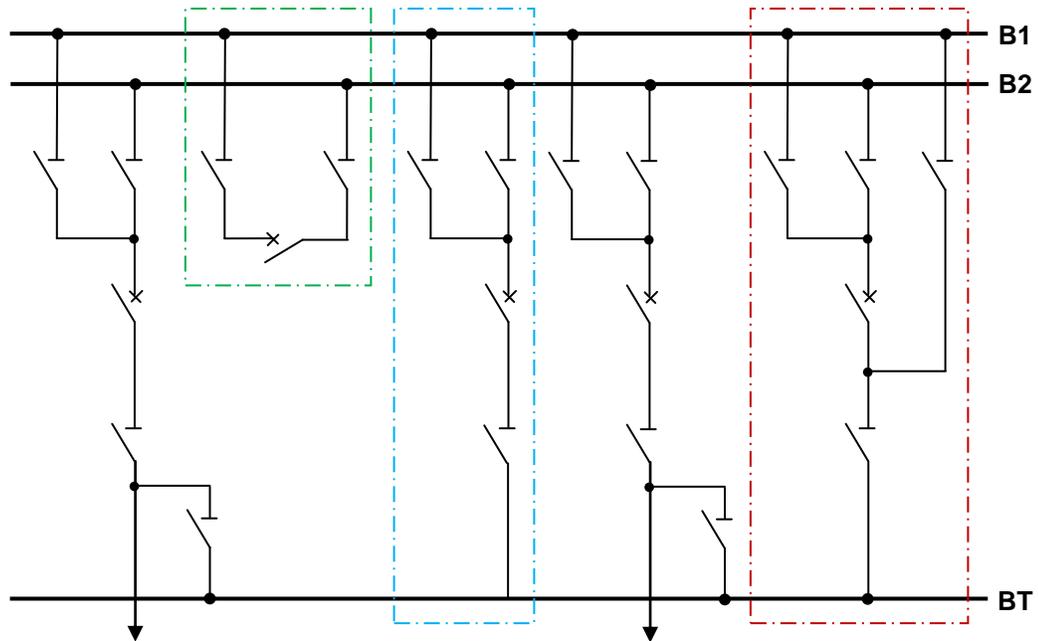
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

2.1.6. **Doble barra más barra de transferencia**

Esta configuración es una combinación de la barra principal y de transferencia y la doble barra (B1 y B2), ya que tiene dos barras principales más una de transferencia (BT), resultando en un arreglo que brinda simultáneamente confiabilidad y flexibilidad (figura 6).

Las líneas discontinuas de color rojo marcan un acople y transferencia (alternativa); las celestes señalan la transferencia y las verdes el acople.

Figura 6. **Doble barra más barra de transferencia**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

2.2. Configuraciones de conexión de interruptores, tendencia americana

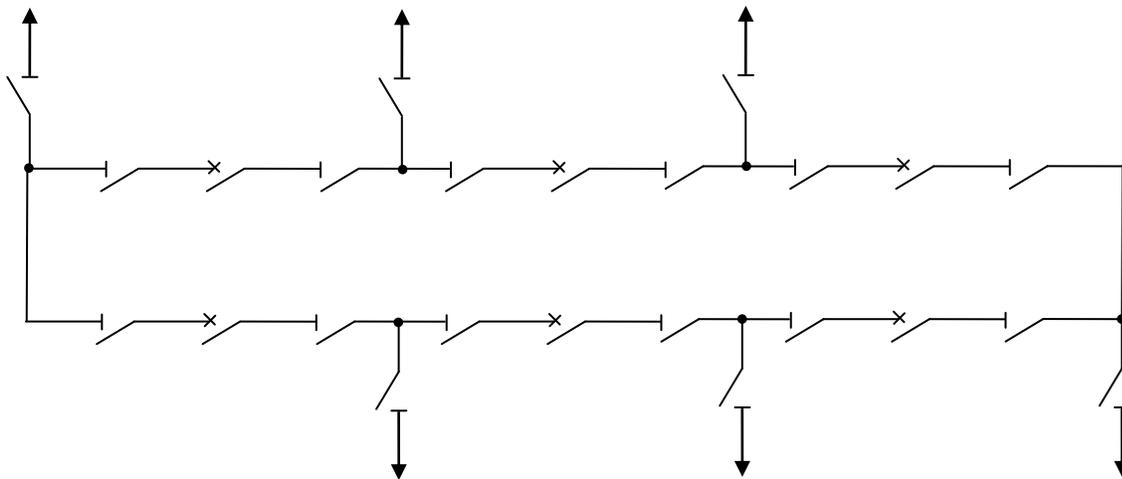
En la conexión de interruptores de esta tendencia, intervienen diversos elementos que permiten variedad de configuraciones, las cuales se enlistan a continuación.

2.2.1. Anillo

En la configuración anillo no existe una barra colectora, la conexión de los circuitos se realiza en un anillo conformado por interruptores, con los circuitos conectados entre cada dos de ellos (figura 7).

Cuando se requiere aislar un circuito, se aperturan los dos interruptores correspondientes, abriéndose así el anillo.

Figura 7. **Anillo**



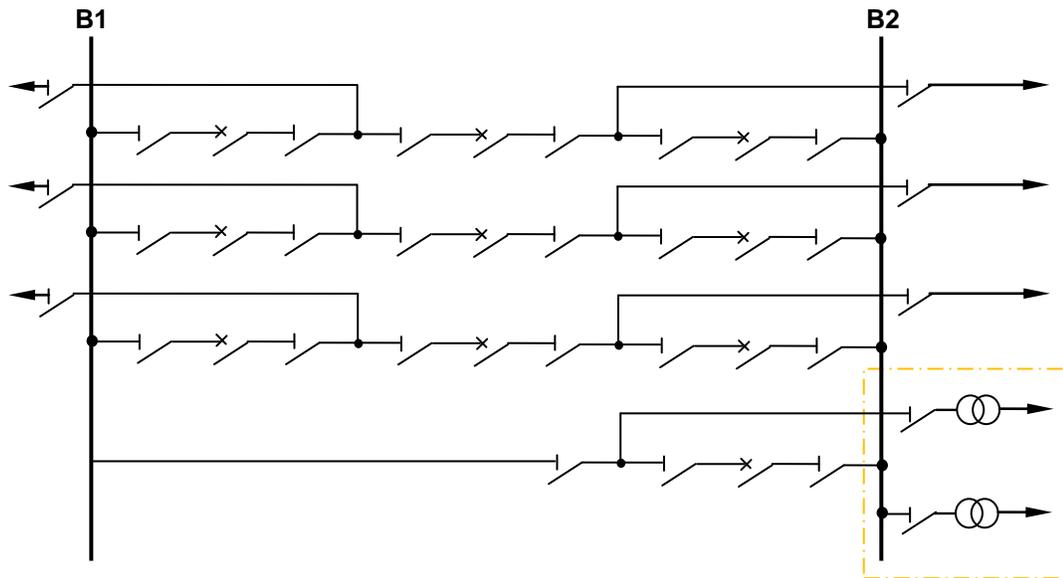
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Cuando se quiere aislar un circuito por un largo período, se abre el seccionador de conexión para poder cerrar los interruptores asociados a dicho circuito y así dar continuidad al anillo. Es una configuración económica, segura, y confiable, pero carece de flexibilidad.

2.2.2. **Interruptor y medio**

Esta configuración debe su nombre al hecho de exigir tres interruptores por cada dos salidas (figura 8). Un grupo de tres interruptores, llamado diámetro (bahía, en los Estados Unidos de América), se conecta entre los dos barrajes principales (B1 y B2). Las líneas discontinuas de color anaranjado señalan la conexión del transformador directamente a barras.

Figura 8. Interruptor y medio



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

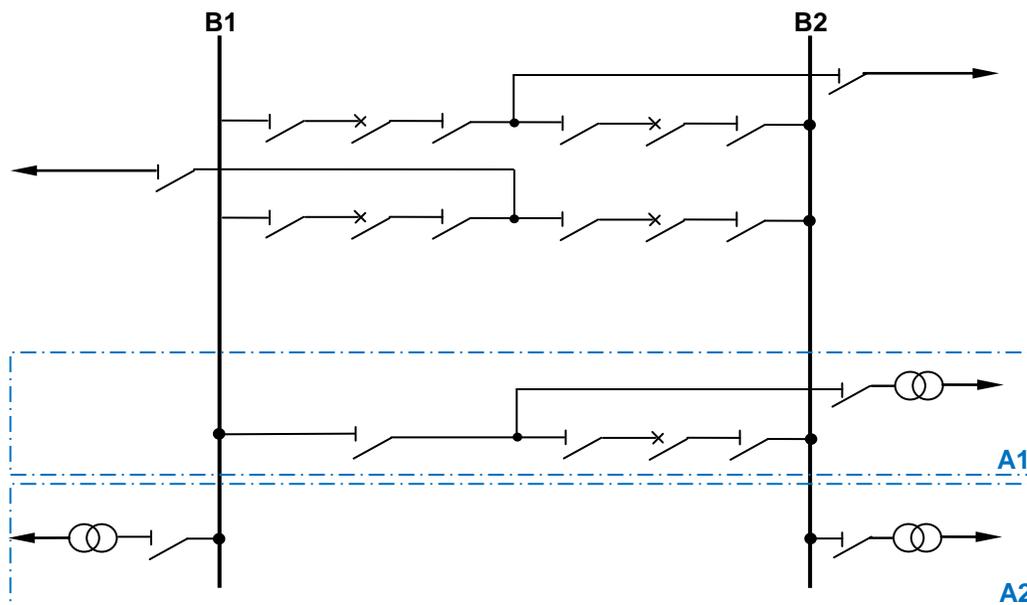
2.2.3. Doble barra con doble interruptor

En esta configuración se duplican las barras y los interruptores de cada circuito (figura 9). Presenta mayor seguridad, tanto por falla en barras como en interruptores, entre todas las configuraciones y gran libertad para operación, para trabajos de revisión y mantenimiento.

Para lograr la mayor seguridad, cada circuito se conecta a ambas barras, es decir que la aplicación normal es con todos los interruptores cerrados y las dos barras energizadas. Es la más costosa de todas las configuraciones a expensas de su seguridad desde el punto de vista del suministro, por lo cual su adopción en un caso particular requiere una justificación cuidadosa.

Las líneas discontinuas de color azul señalan las dos alternativas, la primera con campo de transferencia (A1) y la segunda con conexión de transformadores a barras (A2).

Figura 9. **Doble barra con doble interruptor**

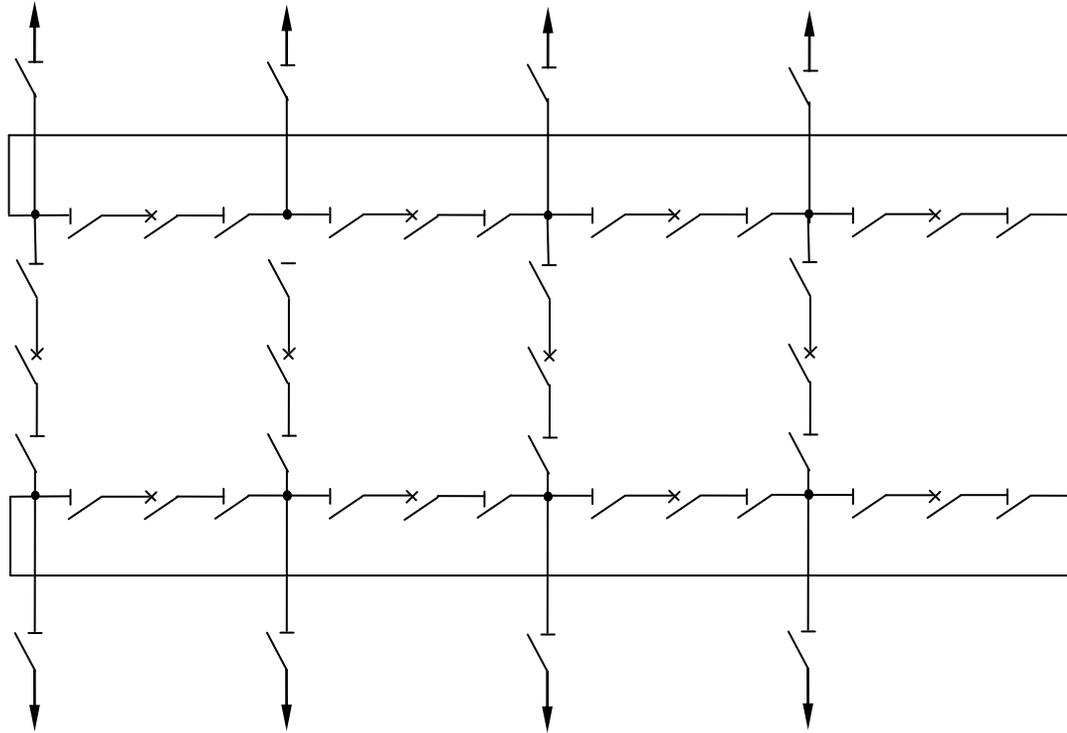


Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

2.2.4. Anillo cruzado

Las configuraciones de conexión de interruptores han probado tener mayor confiabilidad que las configuraciones de conexión de barras, ya que cada circuito de salida está conectado al resto de la instalación por dos interruptores en paralelo. La disponibilidad de cada circuito puede ser incrementada usando tres interruptores en paralelo en lugar de dos. Esto puede ser ejecutado de muchas formas, siendo la más factible de lograr desde el punto de vista práctico, la configuración en anillo cruzado (figura 10).

Figura 10. **Anillo cruzado**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

3. COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

3.1. Introducción

En este capítulo se describen las bases generales de la Norma CEI 60071, las principales definiciones, principios y reglas. Esta norma aplica a redes de corriente alterna trifásicas con tensión mayor del material a mil voltios (1 kV). Se especifica el procedimiento de selección de las tensiones soportadas asignadas para aislamiento entre fases, de fase a tierra y longitudinal, de los materiales e instalaciones de estas redes. También facilita la relación de valores de tensiones soportadas normalizadas, de entre los que deberían seleccionarse los de las tensiones soportadas asignadas.

Esta norma recomienda que las tensiones soportadas elegidas debieran ser asociadas con la tensión más elevada del material. Esta asociación es únicamente a efectos de la coordinación de aislamiento. No se cubren en esta norma, los requisitos relativos a la seguridad humana.

3.2. Sobretensiones

La norma CEI 60071-1 clasifica los esfuerzos a los cuales serán sometidos los equipos por parámetros apropiados, tales como la duración de las tensiones a frecuencia industrial o la forma de onda de una sobretensión, en función de su efecto sobre el aislamiento o sobre el equipo de protección. Estos esfuerzos, clasificados de esta manera, tienen diferentes orígenes (ver tabla III).

Tabla III. Nivel de aislamiento normalizado

Tipo	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gamas de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_t \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de tensión normalizadas	 $f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Ensayo de tensión soportada normalizada	a	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	a

^a A especificar por los comités de producto correspondientes.

Fuente: Norma CEI 60071-1:2006. p. 19.

3.2.1. Tipos de sobretensiones

Es necesario conocer los diferentes tipos de tensiones que intervienen en los diversos sistemas, los cuales se definen a continuación.

3.2.1.1. Tensiones permanentes (frecuencia industrial)

Bajo condiciones normales de explotación, la tensión a frecuencia industrial puede ser susceptible a una variación en magnitud y diferir de un punto del sistema a otro.

Con propósitos de diseño y coordinación de aislamiento, la tensión permanente representativa a frecuencia industrial será, sin embargo, considerada como constante, e igual a la tensión más alta del sistema; en la práctica, hasta 72.5 kV. La tensión más alta del sistema U_s debe ser bastante menor que la tensión más elevada para el material U_m , pero a medida que la tensión aumenta, ambos valores tienden a ser iguales.

3.2.1.2. Sobretensiones temporales

Las sobretensiones temporales se caracterizan por sus amplitudes, su forma de onda y duración. Todos los parámetros dependen del origen de las sobretensiones y las amplitudes y las formas de onda pueden incluso variar durante la duración de la sobretensión.

Para propósitos de coordinación de aislamiento, se considera que la sobretensión temporal representativa tiene la forma de onda de la tensión de corta duración normalizada a frecuencia industrial (1 minuto). Su amplitud se define por un valor (el máximo previsto), un conjunto de valores de cresta, o una distribución estadística completa de valores de cresta.

3.2.1.3. Sobretensiones de frente lento

Las sobretensiones de frente lento tienen duraciones de algunas decenas a algunos miles de microsegundos, duraciones de la cola del mismo orden de magnitud, y son de naturaleza oscilatoria. Generalmente producidos por, energización de líneas y su reenganche, pérdidas de carga y descargas de rayos distantes a los conductores de líneas aéreas.

3.2.1.4. Sobretensiones de frente rápido

Las sobretensiones de rayo están causadas por descargas directas a los conductores de fase o por cebados inversos o están inducidas por descargas de rayo cercanas a la línea. Las ondas de rayo inducidas, generalmente producen sobretensiones inferiores a 400 kV en la línea aérea y son, por consiguiente solamente importantes, en sistemas de la gama inferior de tensión.

3.2.1.5. Sobretensiones de frente muy rápido

Las sobretensiones de frente muy rápido se originan en maniobras de seccionadores o en defectos internos de GIS, debido al rápido cebado de los electrodos en gas y la escasa atenuación a la propagación de frentes dentro del GIS. La forma de onda de la sobretensión se caracteriza por un rápido incremento de la tensión, próxima a su valor de cresta, resultando en un tiempo de frente por debajo de 0.1 μ s.

3.3. Niveles de aislamiento normalizados

La relación entre las tensiones soportadas asignadas normalizadas y la tensión más elevada para los materiales, ha sido normalizada para beneficiarse de la experiencia adquirida por la operación de redes diseñadas según normas CEI y para favorecer la normalización. Las tensiones soportadas, asignadas y normalizadas, se relacionan con las tensiones más elevadas del material según la tabla IV para la gama I ($1 \text{ kV} < U_m < 245 \text{ kV}$) y la tabla V para la gama II ($U_m > 245 \text{ kV}$); presentadas en el presente capítulo. Estas tensiones soportadas, asignadas y normalizadas, son válidas para condiciones ambientales normales y se ajustan a las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas.

Tabla IV. Niveles de aislamiento normalizados gama I

Tensión más elevada del material (Um) [KV]	Tensión soportada asignada normalizada a frecuencia industrial [KV]	Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo [KV]
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5 ^a	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52 ^a	95	250
72,5	140	325
100 ^b	150	380
	185	450
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170 ^a	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

Nota: si los valores entre paréntesis se consideran insuficientes para demostrar el cumplimiento de las tensiones soportadas requeridas entre fases, se necesitan ensayos adicionales.

^a Estos Um no son valores preferenciales en la Norma CEI 60038 y por lo tanto no se dan estas combinaciones normalizadas muy frecuentemente en las normas de producto.

^b Estos valores de Um no se mencionan en la Norma CEI 60038, por eso se han incluido en la gama I en ciertas normas de producto.

Fuente: elaboración propia, con base en la Norma CEI 60071-2:1997.

Tabla V. Niveles de aislamiento normalizados gama II

Tensión más elevada del material (Um) [kV]	Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo maniobra			Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo ^b [kV]
	Aislamiento longitudinal ^a [kV]	Fase a tierra [kV]	Fase-fase	
300 ^c	750	750	1,5	850
				950
	750	850	1,5	950
				1050
362	850	850	1,5	950
				1050
	850	950	1,5	1050
				1175
420	850	850	1,6	1050
				1175
	950	950	1,5	1175
				1300
	950	1050	1,5	1300
				1425
550	950	950	1,7	1175
				1300
	950	1050	1,6	1300
				1425
	950/1050	1175	1,5	1425
				1550
800	1175	1300	1,7	1675
				1800
	1175	1425	1,7	1800
				1950
	1175/1300	1550	1,6	1950
				2100

Nota: la introducción de Um por encima de 800 kV está en estudio.
^aValor de la componente del impulso de la prueba combinada pertinente.
^b Estos valores se aplican de igual forma a aislamiento fase-tierra y fase-fase; para el aislamiento longitudinal se aplica como la componente a impulso tipo rayo, asignada y normalizada de la tensión soportada asignada normalizada combinada, mientras que el valor de cresta de la componente a frecuencia industrial opuesta es $0.7 \times Um \times \sqrt{2/\sqrt{3}}$.
^cEsta Um no es un valor preferencial en la Norma CEI 60038.

Fuente: elaboración propia, con base en la Norma CEI 60071-2:1997.

3.4. Condiciones atmosféricas de referencia normalizadas

Las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas, para las que se aplican las tensiones soportadas normalizadas son:

- Temperatura $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Presión $b_0 = 101.3 \text{ kPa}$ (760 mm de Hg)
- Humedad absoluta $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

3.5. Coordinación de aislamiento

En todos los materiales, la conducción se produce a causa de la migración de partículas cargadas. Los conductores tienen un número de electrones relativamente libres, que se deslizan con la aplicación de campo eléctrico, mientras que los aislantes tienen muy pocos electrones libres.

3.5.1. Características de la rigidez del aislamiento

Cuando el esfuerzo eléctrico en un aislante se incrementa a un nivel suficientemente alto, la resistividad a lo largo de un camino a través del aislamiento cambiará de un valor alto a un valor comparable al de un conductor. A este cambio se le llama descarga disruptiva. Las descargas disruptivas tienen lugar en tres etapas principales:

- La ionización inicial en un punto o puntos
- El crecimiento de un canal ionizado a través de un intervalo
- El salto en el intervalo y la transición a una descarga automantenida

Un número de factores influencia la soportabilidad del aislamiento, tales factores incluyen:

- La magnitud, forma, duración y polaridad de la tensión aplicada
- La distribución de campo eléctrico en el aislamiento
- El tipo de aislamiento
- El estado físico del aislamiento
- La deformación del aislamiento

La descarga disruptiva en aire depende en gran medida de la configuración del intervalo y de la polaridad y forma de onda del esfuerzo de tensión aplicado. Además, las condiciones relativas atmosféricas condicionan la descarga disruptiva al margen de la forma y polaridad del esfuerzo aplicado.

3.5.2. Procedimientos para la coordinación de aislamiento

La determinación de las tensiones soportadas de coordinación consiste en determinar los valores más bajos de tensiones soportadas del aislamiento, que cumple el criterio de comportamiento cuando se le somete a las sobretensiones representativas en condiciones de servicio.

Están en uso dos métodos para la coordinación del aislamiento a los transitorios de sobretensión: un método determinista y otro estadístico. Sin embargo, muchos de los procedimientos aplicados son una mezcla de ambos. Por ejemplo, algunos factores empleados en el método determinista, han sido deducidos de consideraciones estadísticas o algunas variaciones estadísticas han sido despreciadas en los métodos estadísticos.

3.5.2.1. Método determinista

El método determinista se aplica normalmente cuando no se dispone de información obtenida de ensayos, de las posibles tasas de fallos del equipo que pueden esperarse en servicio. Con el método determinista:

- Cuando el aislamiento se caracteriza por su tensión soportada convencional prevista ($P_w = 100\%$), el valor de soportabilidad (rigidez) se selecciona igual a la tensión soportada de coordinación, obtenida multiplicando la sobretensión representativa (un máximo previsto) por un factor de coordinación K_c , que tiene en cuenta los efectos de las incertidumbres en las hipótesis para estos dos valores (la tensión soportada prevista y la sobretensión representativa);
- Cuando, del mismo modo que para aislamiento externo, el aislamiento se caracteriza por la tensión soportada estadística ($P_w = 90\%$), K_c debe tener en cuenta también la diferencia entre esta tensión y la soportada prevista.

Con este método, no se hace referencia a las tasas de fallo posibles del equipo en servicio. Ejemplos típicos son:

- Coordinación de aislamientos internos contra sobretensiones de frente lento, cuando el aislamiento está protegido por pararrayos.
- Protección con pararrayos contra sobretensiones causadas por rayo en equipos conectados a líneas aéreas, para los que se dispone de experiencia con equipos similares.

3.5.2.2. Método estadístico

El método estadístico se basa en la frecuencia de ocurrencia de un origen específico, la distribución de probabilidad de sobretensión relativa a este origen y la probabilidad de descarga del aislamiento. Alternativamente, el riesgo de fallo puede ser determinado combinando sobretensión y cálculos de probabilidad de descarga simultáneamente y descarga por descarga, tomando en consideración la naturaleza estadística de las sobretensiones y descargas por procedimientos adecuados, por ejemplo, empleando los métodos de Monte Carlo.

Por repetición de los cálculos para distintos tipos de aislamientos y para diferentes estados de la red, puede obtenerse la proporción de fallos totales (tasas de indisponibilidad) del sistema debido a fallos del aislamiento. Por tanto, la aplicación de la coordinación estadística del aislamiento aporta la posibilidad de estimar directamente la frecuencia de fallo como función de los factores seleccionados en el diseño del sistema.

En principio, incluso la optimización del aislamiento sería posible, si los costes de los cortes pudieran relacionarse con los distintos tipos de fallos. En la práctica, esto es muy difícil debido a la dificultad de evaluar las consecuencias de fallos uniformes del aislamiento en los distintos estados operativos de la red y debido a la incertidumbre del coste de la energía no suministrada. Por lo tanto, usualmente, es mejor sobredimensionar ligeramente el aislamiento del sistema en lugar de optimizarlo.

El diseño del aislamiento del sistema está basado en la comparación de riesgos, correspondiente a las diferentes alternativas de diseño.

3.6. Contaminación

Cuando está presente la contaminación, la respuesta del aislamiento externo a las tensiones a frecuencia industrial, cobra importancia y puede dictar el diseño del aislamiento externo.

El contorno del aislamiento ocurre generalmente cuando la superficie está contaminada y se humedece debido a llovizna, nieve, rocío o niebla sin efecto de lavado significativo.

Con el propósito de normalizar, la Norma CEI 60071-2 especifica cuatro niveles cualitativos de contaminación, dando una descripción para cada uno, en relación con algunos ambientes correspondientes típicos, en donde los aisladores deben soportar la tensión más elevada de la red en condiciones de contaminación, continuamente, con un riesgo aceptable de contorno. Se incluye la tabla para poder visualizarlos:

Tabla VI. Líneas de fuga recomendada

Nivel	Ejemplos de entornos típicos	Línea de fuga específica nominal mínima (mm/kV) ^a
I Ligero	-Zonas sin industrias y con baja densidad de viviendas	16
	-Zonas con baja densidad de industrias o viviendas, pero sometidas a viento o lluvias frecuentes	
	-Zonas agrícolas montañosas	
	Estas zonas están situadas al menos de 10 km a 20 km del mar y sin vientos directos desde el mar.	
II Medio	-Zonas con industrias que no producen humo, especialmente contaminante y/o con densidad media de viviendas equipadas con calefacción	20
	-Zonas con elevada densidad de viviendas y/o industrias, pero sujetas a vientos frecuentes y/o lluvia	
	-Zonas expuestas a vientos desde el mar, pero no muy próximas a las costas (muy distantes).	
III Fuerte	-Zonas con elevada densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con elevada densidad de calefacción, generando contaminación	25
	-Zonas cercanas al mar o en cualquier caso expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar	
IV Muy fuerte	-Zonas generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y a humo industrial, que produce depósitos conductores particularmente espesos	31
	-Zonas generalmente de extensión moderada, muy próximas a la costa y expuestas a pulverización salina o a vientos muy fuertes y contaminados desde el mar	
	-Zonas desérticas, caracterizadas por no tener lluvia durante largos periodos, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, sometidas a condensación regular	
<p>Notas: esta tabla deberá aplicarse únicamente a aislamiento de vidrio o porcelana y no cubre algunas condiciones, tales como nieve y hielo bajo fuerte contaminación, lluvia intensa y zonas áridas.</p> <p>^a De acuerdo con la Norma CEI 60815, línea de fuga mínima de aisladores entre fase y tierra relativas a la tensión más elevada de la red (fase-fase).</p> <p>^b Empleo de fertilizantes por aspiración o quemado de residuos, puede dar lugar a un mayor nivel de contaminación por dispersión en el viento.</p> <p>^c Las distancias desde la costa marina dependen de la topografía costera y de las extremas condiciones del viento.</p>		

Fuente: elaboración propia, con base en la Norma CEI 60071-2:1997.

4. DISTANCIAS MÍNIMAS EN EL AIRE Y DISTANCIAS DE SEGURIDAD

4.1. Introducción

En este capítulo se realiza un análisis y se detallan los procedimientos que rigen el dimensionamiento de las distancias mínimas en el aire y las distancias de seguridad en una subestación exterior (aislamiento en aire) para garantizar el adecuado nivel de aislamiento en cada uno de los equipos, teniendo en cuenta las condiciones (altitud sobre el nivel del mar, temperatura, presión barométrica, humedad, nivel de tensión, nivel básico al impulso) del sitio.

4.2. Dimensionamiento de distancias mínimas en aire

En la mayoría de subestaciones diseñadas no es posible probarlas ante la soportabilidad a los impulsos de tensión tipo rayo, maniobra o a sobretensiones a frecuencia industrial, esto por el costo de los equipos para realizar pruebas normalmente; es necesario asegurar la soportabilidad dieléctrica, al mismo tiempo de hacer más eficiente el dimensionamiento de los equipos que constituyen la instalación.

La soportabilidad a tensiones de impulso tipo rayo o maniobra en condiciones atmosféricas normalizadas, debe ser igual o incluso mayor que los valores especificados por la Norma CEI 60071-1 e CEI 60071-2. Las distancias mínimas especificadas en las normas anteriormente descritas, consideran una aproximación conservativa, teniendo en cuenta las experiencias prácticas, la economía en la instalación y los equipos fabricados en la práctica.

4.3. Distancia de seguridad

El valor básico debe garantizar las distancias adecuadas para que no exista ningún riesgo de flameo, aun en las peores condiciones existentes. El valor básico es la distancia mínima en aire de fase a tierra, correspondiente al nivel de aislamiento determinado para la instalación o para cada subestación del sitio.

4.3.1. Cálculo del valor básico

Para el cálculo de este valor, se toman en cuenta las condiciones atmosféricas prevalcientes en sitio, el nivel de tensión (voltaje nominal) y BIL (nivel básico de aislamiento); en las fórmulas matemáticas siguientes pueden verse los factores detallados a tomar en cuenta:

Ecuación para calcular la densidad del sitio:

$$\delta = \frac{3.92 \times b}{273^\circ + T}$$

En donde:

b: presión barométrica en cm de mercurio (Hg)

T: temperatura (grados Celsius) del sitio

Nota: la presión barométrica está intrínsecamente relacionada con la altitud sobre el nivel del mar.

Ecuación para calcular la tensión crítica de flameo:

$$TCF = \frac{BIL \times K_h}{(1 - KC) \times \delta}$$

En donde:

BIL: nivel básico de aislamiento

Kh: factor de humedad

K: factor de electrodo igual a 1.3 (probabilidad de falla del 10 %)

C: 3 % para impulsos de tipo rayo (voltaje nominal \leq 245 kV)

C: 6 % para impulsos de tipo maniobra (voltaje nominal $>$ 245 kV)

δ : densidad del sitio

Ecuación para calcular la distancia de fase a tierra:

$$d_{ft} = \frac{TCF \times F}{I_R}$$

En donde:

TCF: tensión crítica de flameo

F: 10 % como factor de seguridad (voltaje nominal \leq 245 kV)

F: 6 % como factor de seguridad (voltaje nominal $>$ 245 kV)

I_R: impulso de rayo (500 kV/m a 600 kV/m) normalmente 550 kV/m

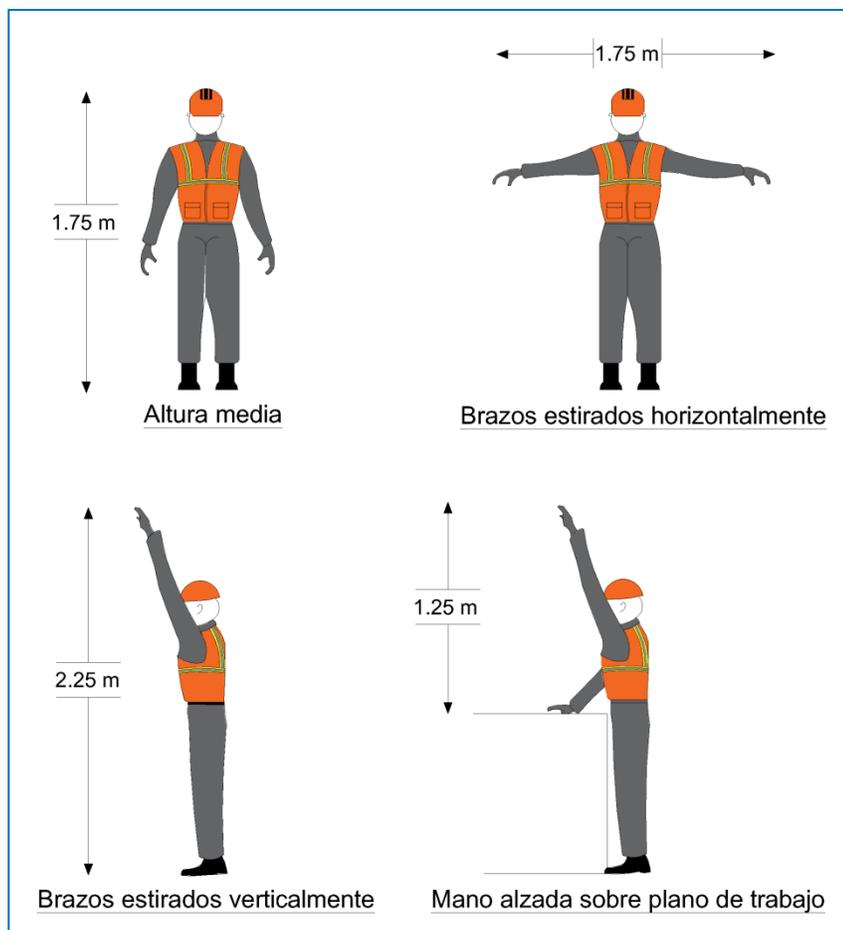
Ecuación para calcular la distancia entre fase y fase:

$$d_{ff} = 1.15 \times d_{ft}$$

4.3.2. Determinación de las zonas de seguridad

Se hace necesario incrementar el valor básico en distancias que dependen de la altura promedio del personal de mantenimiento (figura 11) y del tipo de trabajo a realizar (diferentes movimientos).

Figura 11. Dimensiones medias de un operador



Fuente: elaboración propia, con base en Comité No.23, del CIGRÉ.

4.3.2.1. Movimiento del personal

Se debe considerar la seguridad para la libre circulación del movimiento del personal entre tierra y la parte energizada más baja de la subestación; esta distancia corresponde al valor básico incrementándole 2.25 metros (figura 12). El aislador de cualquier elemento debe ser considerado como un componente energizado.

Ecuación para calcular la distancia de circulación vertical para personas:

$$d_{cp} = d_{ft} + 2.25$$

4.3.2.2. Movimiento de vehículos

Se debe considerar y prever una zona de seguridad para el montaje y mantenimiento de equipos, delimitada por el perfil del vehículo, incrementándole 0.7 metros horizontalmente y 0.5 metros verticalmente, para lograr una conducción adecuada, sin riesgos eléctricos y agregando una zona de circulación perimetral.

Ecuaciones para calcular la distancia de circulación horizontal y vertical de vehículos, respectivamente:

$$d_{hv} = (d_{ft} + 0.7) \times 2 + 2.5$$

$$d_{vv} = (d_{ft} + 0.5) + 1.5$$

4.3.2.3. Trabajos sobre equipos o sobre conductores

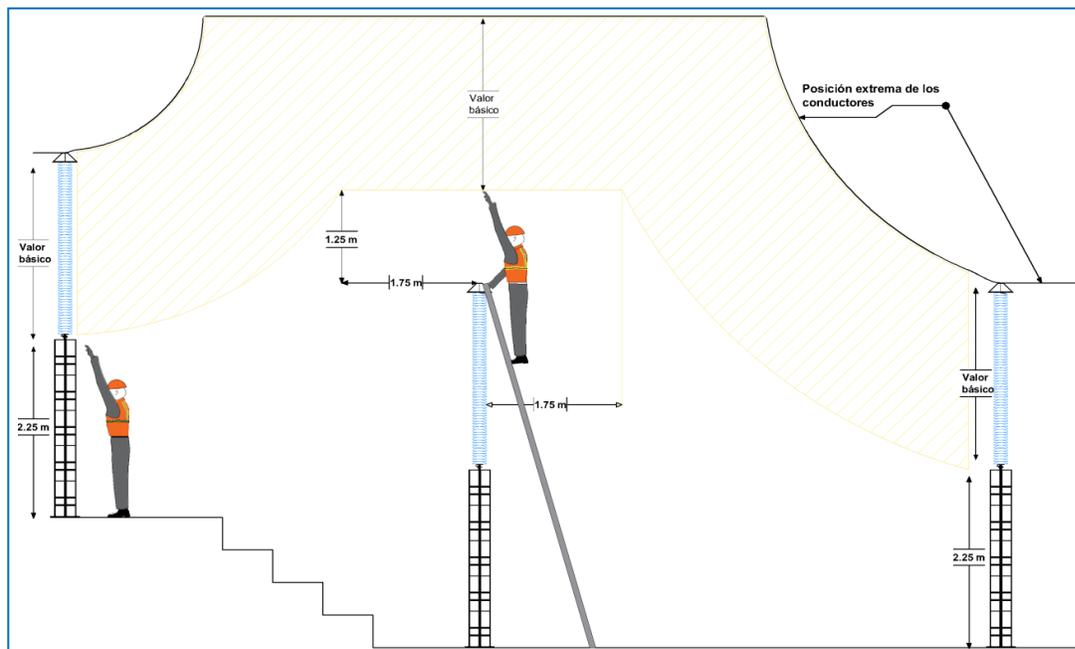
Cuando la subestación está totalmente en servicio, se necesita realizar mantenimiento y chequeo de equipos, con la subestación energizada (costo de suministro). Por ello se toma en cuenta el valor básico, incrementándole 1.75 metros horizontalmente y/o 1.25 metros verticalmente (figura 12).

Ecuaciones para calcular la distancia de mantenimiento horizontal y vertical de personas, respectivamente:

$$d_{hp} = d_{ft} + 1.75$$

$$d_{vp} = d_{ft} + 1.25$$

Figura 12. Mantenimiento de equipos



Fuente: elaboración propia, con base en Comité No.23 del CIGRÉ.

4.4. Distancias para el dimensionamiento de subestaciones

A continuación se definen las distancias para el dimensionamiento de subestaciones.

4.4.1. Primer nivel de barras

El primer nivel de barras o altura de montaje de equipos, es la altura de las partes vivas sobre el nivel del suelo y en ningún caso debe ser menor a 3 metros; para el cálculo se debe tomar en cuenta el nivel de tensión nominal o asignada del sistema y verificar las tablas de la Norma CEI 60038:2009, para saber qué tensión máxima asigna al voltaje nominal elegido, tanto para voltajes menores de 35 kV (tabla I) como mayores de 35 kV (tabla II).

Ecuación para calcular el primer nivel de barras:

$$h_e = 2.3 + 0.0105 \times U_m$$

En donde:

U_m : tensión máxima del sistema

Esta ecuación es válida para alturas menores de 1000 metros sobre el nivel del mar. Para alturas mayores se debe corregir, ya que baja la densidad del aire y por ende las características dieléctricas. Para ello se incrementa 1.25 % por cada 100 metros que se eleve la región sobre los primeros 1000 msnm. Dando una ecuación de corrección:

$$h_{e\ msnm} = h_e \times (0.000125 \times h_m + 0.875)$$

En donde:

h_m : altura de montaje sobre el nivel del mar

4.4.2. Segundo nivel de barras

El segundo nivel de barras o altura de mínima de montaje de barras, es la altura de las barras que energizan las dos bahías distintas de una subestación (entrada y salida); se debe lograr la menor sensación de campo eléctrico para el personal de mantenimiento que pase por debajo de ellas.

Para el cálculo se debe tomar en cuenta el nivel de tensión nominal o asignada del sistema y verificar las tablas de la Norma CEI 60038:2009 para saber qué tensión máxima asigna al voltaje nominal elegido, tanto para voltajes menores de 35 kV (tabla I) como mayores de 35 kV (tabla II).

Ecuación para calcular el segundo nivel de barras:

$$h_b = 5 + 0.0125 \times U_m$$

En donde:

U_m : tensión máxima del sistema

Esta ecuación es válida para alturas menores de 1000 metros sobre el nivel del mar. Para alturas mayores se debe corregir, ya que baja la densidad del aire y por ende las características dieléctricas.

Para ello se incrementa 1.25 % por cada 100 metros que se eleve la región sobre los primeros 1000 msnm. Dando una ecuación de corrección:

$$h_{b\ msnm} = h_b \times (0.000125 \times h_m + 0.875)$$

En donde:

h_m : altura de montaje sobre el nivel del mar

4.4.3. Altura de líneas

La altura de remate de líneas de una subestación es la altura de las líneas que energizan el sistema completo en su entrada o las líneas que salen para energizar otro punto del sistema eléctrico de potencia. En ningún caso debe ser menor a 6 metros.

Para el cálculo se debe tomar en cuenta el nivel de tensión nominal o asignada del sistema y verificar las tablas de la Norma CEI 60038:2009, para saber qué tensión máxima asigna al voltaje nominal elegido, tanto para voltajes menores de 35 kV (tabla I) como mayores de 35 kV (tabla II).

Ecuación para calcular altura de remate de líneas:

$$h_L = 5 + 0.006 \times U_m$$

En donde:

U_m : tensión máxima del sistema

Esta ecuación es válida para alturas menores de 1000 metros sobre el nivel del mar. Para alturas mayores se debe corregir, ya que baja la densidad del aire y por lo ende las características dieléctricas. Para ello se incrementa 1.25 % por cada 100 metros que se eleve la región sobre los primeros 1000 msnm. Dando una ecuación de corrección:

$$h_{L\ msnm} = h_L \times (0.000125 \times h_m + 0.875)$$

En donde:

h_m : altura de montaje sobre el nivel del mar

4.4.4. Distancia de barras

Para calcular la distancia de barras primero se define si serán flexibles o rígidas. Luego se necesita conocer el nivel de tensión nominal o asignado del sistema y el vano. Para el barraje flexible se utiliza el valor básico por un factor que va de 1.8 a 2; para el barraje rígido se utiliza el valor básico por un factor que va de 1.7 a 1.8. Ambos condicionantes del nivel de tensión y vano. Dando las siguientes ecuaciones:

$$dbb_{flexible} = 1.8 \times dft ; si\ vano \leq 40 \ \& \ U_m \leq 230\ kV$$

$$dbb_{flexible} = 2 \times dft ; si\ vano > 40 \ o \ U_m > 230\ kV$$

$$dbb_{rigido} = 1.7 \times dft ; si\ vano \leq 40 \ \& \ U_m \leq 230\ kV$$

$$dbb_{rigido} = 1.8 \times dft ; si\ vano > 40 \ o \ U_m > 230\ kV$$

4.4.5. Ancho de campo

El ancho del campo de una subestación indica la distancia entre los ejes de las columnas que forman el pórtico de entrada de líneas; este está determinado por el tipo de configuración, dimensiones de los equipos y ancho de las estructuras. Se pueden tener dos casos comunes: el primero con las estructuras no adyacentes a los equipos y el segundo con estructuras adyacentes a los equipos (figura 13); dando las siguientes ecuaciones (en el orden respectivo) en forma resumida:

$$W_c N = \frac{Z_1}{2} + 4.7375 \times dft + 3Z_2$$

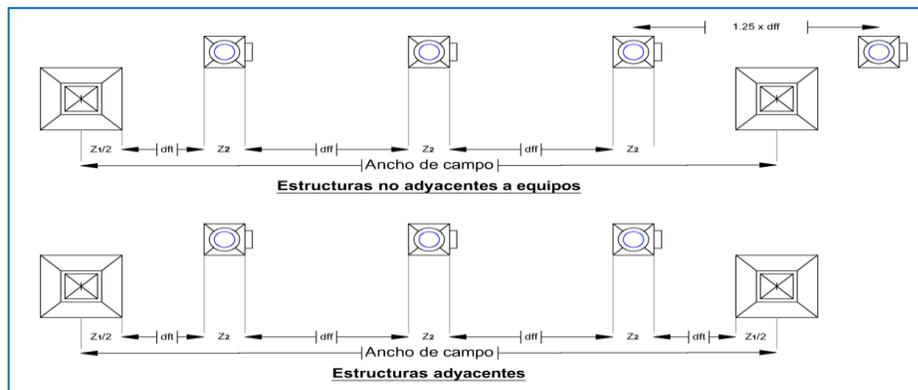
$$W_c A = Z_1 + 4.3 \times dft + 3Z_2$$

En donde:

Z₁: ancho de la estructura

Z₂: ancho del equipo (más ancho del campo)

Figura 13. Ancho de campo



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

4.4.6. Demarcación de las zonas

Es importante señalar las zonas de seguridad dentro de las subestaciones, tanto las relacionadas con el movimiento de vehículos como las áreas en donde se deban realizar mantenimientos; para ello se utilizan banderas que sean visibles para el personal, barreras o mallas, incluyendo avisos de peligro.

5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

5.1. Desarrollo de página principal

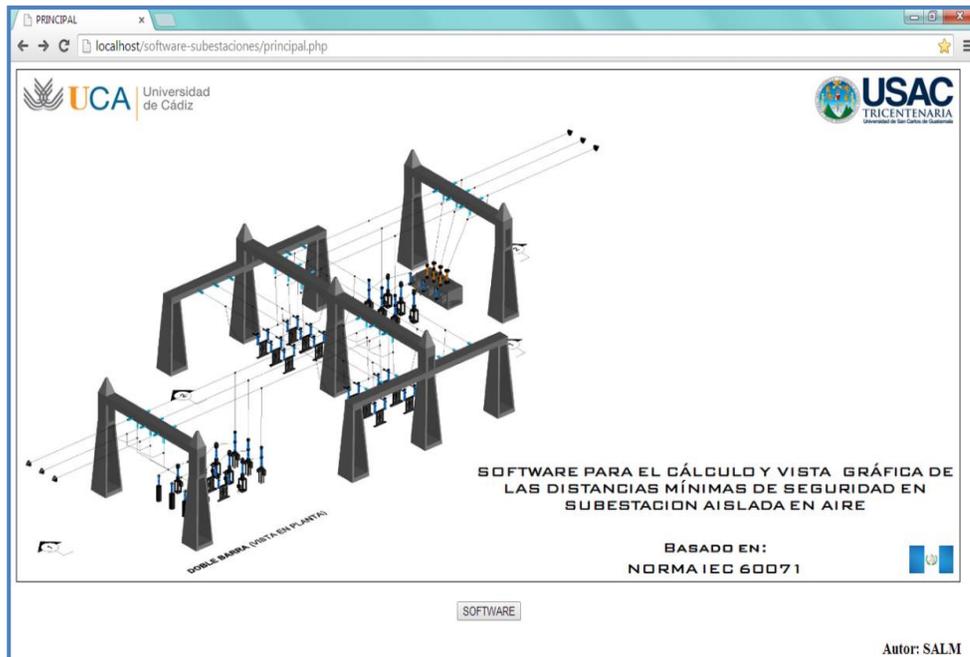
Esta pretende dar una vista básica al lector del alcance del software y pequeña bienvenida. La programación de esta parte es la más sencilla en cuanto al código. El diseño se realiza en un programa de dibujo. 12 líneas de código.

Figura 14. Captura de pantalla del código HTML

```
1 <HTML>
2 <HEAD>
3 <CENTER><TITLE>PRINCIPAL</TITLE></CENTER>
4 </HEAD>
5
6 <META HTTP-EQUIV="Content-Type" CONTENT="text/html; charset=UTF-8" />
7 <FORM ACTION="datos.php" METHOD="post" NAME="Principal">
8 <IMG SRC="A1.png" BORDER="1" WIDTH="1330" HEIGHT="585"><BR><BR>
9 <CENTER><INPUT TYPE="submit" VALUE="SOFTWARE"/></CENTER>
10 <H3 align="RIGHT"> Autor: SALM</H3>
11 </BODY>
12 </HTML>
```

Fuente: elaboración propia, con programa de PHP.

Figura 15. Captura de pantalla de página principal



Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

5.2. Desarrollo de plataforma de ingreso de datos

Esta parte del programa solicita los datos y parámetros a ingresar, se combina con funciones JavaScript (jquery-2.0.2.js 8,755 líneas de código) para anidar y restringir parámetros preseleccionados. 664 líneas de código.

Figura 16. Captura de pantalla del código HTML + JavaScript

```
1 <HTML>
2 <HEAD>
3 <CENTER><TITLE>SOFTWARE-DATOS</TITLE></CENTER>
4 <META HTTP-EQUIV="Content-Type" CONTENT="text/html; charset=UTF-8" />
5 <SCRIPT LANGUAGE="javascript" SRC="http://localhost/software-subestaciones/jquery-2.0.0.js"></SCRIPT>
6 <SCRIPT LANGUAGE="javascript">
7 $(document).ready(function()
8 {
9     $("#Nivel_Tension_Primary").change(function ()
10     {
11         $("#Nivel_Tension_Primary").each(function ()
12         {
13             elegido=$(this).val();
14             $.post("modelos.php", { elegido: elegido }, function(data)
15             {
16                 $("#BIL_Primary").html(data);
17             });
18         });
19     });
20 });
21 </SCRIPT></HEAD>
22 <SCRIPT LANGUAGE="javascript" SRC="http://localhost/software-subestaciones/jquery-2.0.2.js"></SCRIPT>
23 <SCRIPT LANGUAGE="javascript">
24 $(document).ready(function()
25 {
26     $("#Nivel_Tension_Secundaria").change(function ()
27     {
28         $("#Nivel_Tension_Secundaria").each(function ()
29         {
30             elegido=$(this).val();
31             $.post("modelos2.php", { elegido: elegido }, function(data)
32             {
33                 $("#BIL_Secundario").html(data);
34             });
35         });
36     });
37 });
38 </SCRIPT></HEAD>
39
40
41 <H2><BR></H2>
42
43
44 <META HTTP-EQUIV="Content-Type" CONTENT="text/html; charset=UTF-8" />
```

Fuente: elaboración propia, con programa de PHP.

Luego se mandan los datos a la tercera parte (cálculos).

Figura 17. Captura de pantalla ingreso de datos

SOFTWARE-DATOS x
localhost/software-subestaciones/datos.php

DATOS SUBESTACIÓN [ENTRADA]
NIVEL DE TENSION: [69 ▼] [kV] BIL: [325 ▼] [kV] IMPULSO DE RAYO: [550 ▼] [kV·m] CONFIGURACIÓN: [DOBLE BARRA ▼] VANO: [<40 ▼]

DATOS SUBESTACIÓN [SALIDA]
NIVEL DE TENSION: [230 ▼] [kV] BIL: [650 ▼] [kV] IMPULSO DE RAYO: [550 ▼] [kV·m] CONFIGURACIÓN: [BARRA PRINCIPAL Y TRANSFERENCIA ▼] VANO: [>40 ▼]

PARAMETROS DEL SITIO
ALTITUD: [1850 ▼] [masnm] GRADO DE CONTAMINACIÓN: [II - MEDIO ▼] T-MIN: [20] T-MEDIA: [31] T-MAX: [40] [°C] HUMEDAD (RELATIVA): [1.1] [g·m³]

[BORRAR] [CALCULO]

DATOS GENERALES [OPCIONAL]
UBICACIÓN DEL PROYECTO: [San Pedro Carcha, Cobán, Guatemala]
NOMBRE DEL PROYECTO: [Subestación Reguladora del Norte]
INGENIERO DISEÑADOR: [Stuardo López Méndez]
PROPIETARIO: [Grupo de Ingeniería y Desarrollo de Guatemala]

Autor: SALMI

Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

5.3. Desarrollo de plataforma de cálculos

La tercera parte del programa es una de las más complejas, pues en ellas se llevan a cabo operaciones simultáneas. Primero recibe las variables, luego las procesa a través de algoritmos matemáticos transformados previamente de ecuaciones dadas por las normas; además de consultar tablas para hacer comparaciones y restricciones de los valores que se utilizan: 940 líneas de código.

Figura 18. Captura de pantalla del código PHP

```
149 //CALCULO DE DENSIDAD
150 $Densidad=(3.92*$Presion)/(273+$Temperatura);
151
152 //CORRECCION DE Up - FALLA [I]
153 if ($Nivel_Tension_Primeria<=245)
154 {
155     $F_Primerio=1.1;
156     $C_Primerio=0.03;
157 } else {
158     $F_Primerio=1.06;
159     $C_Primerio=0.06;
160 }
161 //TENSION CRÍTICA DE FLAMEO [TCF] - NORMAL/DISEÑO [I]
162 $TCF_Primerio_N=($BIL_Primerio)/(1-(1.3*$C_Primerio));
163 $TCF_Primerio_D=($TCF_Primerio_N*$Humedad_Relativa)/($Densidad);
164
165 //DISTANCIA DE FASE A TIERRA [I]
166 $Distancia_Fase_Tierra_Primerio=($TCF_Primerio_D*$F_Primerio)/($Impulso_Rayo_Primerio);
167
168 //DISTANCIA DE FASE A FASE [I]
169 $Distancia_Fase_Fase_Primerio=1.15*($Distancia_Fase_Tierra_Primerio);
170
171 //TENSION MÁXIMA PARA EL EQUIPO EN FUNCIÓN DE TENSION NOMINAL DEL SISTEMA ($Nivel_Tension_Primeria)
172 switch ($Nivel_Tension_Primeria)
173 {
174     case '0':     $Nivel_Tension_Primeria_Max=0; break;
175     case '13.8': $Nivel_Tension_Primeria_Max=14.52; break;
176     case '34.5': $Nivel_Tension_Primeria_Max=36.5; break;
177     case '66':   $Nivel_Tension_Primeria_Max=72.5; break;
178     case '69':   $Nivel_Tension_Primeria_Max=72.5; break;
179     case '110':  $Nivel_Tension_Primeria_Max=123; break;
```

Fuente: elaboración propia, con programa de PHP.

Después de procesar todos los datos, manda a mostrar (imprimir) los valores en una tabla, diseñada con estilos en cascada en CSS.

Figura 19. Captura de pantalla del código PHP + CSS

```

1  .CSSTableGenerator {
2      margin:0px;padding:0px;
3      width:60%;
4      box-shadow: 2px 2px 5px #888888;
5      border:1px solid #000000;
6
7      -moz-border-radius-bottomleft:8px;
8      -webkit-border-bottom-left-radius:8px;
9      border-bottom-left-radius:8px;
10
11     -moz-border-radius-bottomright:8px;
12     -webkit-border-bottom-right-radius:8px;
13     border-bottom-right-radius:8px;
14
15     -moz-border-radius-topright:8px;
16     -webkit-border-top-right-radius:8px;
17     border-top-right-radius:8px;
18
19     -moz-border-radius-topleft:8px;
20     -webkit-border-top-left-radius:8px;
21     border-top-left-radius:8px;
22 }
23 .CSSTableGenerator table{
24     border-collapse: collapse;
25     border-spacing: 0;
26     width:100%;
27     height:100%;
28     margin:0px;padding:0px;

```

Fuente: elaboración propia, con programa de PHP.

Figura 20. Captura de pantalla del resultado (tabla I)

Descripción	Valor Subestación I	Valor Subestación II
La tensión crítica de flameo [Normal]	921.91 [kV]	338.19 [kV]
La tensión crítica de flameo [Diseño]	1014.24 [kV]	372.06 [kV]
La distancia de fase a tierra	1.95 [m]	0.74 [m]
La distancia de fase a fase	2.25 [m]	0.86 [m]
La distancia de fase a tierra de polos abiertos	2.35 [m]	0.86 [m]
La distancia de barras flexibles	3.91 [m]	1.49 [m]
La distancia de barras rígidas	3.52 [m]	1.34 [m]
Nivel de tensión máxima	300 [kV]	72.5 [kV]
El bil máximo	1020 [kV]	375 [kV]

Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

Figura 21. **Captura de pantalla del resultado (tabla II)**

Descripción	Valor Subestación I	Valor Subestación II
El primer nivel de barras o altura de montaje de equipos a 800 [m]	5.45 [m]	3.06 [m]
El segundo nivel de barras o altura mínima de montaje de barras a 800 [m]	8.75 [m]	5.91 [m]
La altura de remate de las líneas que entran a las subestación a 800 [m]	6.8 [m]	5.44 [m]
La distancia horizontal de seguridad (movimiento personal)	2.85	1.64
La distancia vertical de seguridad (movimiento personal)	4.2	2.99
La distancia horizontal de mantenimiento (trabajo sobre equipos)	3.7	2.49
La distancia vertical de mantenimiento (trabajo sobre equipos)	3.2	1.99
La distancia horizontal de circulación de vehículos	7.81	5.39
La distancia vertical de circulación de vehículos	3.95	2.74

Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

Nota: el software tiene alertas integradas cuando ve que hay valores que están por debajo del mínimo permitido por las normas; colocándolo en negrilla y color rojo.

5.4. Desarrollo de plataforma de planos

Esta parte del programa enlaza el software desarrollado en PHP y AutoCAD, para descargar los planos, previamente seleccionados en la página de datos (parámetros). 471 líneas de código - enlace con CAD.

Figura 22. Captura de pantalla del botón de descarga de planos



Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

Figura 23. Captura de pantalla del código HTML + PHP + CAD

```
1 <html>
2 <head>
3 <title>página de destino</title>
4 </head>
5 <body>
6 <h1>Al abrir esta página se han pasado las siguientes variables:</h1>
7 <META HTTP-EQUIV="Content-Type" CONTENT="text/html; charset=UTF-8" />
8
9 <?php
10 $Configuracion_Primarya=$_GET['Configuracion_Primarya'];
11 $Configuracion_Secundaria=$_GET['Configuracion_Secundaria'];
12
13
14
15 switch ($Configuracion_Primarya) {
16     case '1':
17         switch ($Configuracion_Secundaria)
18         {
19             case '1':
20                 $file = 'ima/11.dwg';
21                 if (file_exists($file))
22                 {
23                     header('Content-Description: File Transfer');
24                     header('Content-Type: application/octet-stream');
25                     header('Content-Disposition: attachment; filename='.basename($file));
26                     header('Expires: 0');
27                     header('Cache-Control: must-revalidate');
28                     header('Pragma: public');
29                     header('Content-Length: ' . filesize($file));
30                     ob_clean();
31                     flush();
32                     readfile($file);
33                     exit;
34                 }
35                 break;
36             case '2':
37                 $file = 'ima/12.dwg';
38                 if (file_exists($file))
39                 {
40                     header('Content-Description: File Transfer');
41                     header('Content-Type: application/octet-stream');
42                     header('Content-Disposition: attachment; filename='.basename($file));
43                     header('Expires: 0');
44                     header('Cache-Control: must-revalidate');
```

Fuente: elaboración propia, con programa de PHP.

Figura 24. **Captura de pantalla de descarga**

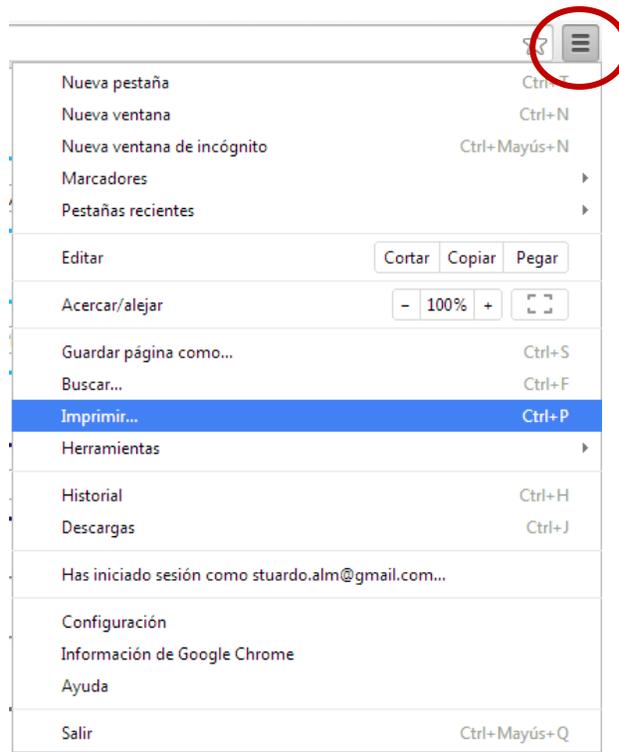


Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

5.5. Impresión dentro del programa

En cualquier parte del programa se puede imprimir para almacenar los datos y/o resultados con el icono mostrado en “color rojo”.

Figura 25. **Captura de pantalla de impresión WampServer**

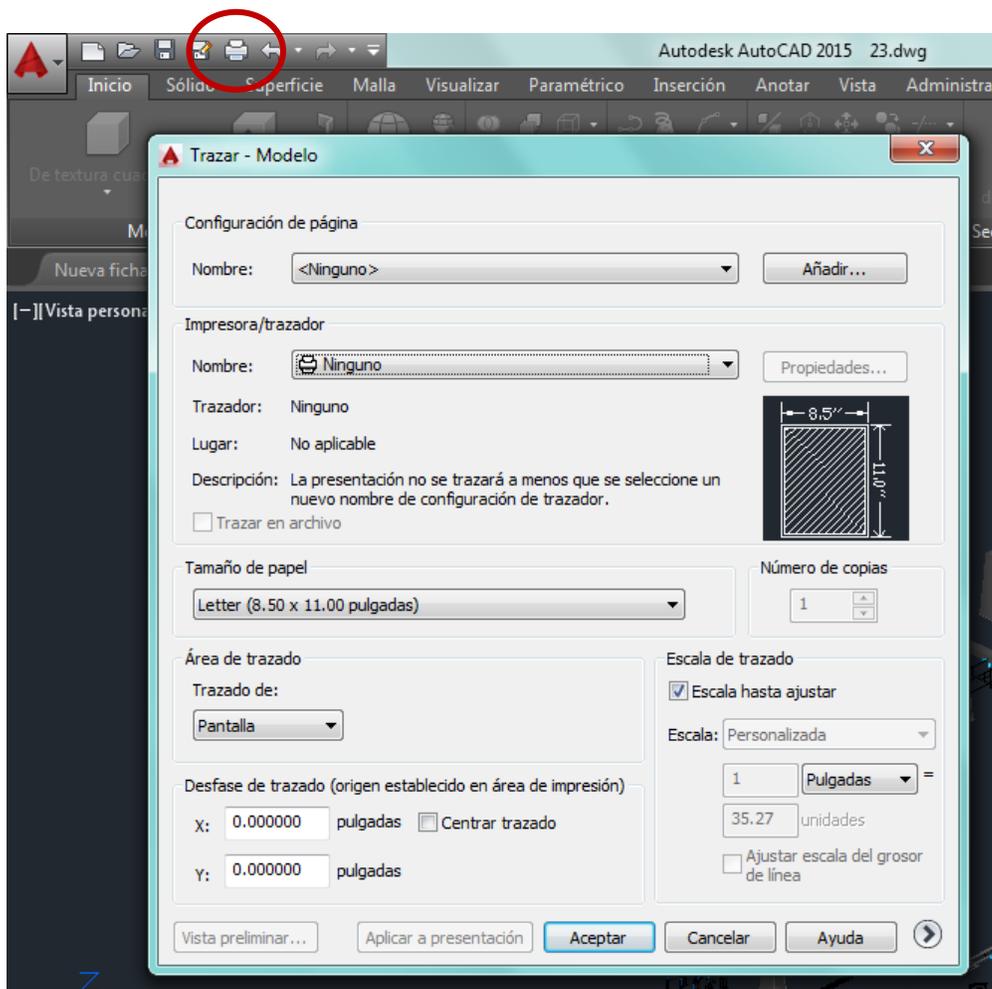


Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

5.6. Impresión dentro de AutoCAD

Dentro de AutoCAD se puede imprimir cualquier parte seleccionada o la ventana completa, indicada con “color rojo”.

Figura 26. Captura de pantalla de impresión AutoCAD

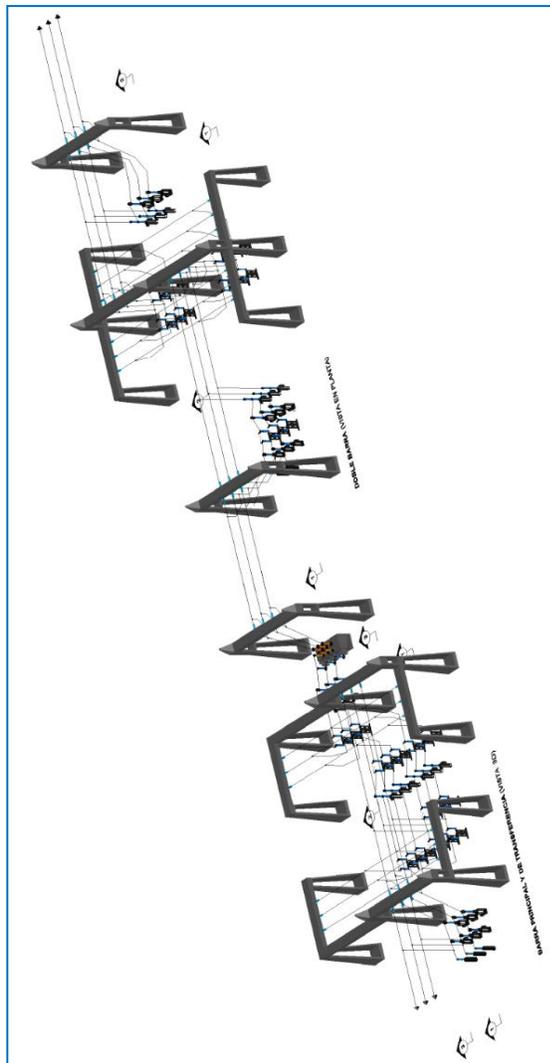


Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

5.7. Resultado final

En la siguiente figura se da a conocer la captura de pantalla como resultado final.

Figura 27. **Captura de pantalla resultado final**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

6. MANUAL DEL SOFTWARE

6.1. Acceso

Se puede acceder al programa de dos formas distintas a través de un computador: conexión a internet y con algún programa de dibujo asistido por computador en 3D.

6.1.1. Interna

Al estar alojado en una computadora y tener WampServer instalado:

<http://localhost/software-subestaciones/principal.php>

6.1.2. Externa

Al alojarse en un servidor, se ingresa al siguiente link:

www.software-subestaciones/principal.php

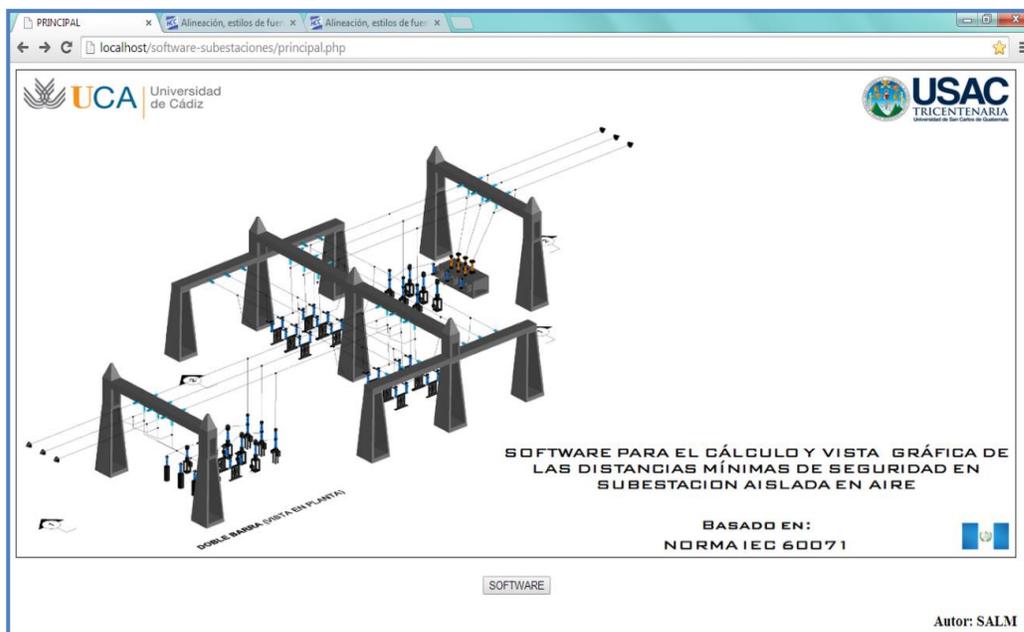
6.2. Instrucciones

El software se diseñó de tal forma que fuese muy fácil e intuitivo de usar, por lo cual basta únicamente con ingresar los datos solicitados o elegir los parámetros dados y presionar el botón correspondiente. Se detalla a continuación su uso.

6.2.1. Página principal

Esta es la página de presentación del software. Se presiona el botón “software” para acceder a la página de ingreso de datos y parámetros.

Figura 28. Vista principal



Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

6.2.2. Parámetros de subestación

Se ingresan los parámetros solicitados de la subestación I y II, tales como el nivel de tensión, el nivel básico al impulso de rayo y de aislamiento, la configuración deseada y el vano (mayor o menor de 40 metros).

6.2.3. Parámetros del sitio

Se ingresan los datos del sitio en donde se desarrolla el proyecto, tales como la altitud de montaje (sobre el nivel del mar), el grado de contaminación del sitio, la temperatura del lugar (mínima, media y máxima) y la humedad relativa.

6.2.4. Datos generales (opcional)

Se ingresan los datos generales del proyecto, como su ubicación, nombre, ingeniero diseñador y propietario.

Figura 29. Ingreso de datos

The screenshot shows a web browser window with the following content:

- SOFTWARE-DATOS** (tab title)
- Address bar: localhost/software-subestaciones/datos.php
- DATOS SUBESTACIÓN [ENTRADA]**: Nivel de Tensión: [dropdown], BIL: [dropdown], Impulso de Rayo: 550 [dropdown], Configuración: [BARRA SENCILLA], Vano: < 40 [dropdown]
- DATOS SUBESTACIÓN [SALIDA]**: Nivel de Tensión: [dropdown], BIL: [dropdown], Impulso de Rayo: 550 [dropdown], Configuración: [BARRA SENCILLA], Vano: < 40 [dropdown]
- PARAMETROS DEL SITIO**: Altitud: 0 [dropdown], Grado de Contaminación: [LIGERO], T-MIN: [input], T-MEDIA: [input], T-MAX: [input] [°C], Humedad (Relativa): [input] [g/m³]
- Buttons: BORRAR, CALCULO
- DATOS GENERALES [OPCIONAL]**: Ubicación del Proyecto: [input], Nombre del Proyecto: [input], Ingeniero Diseñador: [input], Propietario: [input]
- Footer: Autor: SALM

Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

6.2.5. Opciones

Después de ingresar los parámetros se pueden realizar dos tipos de opciones, presionar el botón “Calcular” y el programa automáticamente realiza todas las acciones. O se puede presionar “Borrar”, si se necesita realizar un nuevo diseño.

Figura 30. **Botones de acción**



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla del software desarrollado.

6.3. Resumen de realización de los cálculos

El software realiza los cálculos en una plataforma de programación de uso general de código del lado del servidor originalmente diseñado para el desarrollo web de contenido dinámico, llamado PHP (Hypertext Preprocessor), el cual es un software libre.

Con funciones de otros programas enlazados como, JavaScript, CSS/HTML (estilos y diseño), y ObjectARX/ObjectDBX de AutoCAD.

El software diseñado procesa los datos ingresados y a través de algoritmos y métodos matemáticos realiza los cálculos y consultas a la base de datos, para luego graficarlos.

6.4. Tabla de resultados

El programa utiliza los datos y parámetros ingresados para mostrar dos tablas con los resultados de las distancias en el aire y las distancias de seguridad en una subestación aislada.

Figura 31. Distancias en el aire (minúsculas)

Descripción	Valor Subestación I	Valor Subestación II
La tensión crítica de flameo [Normal]	921.91 [kV]	338.19 [kV]
La tensión crítica de flameo [Diseño]	1014.24 [kV]	372.06 [kV]
La distancia de fase a tierra	1.95 [m]	0.74 [m]
La distancia de fase a fase	2.25 [m]	0.86 [m]
La distancia de fase a tierra de polos abiertos	2.35 [m]	0.86 [m]
La distancia de barras flexibles	3.91 [m]	1.49 [m]
La distancia de barras rígidas	3.52 [m]	1.34 [m]
Nivel de tensión máxima	300 [kV]	72.5 [kV]
El bil máximo	1020 [kV]	375 [kV]

Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

Figura 32. Distancias de seguridad

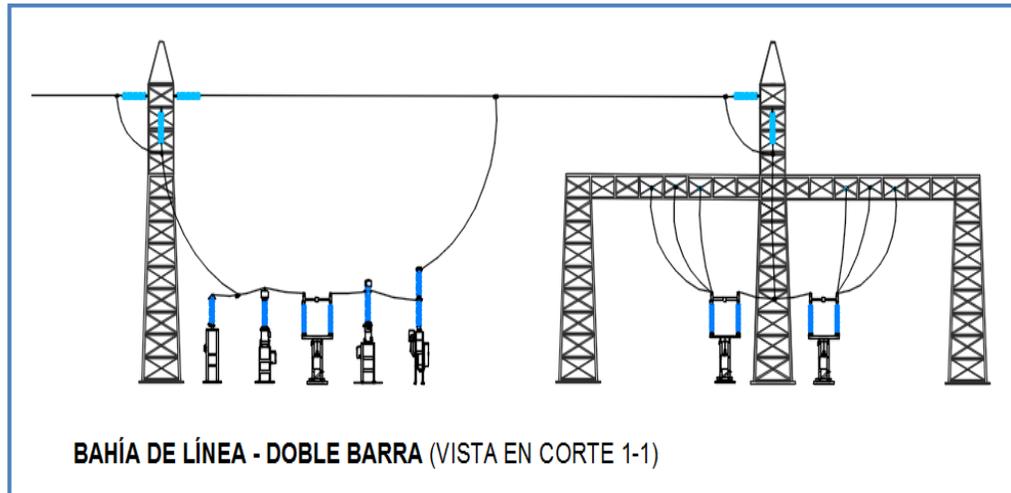
Descripción	Valor Subestación I	Valor Subestación II
El primer nivel de barras o altura de montaje de equipos a 800 [m]	5.45 [m]	3.06 [m]
El segundo nivel de barras o altura mínima de montaje de barras a 800 [m]	8.75 [m]	5.91 [m]
La altura de remate de las líneas que entran a las subestación a 800 [m]	6.8 [m]	5.44 [m]
La distancia horizontal de seguridad (movimiento personal)	2.85	1.64
La distancia vertical de seguridad (movimiento personal)	4.2	2.99
La distancia horizontal de mantenimiento (trabajo sobre equipos)	3.7	2.49
La distancia vertical de mantenimiento (trabajo sobre equipos)	3.2	1.99
La distancia horizontal de circulación de vehiculos	7.81	5.39
La distancia vertical de circulación de vehiculos	3.95	2.74

Fuente: elaboración propia, con programa de WampServer.

6.5. Descarga e impresión de planos

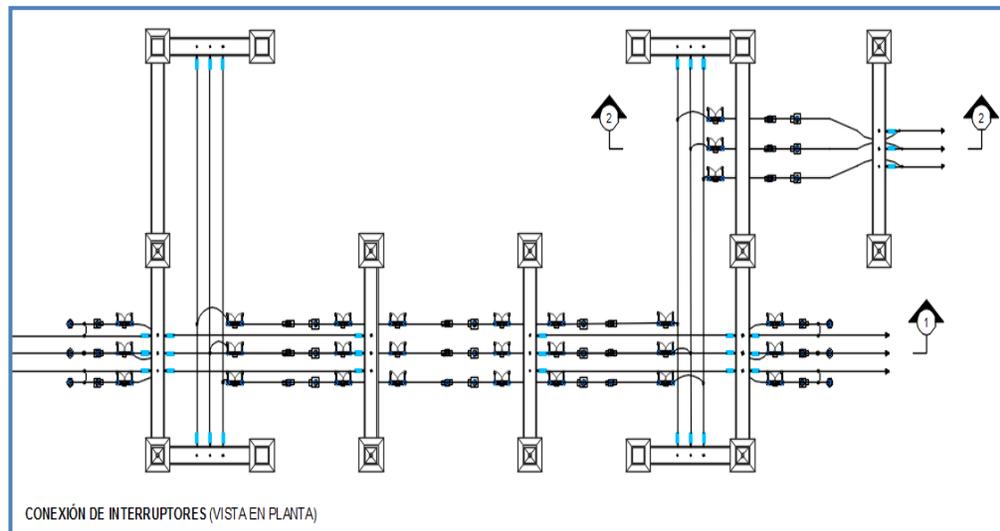
Se presiona el botón de “planos de subestación diseñada” el cual hace una configuración de subestación e imprime los planos de tres formas: planta, perfil y otra en tres dimensiones (3D), todas con sus respectivas protecciones y elementos de subestación.

Figura 33. **Plano vista en corte**



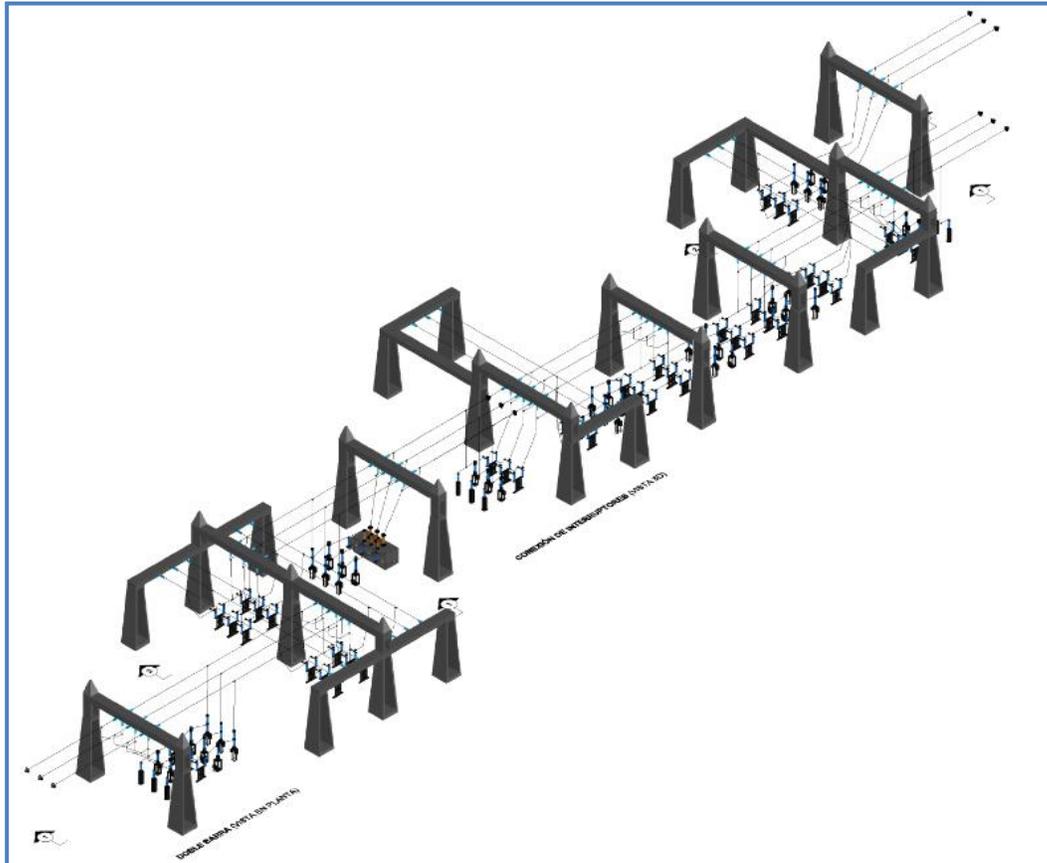
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Figura 34. **Plano vista en planta**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

Figura 35. **Plano vista en 3D**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

CONCLUSIONES

1. Los aspectos generales para diseñar las subestaciones eléctricas dan un panorama general de los estudios previos que deben realizarse.
2. Conocer los diferentes tipos de configuración de barras ayuda a elegir con mayor certeza el diseño óptimo, según requerimientos del proyecto.
3. Un resumen para seleccionar los niveles de aislamiento, agiliza la asociación de la tensión soportada, elegida con la tensión más elevada del material.
4. Un esquema completo para la selección y cálculo de las distancias mínimas en el aire y de seguridad, ayuda a conocer qué variables en el sitio se deben tener previamente para diseñar.
5. El software de subestaciones eléctricas aisladas en aire logra ahorrar tiempo en el cálculo y diseño, y se obtiene una herramienta didáctica al momento de estudiar cursos relativos al tema.
6. A partir del contenido del manual, con normas claras e intuitivas, se mejorará la experiencia del usuario.

RECOMENDACIONES

1. El desarrollo de este tipo de proyectos, debería hacerse en conjunto con personas de otras carreras.
2. Dentro las mejoras que podrían aplicarse al software, está la anidación de diferentes módulos.

BIBLIOGRAFÍA

1. CIGRE. *GT 33.02. Coordinación de aislamiento entre fases. Parte 1: Sobretensiones de maniobra en las redes trifásicas, ELECTRA 64.* Francia: CIGRE, 1979. 165 p.
2. _____. *GT 33.03. Coordinación de aislamiento entre fases. Parte 2: Rigidez dieléctrica frente a las sobretensiones de maniobra de los aislamientos entre fases, ELECTRA 64.* Francia: CIGRE, 1979. 115 p.
3. _____. *GT 33.06. Coordinación de aislamiento entre fases. Parte 3: Diseño y ensayo de aislamiento entre fases, ELECTRA 64.* Francia: CIGRE, 1979. 132 p.
4. _____. *GT 33.07. Guía para la evaluación de la rigidez dieléctrica del aislamiento externo. CIGRE informe técnico No. 72.* Francia: CIGRE, 1979. 175 p.
5. DOYLE, Matt. *PHP práctico.* 2a ed. España: Anaya Multimedia, 2010. 848 p.
6. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Manual técnico en subestaciones eléctricas.* 3a ed. México: Limusa-Wiley, 2008. 426 p.

7. *Libro sobre PHP. Catálogo.* [en línea].
<<http://www.php.net/manual/es/history.php.books.php>>.
[Consulta: mayo de 2014].
8. MEJÍA VILLEGAS, Carlos. *Subestaciones de alta y extra alta tensión.*
2a ed. Colombia: Gráfica Ltda., 1991. 778 p.
9. MELONI, Julier. *HTML5, CSS3 y JavaScript.* España: Anaya
Multimedia, 2012. 655 p.
10. UNE-EN 60071-1:2006. *Coordinación de aislamiento, parte 1:
definiciones, principios y reglas.* España: AENOR, 2006. 40 p.
11. _____. 60071-1:2010. *Coordinación de aislamiento, parte 1:
definiciones, principios y reglas.* España: AENOR, 2010. 10 p.
12. _____. 60071-2:1999. *Coordinación de aislamiento, parte 2: guía
de aplicación.* España: AENOR, 1999. 128 p.