

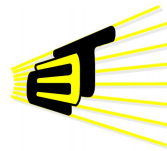
**DISEÑO DE PLANOS DE PLANTA Y PERFIL DE SUBESTACIONES
ELÉCTRICAS ASISTIDOS POR COMPUTADOR.**

Adriana Marcela Ortiz Roa

Ángel David Cáceres Rincón

Sergio Andrés Gualdrón Marciales

Universidad
Industrial de
Santander



**Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica
y de Telecomunicaciones**

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga
2011

DISEÑO DE PLANOS DE PLANTA Y PERFIL DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS ASISTIDOS POR COMPUTADOR.

Adriana Marcela Ortiz Roa

Ángel David Cáceres Rincón

Sergio Andrés Gualdrón Marciales

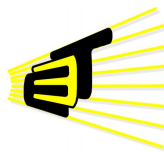
Trabajo de investigación presentado como requerimiento para optar al título de:
Ingeniero Electricista

Director:

Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

Co-Director:

Ms(c). Ing. Fernando Gomez Tapias



**Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica
y de Telecomunicaciones**

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga
2011

Agradezco a Dios y a la Virgen María por todo su apoyo, por darme la fortaleza y sabiduría necesarias en el desarrollo de mis actividades diarias y por permitirme finalizar satisfactoriamente esta gran etapa de mi vida.

Agradezco a mis padres por su cariño, amor, apoyo incondicional y comprensión brindada durante toda mi carrera y mi vida.

A mi hermana por estar a mi lado en todo momento, por su cariño y comprensión.

A Sergio Gualdrón, por su compañía, paciencia, apoyo y amor durante estos años tan importantes en mi vida.

Al doctor Hermann Raúl Vargas, al Ing. Fernando Gómez Tapias, al Ing. Jairo Gómez Tapias y al Doctor Manuel José Ortiz Rangel por su paciencia y colaboración prestada durante la ejecución de este proyecto.

Adriana Marcela Ortiz Roa

Esta Tesis fue un trabajo construido con mucho esfuerzo durante varios meses en los cuales muchas personas estuvieron apoyando incondicionalmente y quiero agradecerles a cada una de ellas:

A mi Padre Aquileo Cáceres por su ejemplo de vida y apoyo económico en todo momento.

A mi Madre Ruth Maritza Rincón por sus palabras de ánimo y sus consejos durante aquellos momentos de crisis y dificultad en el desarrollo de la tesis.

A mis hermanos Susan Cáceres y Daniel Cáceres por su compañía y apoyo brindado.

Al Dr Herman Raul Vargas mi Director de Tesis por su paciencia, tiempo, aportes relevantes, criticas y sugerencias durante el desarrollo del proyecto.

Al Ing. Fernando Gomez Tapias Mi Co-director de Tesis por su seguimiento, participación, opiniones y empuje brindado durante estos meses de trabajo.

A mis Compañeros Adriana Ortiz y Sergio Gualdron debo agradecer de forma especial y sincera que gracias a su constancia, responsabilidad y trabajo en equipo se pudo realizar de manera exitosa este proyecto de Grado.

A Angélica Paola mi novia por su paciencia, amor, dedicación a verme cada dia mejor y su apoyo incondicional.

Finalmente a Nuestro Padre Celestial por sus bendiciones y dones regalados.

Ángel David Cáceres Rincón

*A Dios y a la Virgen María Auxiliadora por su apoyo,
por darme la fortaleza y sabiduría para permitirme
finalizar satisfactoriamente esta gran etapa de mi vida.*

*A mis padres por su amor, apoyo incondicional y
compresión brindada durante el transcurso de mi
carrera.*

A mis hermanos por su cariño y comprensión.

*A Adriana Ortiz, por su amor, paciencia, apoyo y
comprension durante esta etapa tan importante en mi
vida.*

*A mi tia Rosalbina Gualdrón, por su apoyo y
comprension.*

*Al doctor Hermann Raúl Vargas y al Doctor Manuel
José Ortiz Rangel por su paciencia y colaboración.*

Sergio Andrés Gualdrón Marciales

Tabla de contenido

1	Introducción	15
2	Configuraciones de los barrajes	15
2.1	Configuraciones utilizadas en SUBDESIGN	15
3	Selección del nivel básico de aislamiento	15
4	Distancias de seguridad	17
4.1	Altura de los equipos sobre el nivel del suelo	18
4.1.1	Distancia de Seguridad	18
4.1.2	Valor Básico	18
4.2	Distancias mínimas fase - fase	19
4.3	Altura de las barras colectoras	20
4.4	Distancia entre equipos de patio	20
5	Aplicación en Autocad - Subdesign	20
5.1	Primera opción	21
5.1.1	Plano de vistas de perfil de los patios	21
5.1.2	Plano de vistas de planta de los patios	21
5.1.3	Bahías de Transformación	21
5.2	Segunda opción	21
5.3	Diagramas unifilares	21
5.4	Presentaciones	21
5.5	Ejemplo: Diseño de una subestación de 500kV y 230kV	22
6	Conclusiones	25
	Referencias	25
	Biografía	25
7	Introducción	29
8	Fundamento teórico	29
8.1	Metodología IEEE 80 - 2000	29
8.2	Medición de resistividad	29
8.2.1	Método Wenner	29
8.2.2	Método Schlumberger - Palmer	29
8.3	Tensiones Tolerables por el Cuerpo	30
8.4	Tensión de Paso Tolerable	30
8.5	Tensión de Contacto Tolerable	30
8.6	Diseño de una malla de puesta a tierra	31
8.6.1	Cálculo de corriente que circula por la malla	31
8.6.2	Selección conductor de la malla	31
8.6.3	Determinación de las tensiones reales de paso y contacto	32
9	Programa de cálculo	33
10	Conclusiones	36
	Referencias	37
	Biografía	37
	Anexos	39

Lista de figuras

1	Distancia de circulación de personal en una subestación.	18
2	Información general subestación ejemplo.	22
3	Configuración Interruptor y medio - patio1 500kV.	22
4	Diagrama unifilar completo - ejemplo.	22
5	Vista de planta - Interruptor y medio 500 kV	23
6	Plano de planta. IM 500 kV y bahía de transformación	23
7	Plano de planta IM 500 kV y patio 230 kV - 1	23
8	Estructuras de soporte	23
9	Vista de planta final de la subestación ejemplo.	23
10	Perfil Interruptor y medio 500 kV - ejemplo.	24
11	Vistas de perfil - Ejemplo.	24
12	Plano unifilar	24
13	Plano Vista de planta	24
14	Plano Vistas de perfil.	24
15	Ajuste de escala.	25
16	Método Wenner	29
17	Método Schlumberger - Palmer	29
18	Interfaz inicial	34
19	Selección con o sin estudio de Resistividad	34
20	Método Wenner	34
21	Selección material	35
22	Resultados	35
23	Configuración malla diseño final	36

Lista de tablas

2	Tensiones máximas	15
1	Cuadro comparativo entre los esquemas de barras.	16
3	Nivel Basico de Aislamiento - Rango 1	17
4	Niveles de aislamiento - Rango 2	17
6	Distancias en el aire de acuerdo con el BIL	18
5	Distancias de seguridad en el aire.	19
7	Distancia horizontal entre conductores soportados en la misma estructura. . .	19
8	Distancias típicas entre equipos de patio.	20
9	Valores máximos resistencia de puesta a tierra	31
10	Dependencia de Tm respecto al tipo de conexión	32
11	Constantes de los materiales	32
12	Medidas de resistividad	34

Resumen

Título: DISEÑO DE PLANOS DE PLANTA Y PERFIL DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS ASISTIDOS POR COMPUTADOR ^a

Autores:

ADRIANA MARCELA ORTIZ ROA^b

ÁNGEL DAVID CÁCERES RINCÓN

SERGIO ANDRÉS GUALDRÓN MARCIALES

Palabras clave:

Configuraciones de las barras, Distancias de Seguridad, Planos de Planta y Planos de Perfil de una Subestación Eléctrica, Sistema de puesta a tierra, tensión de paso, tensión de contacto, resistividad.

Descripción:

Este documento presenta el funcionamiento de una aplicación software elaborada en Visual Basic for Applications de Autocad llamada SUBDESIGN, por medio de la cual se puede llevar a cabo de una manera más rápida, ágil y sencilla para el usuario el desarrollo de los planos de planta y perfil de una Subestación Eléctrica convencional a la intemperie, junto con su diagrama unifilar. Esta aplicación, incluye los cálculos de las distancias de seguridad necesarias, para el diseño de los planos, tales como circulación de personal, distancia fase-tierra, distancia fase-fase y separación entre equipos de patio, las cuales son tomadas del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE. Mostrando así el fundamento teórico y un ejemplo en el que se observa cómo se opera la aplicación para el desarrollo de un proyecto. A demás presenta el cálculo de la malla de puesta a tierra de una subestación mediante una herramienta informática desarrollada en el entorno Visual Basic 2010. La aplicación GROUNDGRID1.0 se ciñe al procedimiento paso a paso indicado en el Standard IEEE 80 – 2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”. También se anexan al software los métodos para el cálculo de la resistividad del terreno por Wenner y Schlumberger-Palmer.

^aTrabajo de grado en la modalidad de Investigación

^bFacultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Director: PhD. Hermann Raúl Vargas Torres

Codirector: Msc. Fernando Gomez Tapias.

Abstract

Title: DESING OF THE PLAN AND PROFILE DRAWINGS OF AN ELECTRICAL SUBSTATION ASSISTED BY COMPUTER ^a

Authors:

ADRIANA MARCELA ORTIZ ROA^b
ÁNGEL DAVID CÁCERES RINCÓN
SERGIO ANDRÉS GUALDRÓN MARCIALES

Keywords:

Bar configurations, safety distances, plan and profile drawings of a substation, Grounding system, step voltage, touch voltage, resistivity.

Description:

This document presents the functioning of a software application created in Visual Basic for Applications from Autocad called SUBDESIGN, through which it makes faster, agile and easy the development of the top and profile layout drawings of a substation and its line diagram for the user. This application includes the calculus of the required safety distances for the plans design, as the distance for people circulation, the Phase – Earth distance, the Phase-Phase distance and the substation equipment separation which are all taken from Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. Showing this way the theoretical argument and one example where it can be seen how this application works on the development of a project. Also, this application presents the calculus of grounding grids of an electrical substation through an informatic tool developed in Visual Basic. The application GROUNDGRID 1.0 follows the indicated procedure on the Standard IEEE 80 – 2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” and besides it is annexed in the software the Wenner and Schlumberger-Palmer methods for the calculus of the ground resistivity.

^aFinal undergraduate project developed in the research modality.

^bFacultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: PhD. Hermann Raúl Vargas Torres
Subdirector: Msc. Fernando Gomez Tapias.

1 Introducción

El dimensionado de las subestaciones eléctricas convencionales a la intemperie es un proceso extenso que debe hacerse teniendo en cuenta muchas consideraciones, tales como de seguridad para la vida humana, distancias dieléctricas, la normatividad existente en el país de aplicación y área de terreno disponible para su construcción. Subdesign junta la normatividad aplicable para Colombia [1, 2, 3] y además conforma las configuraciones más comunes con los productos de catálogos de los fabricantes más usados comercialmente.

El cálculo de las distancias necesarias para el dimensionado se realiza según los niveles seleccionados de tensión, aislamiento y la altura sobre el nivel del mar, los cuales modifican cada una de las plantillas predefinidas para cada configuración, simplificando el proceso de diseño, y dejando a criterio del usuario la disposición de cada uno de los patios.

2 Configuraciones de los barrajes

Para el desarrollo de esta aplicación se tuvieron en cuenta únicamente las configuraciones reconocidas por la CREG 097 de 2008 [1]:

- Barra Sencilla
- Barra Principal y transferencia
- Doble Barra
- Doble Barra con By Pass
- Anillo
- Interruptor y Medio

Cada una de estas configuraciones tiene sus respectivas características, que presentan ventajas y desventajas respecto a ciertos criterios como la continuidad del servicio, la versatilidad en la operación, la facilidad en el mantenimiento de los equipos y el costo de los mismos [2, 4].

Dentro de las consideraciones del diseño de una Subestación Eléctrica también es importante evaluar la confiabilidad, flexibilidad y seguridad que ofrezcan las configuraciones a emplear [5].

De acuerdo con éstos criterios y dependiendo del nivel de tensión que se vaya a manejar en determinada subestación se definirá la configuración más conveniente.

2.1 Configuraciones utilizadas en SUB-DESIGN

En la tabla 1 se muestra un cuadro comparativo describiendo los esquemas de barras, el número de dispositivos (ver nota adjunta en la tabla 1) y algunas características relevantes.[6, 7, 8]

3 Selección del nivel básico de aislamiento

Para encontrar el Nivel Básico de Aislamiento (BIL) es necesario conocer las tensiones máximas para el equipo (ver tabla 2):

Tabla 2: Tensiones máximas
Fuente:[2]

Tensiones nominales del sistema en kV		Tensión máxima para el equipo en kV
13,8		14,52
34,5		36,5
66	69	72,5
110	115	123
132	138	145
150	161	170
220	230	245
275	287	300
330	345	362
380	400	420
500		525
700 a 750		765

A partir de éstas tensiones máximas, se selecciona el BIL más adecuado. Entonces teniendo en cuenta las tablas tomadas de la IEC 60071-1 (ver tabla 3 y tabla 4), se escoge la tensión de soportabilidad normalizada al impulso tipo rayo en kV, la cual corresponde al BIL que se desea conocer [9].

Tabla 1: Cuadro comparativo entre los esquemas de barras.

Configuración	Ventajas	Desventajas	Número de Interruptores	Número de Seccionadores
Barra Sencilla	Requiere pocos dispositivos y poco espacio. Más económica y fácil de maniobrar	Para cualquier mantenimiento o falla, queda fuera de servicio toda la instalación. En caso de ampliación debe desenergizarse la subestación. Uso en redes radiales de poca importancia.	# de Lineas	$2 \times \#de\ Lineas$
Barra Principal y Transferencia	Bajo costo inicial y final. Esquema más flexible y seguro aumentando la confiabilidad y continuidad. Posibilidad de mantenimiento en una posición manteniendo sus protecciones.	Falla en barra ocasiona pérdida del suministro total. En el mantenimiento del interruptor de acoplamiento queda una barra fuera de servicio.	$1 + \#de\ Lineas$	$2 + 3 \times \#de\ Lineas$
Barra Doble	Las líneas se pueden conectar a cualquier barra. Cualquier barra puede llevarse a mantenimiento sin suspender el servicio.	La falla en una barra hace que se pierdan los circuitos conectados a ella mientras se conmutan a la otra barra. Interruptor de línea en mantenimiento produce la pérdida del circuito asociado. Necesita un interruptor de acoplamiento.	$1 + \#de\ Lineas$	$2 + 3 \times \#de\ Lineas$
Barra Doble con By Pass	El interruptor de acoplamiento protege la línea con interruptor en mantenimiento	Interruptor en mantenimiento se pierde el circuito asociado. Si la falla es en el circuito mientras el interruptor se encuentra en mantenimiento, se pierde el circuito con el acople y una de las barras. La falla en una barra hace que se pierdan los circuitos conectados a ella mientras se conmutan a la otra barra.	$1 + \#de\ Lineas$	$2 + 4 \times \#de\ Lineas$
Anillo	Económica y segura. Ningun circuito se pierde pero se rompe el anillo. En el mantenimiento de un interruptor se garantiza la protección mediante los interruptores restantes. No utiliza barra principal.	Mayor requerimiento de espacio. La apertura del anillo ocasiona que la corriente por los interruptores operativos sea mayor. Diseño de protecciones más complejo. En caso de falla en un circuito mientras se hace mantenimiento en otro, el anillo podría quedar dividido y dejar fuera de servicio a una de las partes y perderse la seguridad.	# de Lineas	$3 \times \#de\ Lineas$
Interruptor y Medio	Se puede hacer mantenimiento a cualquier interruptor o barraje sin suspender el servicio y sin alterar el sistema de protección. Flexibilidad de operación Alta confiabilidad Cualquier barra puede ser sometida a mantenimiento y la falla en una de ellas no deja fuera de servicio los circuitos alimentadores.	Requiere gran espacio y es la configuración más costosa. Sistema de protecciones de alta complejidad.	$1.5 \times \#de\ Lineas$	$4 \times \#de\ Lineas$

Nota:

La columna *Número de Seccionadores* no tiene en cuenta los seccionadores de puesta a tierra.

tablenamee

Tabla 3: Nivel Basico de Aislamiento - Rango 1

Fuente: [9]

Tensión máxima del equipo U_m [kV] (valor eficaz)	Tension de soportabilidad normalizada de corta duración a frecuencia industrial [kV] (valor eficaz)	Tensión de soportabilidad al impulso tipo rayo [kV] (valor pico)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		70
52	95	250
72,5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

Tabla 4: Niveles de aislamiento - Rango 2

Fuente: [9]

Tensión máxima del equipo U_m [kV] (valor eficaz)	Tensión de soportabilidad al impulso tipo maniobra			Tensión de soportabilidad normalizada al impulso tipo rayo [kV] (valor pico)
	Aislamiento longitudinal [kV] (valor pico)	Fase-tierra [kV] (valor pico)	Fase-Fase (relacion con el valor pico fase-tierra)	
300	750	750	1,50	850
	750	850	1,50	950
362	850	850	1,50	950
	850	950	1,50	1050
420	850	850	1,60	1050
	950	950	1,50	1175
	950	1050	1,50	1300
525	950	950	1,70	1175
	950	1050	1,60	1300
	950	1175	1,50	1425
765	1175	1300	1,70	1675
	1175	1425	1,70	1800
	1175	1550	1,60	1950
				2100

Una vez se tengan todos los datos de BIL para cada uno de los niveles de tensión que se vayan a manejar en la Subestación Eléctrica, se procede a realizar los cálculos necesarios para obtener las distancias dieléctricas y de seguridad mínimas que requiere el diseño de la Subestación.

4 Distancias de seguridad

De acuerdo al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), todas las subestaciones de patio

de alta y extra alta tensión deben cumplir con las distancias de seguridad presentadas a continuación [3]:

(Nota: Todas las distancias se manejarán en milímetros)

4.1 Altura de los equipos sobre el nivel del suelo

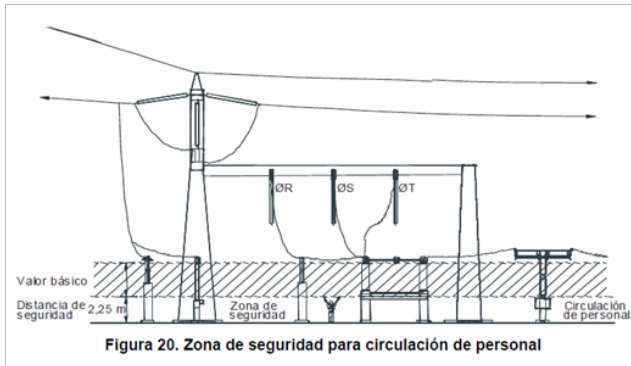


Figura 20. Zona de seguridad para circulación de personal

Fig. 1: Distancia de circulación de personal en una subestación.

Fuente: [3]

La altura mínima de los equipos sobre el nivel del suelo está compuesta por dos distancias tal como se muestra en la figura 1:

- Distancia de Seguridad
- Valor Básico

4.1.1 Distancia de Seguridad

Esta distancia corresponde a la altura de circulación de personal, que en otras palabras es la altura promedio de una persona con un brazo levantado, la cual equivale a 2.25 [m].

4.1.2 Valor Básico

Partiendo de los datos de la Tabla 5 [3], sus anotaciones, complementándola con su referencia (IEC 60071-1) y siguiendo las indicaciones que hay en ellas se obtiene el valor Básico.

La tabla 6 se incluye con el fin de proporcionar una información más completa de los valores de BIL y distancias mínimas que el RETIE no contiene para los valores de tensión mayores a 1550 [kV] (ver tabla 6), [10].

Tabla 6: Distancias en el aire de acuerdo con el BIL Fuente: [10]

Tensión de soportabilidad normalizada al impulso tipo rayo [kV] (valor pico)	Distancia mínima [mm]	
	Punta - estructura	conductor - estructura
20	60	-
40	60	-
60	90	-
75	120	-
95	160	-
125	220	-
145	270	-
170	320	-
250	480	-
325	630	-
450	900	-
550	1100	-
650	1300	-
750	1500	-
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

Nota - La tensión normalizada al impulso tipo rayo es aplicable a Fase - fase y fase - tierra.
Para fase - tierra, es aplicable la mínima distancia para conductor - estructura y punta - estructura.
Para fase - fase, se aplica la mínima distancia para punta - estructura.

Para $U_p \leq 1300$ [kV]

$$ValorBásico = Distancia\ mínima\ [mm] \times 1,1[mm]$$

Para $U_p > 1300$ [kV]

$$ValorBásico = Distancia\ mínima\ [mm] \times 1,06[mm]$$

Estas distancias se encuentran referenciadas para una altura de 1000 m.s.n.m. y ya que todas las Subestaciones Eléctricas se encuentran a diferentes alturas sobre el nivel del mar, se hace necesario corregir este valor por altura [2].

Tabla 5: Distancias de seguridad en el aire.

Fuente: [3]

U [kV] (valor pico)	Distancias de seguridad														
	Valor básico				Circulación de personal				Zona de trabajo en ausencia de maquinaria pesada				Circulación de vehículos		
	Distancia mínima según IEC [m]	Cantidad que se adiciona %	[m]	Valor básico [m]	Bajo conexiones		Zona de seguridad		Horizontal		Vertical		Zona de seguridad		Valor total [m]
					Zona de seguridad [m]	Valor total [m]	Zona de seguridad [m]	Valor total [m]	Valor total [m]	Zona de seguridad [m]	Valor total [m]	Galbo [m]	Tolerancia [m]		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(2)+(4)	(6)	(7)=(5)+(6)	(8)	(9)	(10)=(5)+(9)	(11)	(12)=(5)+(11)	(13)	(14)	(15)=(5)+(13)+(14)	
60	0,09	10	0,01	0,10	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
75	0,12	10	0,01	0,13	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
95	0,16	10	0,02	0,18	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
125	0,22	10	0,02	0,24	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
170	0,32	10	0,03	0,35	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
200	0,38	10	0,04	0,42	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
250	0,48	10	0,05	0,53	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
325	0,63	10	0,07	0,70	2,25	∅	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
380	0,75	10	0,08	0,83	2,25	3,08	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
450	0,90	10	0,10	1,00	2,25	3,25	2,25	1,75	∅	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
550	1,10	10	0,11	1,21	2,25	3,46	2,25	1,75	2,96	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
650	1,30	10	0,13	1,43	2,25	3,68	2,25	1,75	3,18	1,25	∅	∅	0,70	∅	∅
750	1,50	10	0,15	1,65	2,25	3,90	2,25	1,75	3,40	1,25	2,90	∅	0,70	∅	∅
850	1,70	10	0,17	1,87	2,25	4,12	2,25	1,75	3,62	1,25	3,12	∅	0,70	∅	∅
950	1,90	10	0,19	2,09	2,25	4,34	2,25	1,75	3,84	1,25	3,34	∅	0,70	∅	∅
1050	2,10	10	0,21	2,31	2,25	4,56	2,25	1,75	4,06	1,25	3,56	∅	0,70	∅	∅
1175	2,35	10	0,24	2,59	2,25	4,84	2,25	1,75	4,34	1,25	3,84	∅	0,70	∅	∅
1300	2,60	10	0,26	2,86	2,25	5,11	2,25	1,75	4,61	1,25	4,11	∅	0,70	∅	∅
1425	2,85	6	0,17	3,02	2,25	5,27	2,25	1,75	4,77	1,25	4,27	∅	0,70	∅	∅
1550	3,10	6	0,19	3,29	2,25	5,54	2,25	1,75	5,04	1,25	4,54	∅	0,70	∅	∅

Tabla 44. Distancias de seguridad en el aire, para las Figuras 20 y 21

Notas:

∅ El valor mínimo recomendado es 3 m, pero puede ser menor según las condiciones locales, procedimientos estandarizados de trabajo.

∅ Se determina en cada caso

$$d_h = d_{1000} + 0.0125 \times \left(\frac{h - 1000}{100} \right) \times d_{1000} \text{ [mm]} \quad (1)$$

h Altura sobre el nivel del mar de la Subestación Eléctrica en [m]

d_h Distancia dieléctrica a la altura de h m.s.n.m. o Valor Básico Corregido.

d_{1000} Distancia dieléctrica a la altura de 1000 m.s.n.m. o Valor Básico [mm].

Así pues la altura de los equipos sería la suma de la distancia de seguridad y el valor básico en términos de la altura m.s.n.m. de la Subestación a diseñar.

$$h_{equipos} = \text{Distancia mínima [mm]} + d_h \text{ [mm]} \quad (2)$$

4.2 Distancias mínimas fase - fase

Las distancias entre fases para todos los niveles de tensión se calculan como lo indica la tabla 7 [3] para conductores de suministro del mismo circuito.

Tabla 7: Distancia horizontal entre conductores soportados en la misma estructura.

Fuente: [3]

CLASE DE CIRCUITO Y TENSIÓN ENTRE LOS CONDUCTORES CONSIDERADOS	DISTANCIAS HORIZONTALES DE SEGURIDAD [cm]
Conductores de comunicación expuestos	15 7,5
Alimentadores de vías férreas	-
0 a 750 V (4/0 AWG o mayor calibre).	15
0 a 750 V (calibre menor de 4/0 AWG).	30
Entre 750 V y 8,7 kV.	30
Conductores de suministro del mismo circuito.	-
0 a 8,7 kV	30
Entre 8,7 y 50 kV	30 más 1 cm por kV sobre 8,7 kV
Más de 50 kV	Ningún valor especificado
Conductores de suministro de diferente circuito (3)	-
0 a 8,7 kV	30
Entre 8,7 y 50 kV	30 más 1 cm por kV sobre 8,7 kV
Entre 50 kV y 814 kV	72,5 más 1 cm por kV sobre 50 kV

Notas:

(1) No se aplica en los puntos de transposición de conductores.

(2) Permitido donde se ha usado regularmente espaciamento entre pines, menor a 15 cm. No se aplica en los puntos de transposición de conductores. (3) Para las tensiones que excedan los 57,5 kV, la distancia de seguridad debe ser incrementada en un 3% por cada 300 m en exceso de 1000 metros sobre el nivel del mar. Todas las distancias de seguridad para tensiones mayores de 50 kV se basarán en la máxima tensión de operación.

Para $8,7 \leq V \leq 50$ [kV]

$$d_{FF} = 8,7 + (V_{max} - 30) \times 10 [mm] \quad (3)$$

V_{max} = Tensión máxima de operación [kV].

Para $V > 50$ [kV]

Ya que para estas tensiones no hay ningún valor especificado, se toma la distancia de Conductores de suministro de diferente circuito, trabajándose entonces con la siguiente fórmula:

$$d_{FF1000} = 725 + (V_{max} - 50) \times 10 [mm] \quad (4)$$

V_{max} = Tensión máxima de operación [kV].

Ahora esta distancia debe ser incrementada así:

$$\%incremento = \frac{(h - 1000)}{300} \times 3 \quad (5)$$

$$d_{(FFIncrementada)} = d_{FF1000} \times \left(\frac{1 + incremento}{100} \right) [mm] \quad (6)$$

4.3 Altura de las barras colectoras

La altura de las barras colectoras sobre el nivel del suelo, es igual a la suma de la altura de los equipos sobre el nivel del suelo con la distancia fase-fase.

$$\text{Altura barras colectoras} = h_{Equipos} + d_{(FFIncrementada)} [mm] \quad (7)$$

4.4 Distancia entre equipos de patio

Acorde con el nivel de tensión que se vaya a manejar y las dimensiones de los equipos de cada nivel, se determina una distancia típica entre equipos del mismo campo [6], ver tabla 8.

Tabla 8: Distancias típicas entre equipos de patio.

Fuente: [6]

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

Las distancias mostradas en la tabla anterior corresponden a las distancias mínimas entre los centros de los equipos para los diversos niveles de tensión, en todas sus posibles combinaciones. Igualmente se pueden encontrar las distancias mínimas horizontales para las vías de circulación.

5 Aplicación en Autocad - Subdesign

Esta aplicación tiene su código base programado en Visual Basic for Application (VBA) que se encuentra dentro del software Autocad, con el fin de aprovechar las propiedades que posee. Igualmente, la aplicación puede ser utilizada únicamente con el software Autocad. Tiene como objetivo principal facilitar y agilizar el diseño de los planos de planta y de perfil de subestaciones convencionales de intemperie [4]. Los

patios de las subestaciones eléctricas a diseñar con la ayuda de “Subdesign” pueden manejar tensiones de 500 [kV], 230 [kV], 115 [kV] y 34,5 [kV]. Las configuraciones disponibles para trabajar, corresponden a las reconocidas por la CREG [1]

“Subdesign” expone dos opciones al usuario, la primera consiste en insertar los bloques predefinidos completos de las configuraciones disponibles y en la segunda el usuario cuenta con una librería desagregada de todos los dibujos de los equipos eléctricos para que elabore de manera manual los planos de planta y perfil.

5.1 Primera opción

El usuario deberá ingresar los datos de: altura sobre el nivel del mar, niveles de tensión de cada patio con su respectivo BIL y configuraciones con las que se va a trabajar. Con esta información la aplicación insertará plantillas para el completo desarrollo de:

- Vistas de Perfil de los Patios.
- Vistas de Planta de los Patios.
- Bahías de transformación.

5.1.1 Plano de vistas de perfil de los patios

Las plantillas para el desarrollo de este plano estarán en escala de 1:1, con todas las distancias de seguridad requeridas y todos los equipos eléctricos dibujados de acuerdo a las dimensiones de los catálogos del fabricante.

5.1.2 Plano de vistas de planta de los patios

Las plantillas correspondientes a estas vistas tendrán escala de 1:1, con todas las distancias en milímetros al igual que las vistas de perfil. Este plano a diferencia del plano de perfil tiene continuidad, es decir, cada una de las vistas va conectada siguiendo la conexión realizada de acuerdo al plano unifilar; dicha conexión deberá ser realizada manualmente por el usuario con ayuda de las herramientas de conexión presentadas en la aplicación, acorde a sus criterios (las distancias entre patios serán definidas por el usuario).

5.1.3 Bahías de Transformación

Las plantillas de las bahías de transformación a través de las cuales se conectan los patios de diferentes tensiones tendrán una escala de 1:1 con las distancias de

seguridad requeridas. Todos los equipos eléctricos excepto el transformador de potencia están dibujados de acuerdo con las dimensiones de los catálogos del fabricante; los transformadores de potencia podrán ser dimensionados por el usuario de la siguiente forma: Para la vista de perfil deberán ser ingresados los datos de alto y ancho de la cuba del transformador, la longitud de los bujes estará definida por la distancia fase - tierra; y para la vista de planta deberá ingresarse la profundidad del mismo. Dentro de los accesorios que posee el transformador, la cantidad de ventiladores y radiadores será modificable.

5.2 Segunda opción

Como fue indicado anteriormente, el usuario podrá acceder a todos los dibujos de los equipos eléctricos, interruptores, seccionadores, transformadores de potencial, transformadores de corriente, DPS y demás; todos a escala 1:1 dimensionados de acuerdo con los catálogos del fabricante. Con ellos el usuario creará manualmente los planos de planta y de perfil, definiendo la posición y distancias entre equipos bajo criterio propio. Para esto se deberá tener un amplio conocimiento sobre el dimensionamiento de subestaciones y acerca de las herramientas que ofrece AutoCAD en general.

Nota: es importante aclarar que todas las distancias y dimensiones de los planos que proporciona la aplicación en AutoCAD están en milímetros. Todos los cálculos de las distancias de seguridad que realiza la aplicación están hechos con base a las exigencias del RETIE, la IEC60071-1 y IEC60071-2.

Una vez los planos de planta y perfil estén finalizados se podrá obtener el perímetro y por consiguiente el área que ocupará la subestación eléctrica. Estos son datos indispensables para el desarrollo del sistema de puesta a tierra.

5.3 Diagramas unificables

“SUBDESIGN” contiene también plantillas para desarrollar los diagramas unificables de acuerdo con los tipos de configuraciones que escoja el usuario. Al igual que con las conexiones para los planos de planta, en el caso de los diagramas unificables éstas conexiones se realizan a través de los conectores de manera manual.

5.4 Presentaciones

Para la mejor presentación y visualización de los planos de planta y perfil de una subestación eléctrica,

la aplicación tiene la opción de ubicar los planos finalizados en un rótulo para un tamaño de papel ISO B1 (1000 x 707 mm) donde el usuario podrá localizar los dibujos según su discernimiento y ajustar la escala de impresión.

5.5 Ejemplo: Diseño de una subestación de 500kV y 230kV

La subestación ejemplo consiste en dos patios, el primero con un nivel de tensión de 500kV y el segundo de 230kV.

Paso 1: se crea un nuevo proyecto introduciendo la información necesaria. (Ver figura 2)

Fig. 2: Información general subestación ejemplo.

Paso 2: elegir la configuración en un diagrama unifilar para el primer patio, en este caso el de 500kV. Se puede añadir nuevamente para extender el número de salidas de línea. (Ver figura 3)

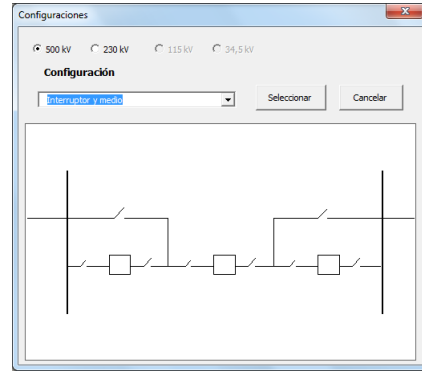


Fig. 3: Configuración Interruptor y medio - patio 1 500kV.

Paso 3: Se añade la bahía de transformación de 500kV a 230kV, desde la misma ventana de configuraciones y se inserta en una salida de línea.

Paso 4: Para insertar la configuración de 230kV, se selecciona de la misma manera y se inserta en la salida de la bahía de transformación. (Ver figura 4)

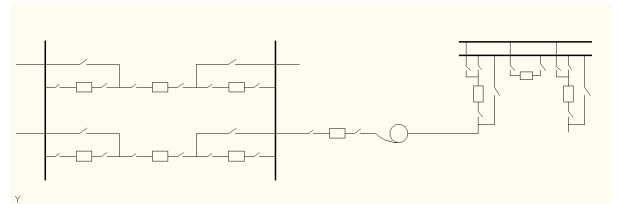


Fig. 4: Diagrama unifilar completo - ejemplo.

Paso 5: Teniendo el diagrama unifilar se pueden comenzar a realizar las vistas de planta y de perfil. Ahora se vá al icono de vista de planta "planta" y se inserta en el modelo la configuración para el primer patio. Después se añade un bloque más para completar el número de salidas propuesto en el unifilar. (Ver figura 5)

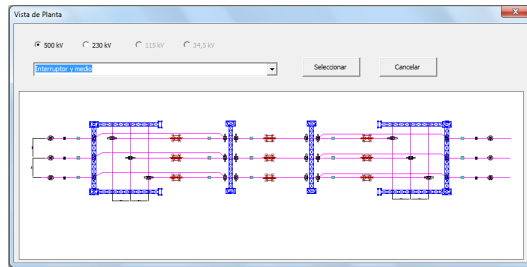


Fig. 5: Vista de planta - Interruptor y medio 500 kV

Paso 6: Se procede a insertar la bahía de transformación de manera que se acomode a una de las salidas de la configuración de interruptor y medio, para eso se utilizan las herramientas de simetría y giros de 90°, y finalmente se procede a unir los bloques mediante líneas rectas o arcos. (Ver figura 6)

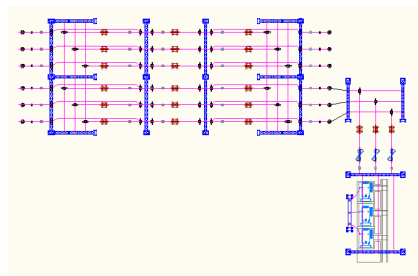


Fig. 6: Plano de planta. IM 500 kV y bahía de transformación

Paso 7: Hace falta añadir el patio de 230kV, para eso, se inserta el bloque seleccionando la configuración de doble barra en la ventana de *Vista de planta*. (Ver figura 7)

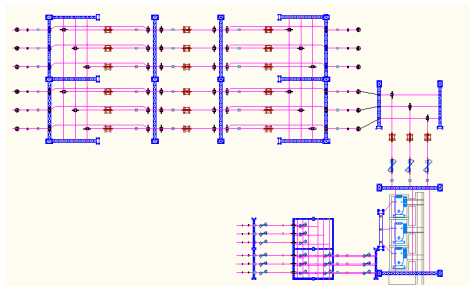


Fig. 7: Plano de planta IM 500 kV y patio 230 kV - 1

Paso 8: Si es necesario, se deben insertar estructuras de soporte para los cables de conexión

entre la barra y la salida del transformador. Los soportes se encuentran en la pestaña *Equipos*, en la categoría *Estructuras de soporte*. (Ver figura 8)

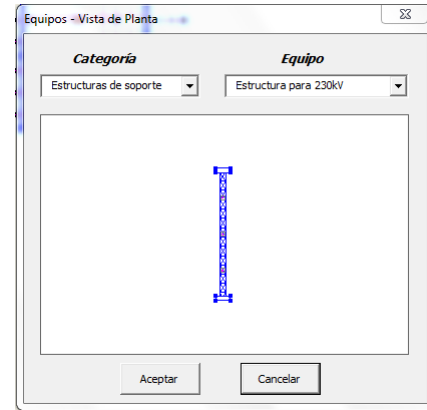


Fig. 8: Estructuras de soporte

Con las conexiones hechas para los dos patios, se dá por concluida la vista de Planta de la subestación con patios de 500 y 230 [kV]. (Ver figura 9)

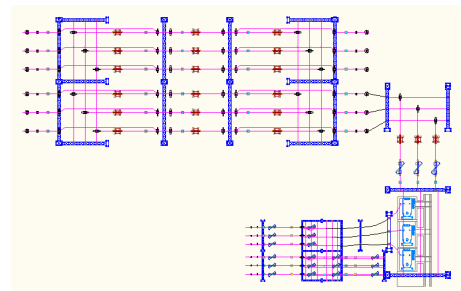


Fig. 9: Vista de planta final de la subestación ejemplo.

Paso 9: Las vistas de perfil están prediseñadas para cada una de las configuraciones disponibles en *Planta*, entonces se deben insertar de la misma manera. Se abre la ventana de perfil y se buscan las plantillas con el mismo nombre de las agregadas anteriormente en planta y se ubica cada una en la posición deseada por el usuario. (Ver figura 10 y figura 11)

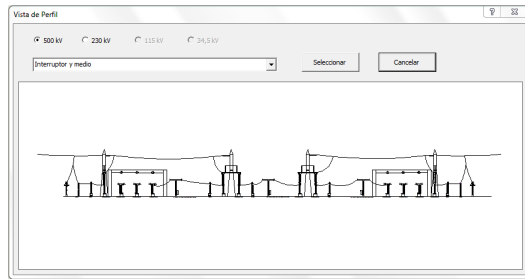


Fig. 10: Perfil Interruptor y medio 500 kV - ejemplo.

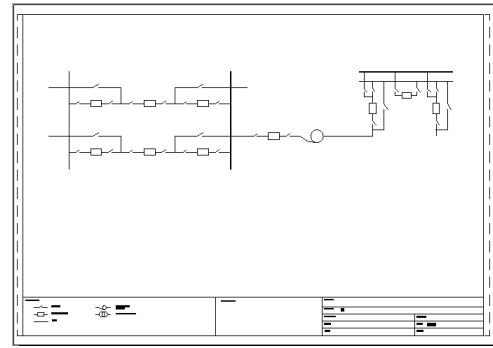


Fig. 12: Plano unifilar

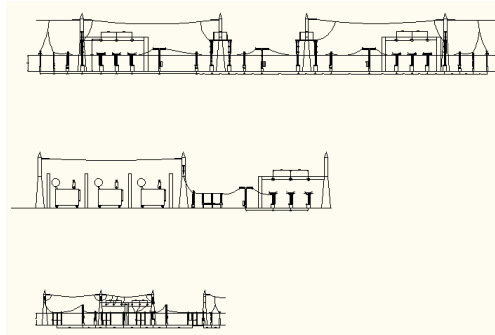


Fig. 11: Vistas de perfil - Ejemplo.

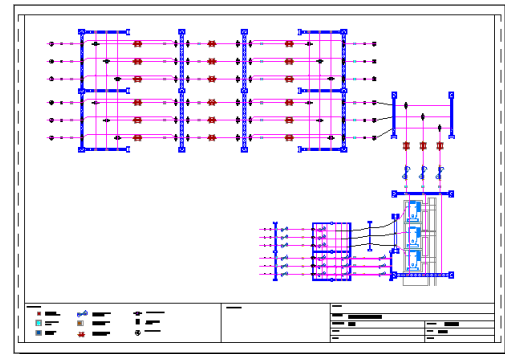


Fig. 13: Plano Vista de planta



Fig. 14: Plano Vistas de perfil.

Paso 10: Para visualizar cada uno de los planos por aparte, se observan las 3 presentaciones: Plano unifilar, Plano Vistas Perfil y Plano Vista de Planta. Al hacer doble click en la ventana o vista de la presentación, o usando el comando `_mspace` se ubican los dibujos correspondientes, y se escalan con el comando `_zoom` haciendo un recuadro encerrando los objetos que se deseen ubicar en el plano. La escala del plano o de ventana aparece en la parte inferior izquierda de la pantalla. (Ver figura 12, figura 13 y figura 14)


Paso 11: El manejo de escalas se realiza a través de la personalización de las mismas. Si la escala de ventana que aparece no es una escala normalizada, se presiona el icono de sincronización  y se hace el encuadre de la imagen. (Ver figura 15)



Fig. 15: Ajuste de escala.

6 Conclusiones

Con esta aplicación se logra agilizar el proceso de diseño y elaboración de diagramas unifilares, vistas de planta y perfil de las subestaciones eléctricas a la intemperie convencionales de una manera sencilla y fácil de utilizar por medio del software base de diseño: Autocad. La cuál es una herramienta muy didáctica con la capacidad de realizar objetos en un alto nivel de complejidad.

Subdesign calcula las distancias fase - fase, fase - tierra, con su respectiva corrección por altura sobre el nivel del mar en que sea planeada la subestación y se acoge a los reglamentos técnicos exigidos por la regulación colombiana y además se propone una separación de los equipos de patio típicas [6] que pueden ser modificadas por el usuario en cualquier momento en cada una de las plantillas presentadas para la elaboración de los planos. Se deja a opción del usuario crear sus propias plantillas con otros elementos incluidos en la biblioteca de equipos con sus diferentes vistas, tomados igualmente de catálogos de fabricantes. Subdesign está en la capacidad de guardar los proyectos no finalizados en la primera sesión, para ello utiliza un sistema de lectura de variables a través de un archivo de texto guardado desde la ficha de “*Subestaciones Eléctricas*”

Es importante anotar que todos los bloques y plantillas estan hechos a escala 1:1 en unidades de milímetros, por ello es mejor utilizar las herramientas de medida especificadas como: distancias, área y perímetro, necesarias para cualquier modificación posterior y también para tener en cuenta en el diseño de la malla de puesta a tierra.

Referencias

- [1] Ministerio de Minas y Energía. 2008. Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Subestaciones Convencionales. Resolución 097.
- [2] Raúll Martín José. 1990. Diseño de Subestaciones Eléctricas. México. Capítulos 1 y 2.

- [3] Ministerio de Minas y Energías. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. 2008. Resolución Número 18 1294. Colombia.

- [4] Pérez Carretero Ignacio . 2007. Modelado y Comparativa Técnico-Económica de Subestaciones. Universidad Pontificia Comillas. Madrid. Capítulo 2.

- [5] Linares Escobar Javier Andrés . 2009. Diseño de Subestaciones de Media Tensión. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, Colombia. Capítulo 2.

- [6] Mejía Villegas S. A. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 1991. Segunda Edición. Colombia. Capítulos 2, 3 y 4.

- [7] Arroyo Sánchez José Manuel. Universidad de Castilla. La Mancha, España. Página 66 a 90.

- [8] Vargas T. Hermann R. Apunte de clase Subestaciones Eléctricas. Universidad Industrial de Santander.

- [9] International Standard. International Electrotechnical Commission. IEC 60071-1. 1993. Séptima edición. Páginas 43 y 45.

- [10] International Standard. International Electrotechnical Commission. IEC 60071-2. 1996. Tercera edición. Página 121.



Ángel Cáceres Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia.



Adriana Ortiz Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia.



Herрман Vargas Ingeniero Electricista UIS, Magíster en Potencia Eléctrica UIS. Doctor en Ingeniería Eléctrica por la UPCO Madrid, España. Profesor Titular UIS Investigador GISEL. Áreas de trabajo: Calidad de suministro de energía, Estabilidad en sistemas de potencia, Mercados de energía. Bucaramanga, Colombia.



Sergio Gualdrón Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia.



Fernando Gomez Ingeniero electricista UIS, Candidato a Magíster en Maestría en Ingeniería Eléctrica UIS. Investigador GISEL. Áreas de trabajo: Calidad de suministro de energía y Estabilidad en sistemas de potencia. Bucaramanga, Colombia.

Resumen

Título: APLICACIÓN PARA EL CÁLCULO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES DE ALTA Y EXTRA ALTA TENSIÓN^a

Autores:

ADRIANA MARCELA ORTIZ ROA^b

ÁNGEL DAVID CÁCERES RINCÓN^c

SERGIO ANDRÉS GUALDRÓN MARCIALES^d

Palabras clave:

Sistema de puesta a tierra, tensión de paso, tensión de contacto, resistividad.

Descripción:

Este artículo presenta el cálculo de la malla de puesta a tierra de una subestación mediante una herramienta informática desarrollada en el entorno Visual Basic. La aplicación GROUNDGRID1.0 se ciñe al procedimiento indicado en el Standard IEEE 80 – 2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”. Y los métodos para el cálculo de la resistividad del terreno por Wenner y Schlumberger-Palmer.

^aTrabajo de grado en la modalidad de Investigación

^bEstudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. E-mail: adriana.ortiz1@correo.uis.edu.co

^cEstudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. E-mail: angel.caceres@correo.uis.edu.co

^dEstudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. E-mail: sergio.gualdron1@correo.uis.edu.co

Director: Hermann Raul Vargas Torres E-mail: hrvargas@uis.edu.co

Codirector: Fernando Gomez Tapias. E-mail: fergota2003@yahoo.com.

Abstract

Title: APPLICATION SOFTWARE FOR THE CALCULUS OF GROUNDING GRIDS OF HIGH AND EXTRA-HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS^a

Authors:

ADRIANA MARCELA ORTIZ ROA^b

ÁNGEL DAVID CÁCERES RINCÓN^c

SERGIO ANDRÉS GUALDRÓN MARCIALES^d

Keywords:

Grounding system, step voltage, touch voltage, resistivity.

Description:

This article presents the calculus of grounding grids of an electrical substation through an informatic tool developed in Visual Basic. The application GROUNDGRID 1.0 follows the indicated procedure on the Standard IEEE 80 – 2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” and the Wenner and Schlumberger-Palmer methods, for the calculus of the ground resistivity.

^aFinal undergraduate project developed in the research modality.

^bElectric engineer student of Universidad Industrial de Santander. E-mail: adriana.ortiz1@correo.uis.edu.co

^cElectric engineer student of Universidad Industrial de Santander. E-mail: angel.caceres@correo.uis.edu.co

^dElectric engineer student of Universidad Industrial de Santander. E-mail: sergio.gualdron1@correo.uis.edu.co

Director: Director: Hermann Raul Vargas Torres E-mail: hrvargas@uis.edu.co

Subdirector: Fernando Gomez Tapias. E-mail: fergota2003@yahoo.com.

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Universidad Industrial de Santander.

7 Introducción

El cálculo de un buen sistema de puesta a tierra en una subestación eléctrica consiste en adaptar las tensiones de paso y de contacto del terreno y superficies expuestas a los valores tolerables o admisibles por el cuerpo humano. También se busca equipotencializar el terreno tomándolo como una referencia para evitar descargas no contempladas en el diseño y mal funcionamiento de los equipos, brindando mayor seguridad y confiabilidad en el sistema. Debido a la extensión de los terrenos utilizados en la construcción de subestaciones se emplean sistemas de mallas de puesta a tierra con el procedimiento que se expone en la norma IEEE 80-2000 basados en los criterios de seguridad antes mencionados para sistemas con frecuencias entre 50-60 Hz.

8 Fundamento teórico

8.1 Metodología IEEE 80 - 2000

Esta metodología se aplica generalmente al diseño de mallas de puesta a tierra en subestaciones, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Geometría Cuadrada, Rectangular o en forma de L
- Distancias de separación entre conductores paralelos entre 3 m y 15 m
- Profundidades típicas de la malla entre 0,5 m y 1,5 m
- Calibre conductores típico entre 2/0 AWG y 500 kcmil
- Tamaño de la retícula interna de la malla uniforme
- Se pueden incluir electrodos verticales (varillas) siempre y cuando estén ubicadas uniformemente en la periferia o en el área total de la malla.
- Aplica un modelo del terreno homogéneo, con un solo valor de resistividad.

8.2 Medición de resistividad

La resistividad del terreno es un dato importante antes de comenzar el cálculo de la malla de puesta a tierra, ésta se obtiene a través de la aplicación del método de Wenner [1] o el método Schlumberger-Palmer [1].

8.2.1 Método Wenner

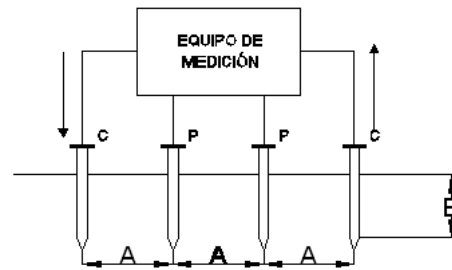


Fig. 16: Método Wenner

Fuente: [2]

En este método se entierran cuatro electrodos separados equidistantes en línea recta una distancia “a” y profundidad “b”. El potencial medido desde los electrodos centrales se divide en la corriente medida en los puntos externos, de donde se obtiene la resistencia R propia del método. Entonces aplicando la ecuación (8) se encuentra la resistividad aparente del terreno.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2+4b^2)}} - \frac{a}{\sqrt{(a^2+b^2)}}} \quad (8)$$

Donde:

- ρ Resistividad del Terreno [Ω-m]
- R Resistencia medida del terreno [Ω]
- a Distancia entre electrodos o varillas [m]
- b Profundidad de enterramiento de los electrodos [m]

8.2.2 Método Schlumberger - Palmer

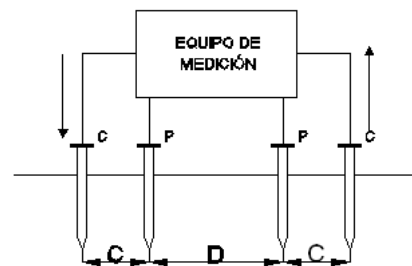


Fig. 17: Método Schlumberger - Palmer

Fuente: [2]

El método Schlumberger-Palmer es una versión modificada del método Wenner en donde las distancias de

los electrodos de corriente y tensión son diferentes. Es más corta la distancia entre los electrodos de inyección de corriente y los electrodos de medición de tensión, que la distancia entre los de tensión. La tensión medida en este caso será mayor que utilizando el método de Wenner siendo esto una ventaja, ya que los valores medidos no están restringidos a la precisión del aparato de medida.

El procedimiento para aplicar el método y obtener el modelo del terreno, consiste en aumentar de manera progresiva la separación de los electrodos a partir de un punto central fijo denominado punto de máxima exploración.

La ecuación para calcular la resistividad es (9)

$$\rho_s = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad (9)$$

Donde:

- ρ_s Resistividad aparente del suelo [Ω -m]
- R Resistencia medida del terreno [Ω]
- c Distancia entre electrodos de corriente y tensión [m]
- d Distancia entre electrodos de tensión [m]

La utilización de estos métodos se encuentra limitada a la potencia del instrumento [1].

Para realizar una correcta medición de la resistividad del terreno, este debe estar libre de cualquier otro sistema de puesta a tierra, electrodos o mallas que pueden influir negativamente en los resultados del cálculo de la resistividad [3].

8.3 Tensiones Tolerables por el Cuerpo

El cálculo de la malla de puesta a tierra basa su fundamento en conseguir que las diferencias de potenciales que pueden llegar a aparecer nunca sobrepasen los valores permisibles por el cuerpo humano. Para esto es necesario calcular dos tensiones que aparecen dentro de la subestación al momento de ocurrir una falla, la tensión de paso y la tensión de contacto.

8.4 Tensión de Paso Tolerable

Es la diferencia de potencial que aparece entre dos puntos de un terreno, que pueden ser tocados simultáneamente por una persona con una diferencia de un metro aproximadamente. Su valor permisible para una persona de 50 kg y otra de 70 kg esta dado por las ecuaciones (10) y (11) [4]:

50 kg

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

70 kg

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (11)$$

Donde:

E_{step} Tensión de Paso [V]

C_s Factor de Reducción

ρ_s Resistividad de la gravilla [Ω -m]

t_s Tiempo de duración de la falla [s]

8.5 Tensión de Contacto Tolerable

Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y un punto de una estructura metálica que pueda ser tocado simultáneamente por una persona, su valor permisible para una persona de 50 kg y 70 kg esta dado por las ecuaciones (12) y (13) [4]:

50 kg

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (12)$$

70 kg

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

Donde:

E_{touch} Tensión de Contacto [V]

C_s Factor de Reducción

ρ_s Resistividad de la gravilla [Ω -m]

t_s Tiempo de duración de la falla [s]

Para encontrar el valor del factor de reducción C_s [5] se aplica la ecuación (14) :

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (14)$$

Donde:

ρ Resistividad del Terreno [Ω -m]

ρ_s Resistividad de la gravilla [Ω -m]

h_s Espesor de la gravilla [m]

8.6 Diseño de una malla de puesta a tierra

El diseño de una malla a tierra se ciñe por los siguientes pasos:

8.6.1 Cálculo de corriente que circula por la malla

El cálculo de la corriente de falla que circula por la malla se puede determinar con la ecuación (15):

$$I_G = I \cdot S_f \cdot F_{cre} \cdot D_f \quad (15)$$

Donde

I_G Corriente circulará por la malla [A]

D_f Factor de decremento [1]

F_{cre} Factor de crecimiento [6]

S_f Factor de división de corriente

Si el diseño no tiene factor de división de corriente entonces $S_f = 1$. El factor de división se ve afectado si los cables de guarda que llegan a la subestación se conectan paralelamente a la malla. Para conocer el valor de S_f se aplican las ecuaciones (16), (17), (18), (19), (20), y (21):

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{(Z_{eq} + R_G)} \right| \quad (16)$$

Donde:

R_G Resistencia de la malla de puesta a tierra [Ω] [7]

$$R_G = \rho \times \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (17)$$

Los valores máximos de R_G varían de acuerdo con el tipo de subestación de estudio. A continuación se

muestra en la tabla 1 los valores máximos permitidos de resistencia de puesta a tierra según el tipo de subestación.

Tabla 9: Valores máximos resistencia de puesta a tierra

Fuente: [8]

Subestación	Valor máximo de puesta a tierra [Ω]
Alta y extra alta tensión	1
Media tensión	10

$$Z_{eq} = \frac{\sqrt{Z_{CableGuarda} \times R_{Equivalente}}}{C_{LineasGuarda}} \quad (18)$$

Donde:

$Z_{CableGuarda}$ Impedancia cable de guarda [Ω /km]

$C_{LineasGuarda}$ Cantidad de líneas de guarda conectadas a la malla.

$$R_{Equivalente} = \frac{R_{Torre}}{C_{Torres/Kilometro}} \quad (19)$$

Donde:

$C_{(Torres/Kilometro)}$ Cantidad de torres por kilometro

$$R_{Torre} = \frac{\rho}{(2 \cdot \pi \cdot B)} \quad (20)$$

Donde:

$$B = \sqrt{\frac{A_{Torre}}{\pi}} \quad (21)$$

Donde:

A_{Torre} Área de la torre de transmisión [m²]

8.6.2 Selección conductor de la malla

Para calcular la sección del conductor se utiliza la ecuación de Sverak[9]:

$$A_c = \frac{I_G}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{I_s \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) \cdot \log \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (22)$$

Donde:

- A_c Sección del Conductor [mm]
 I_G Corriente circulará por la malla [A]
 $TCAP$ Capacidad térmica por unidad de volumen
 α_r Coeficiente térmico de resistividad a 20 °C [1/°C]
 ρ_r Resistividad del conductor de tierra a 20 °C [$\mu\Omega\text{-cm}$]
 k_o Inverso de Coeficiente térmico a 0 °C [°C]
 T_m Máxima temperatura permisible del material [°C]
 T_a Temperatura ambiente [°C]

El valor de T_m también varía de acuerdo a los conectores a utilizar en la malla de puesta a tierra.

Tabla 10: Dependencia de T_m respecto al tipo de conexión

Fuente: [10]

Tipo de Conexión	T_m [°C]
Pernados y compresión	250-350
Abrazadera	450
Soldadura exotérmica	Temperatura fusión dconductor

Tabla 11: Constantes de los materiales

Fuente: [3]

Descripción	α_r a 20°C [1/°C]	K_{0a} 0°C [°C]	T_m [°C]	ρ_r a 20°C [$\mu\Omega\text{-cm}$]
Cobre puro	0,00393	234	1083	1,72
Cobre comercial	0,00381	242	1084	1,78
Cable de cobre recubierto de acero	0,00378	245	1084	4,40
Cable de cobre recubierto de acero	0,00378	245	1084	5,86
Varilla de cobre recubierto de acero	0,00378	245	1084	8,62
Aluminio grado EC	0,00403	228	657	2,86
Aleación de aluminio 5005	0,00353	263	652	3,22
Aleación de aluminio 6201	0,00347	268	654	3,28
Cable de aluminio recubierto de acero	0,00360	258	657	8,48
Acero 1020	0,00160	605	1510	15,9
Varillas de acero inoxidable	0,00160	605	1400	17,5
Varilla de zinc cubierta de acero	0,00320	293	419	20,1
Acero inoxidable 304	0,00130	749	1400	72,0

8.6.3 Determinación de las tensiones reales de paso y contacto

Para la determinación de las tensiones es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Geometría de la malla y sus dimensiones: Cuadrada, Rectangular y en forma de L.
- Separación entre conductores (D [m])
- Profundidad de Enterramiento (h [m])
- Espesor de la gravilla (h_s [m])
- Longitud del conductor (L_C [m])

Tensión de contacto La tensión de contacto se obtiene como el producto de la resistividad del terreno, un factor geométrico (K_m)[7] y un factor de corrección (K_i)[7], el cual tiene en cuenta el incremento de la densidad de corriente en los extremos de la malla y la densidad promedio de corriente por unidad de longitud (I_G/L), se calcula mediante la ecuación (23):

$$E_m = \frac{\rho \cdot k_m \cdot k_i \cdot I_G}{L_M} \quad (23)$$

Donde:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{k_{ii}}{k_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (24)$$

$$K_{ii} = 1 \quad (25)$$

Para mallas con varillas a lo largo del perímetro, o en las esquinas.

$$K_{ii} = \frac{1}{2n^{\frac{2}{n}}} \quad (26)$$

Para mallas sin varillas

$$k_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (27)$$

Con h_0 igual a 1 m

D Distancia entre conductores paralelos [m]
d Diámetro del conductor seleccionado[m]
n Numero de conductores paralelos

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (28)$$

Donde:

$$n_a = \frac{(2 \cdot L_c)}{L_p} \quad (29)$$

$$n_b = 1 \quad (30)$$

Para mallas cuadradas

De otra manera:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (31)$$

$$n_c = 1 \quad (32)$$

Para mallas cuadradas y rectangulares

De otra manera :

$$n_c = \left[\frac{L_X \cdot L_Y}{A} \right]^{\frac{0,7A}{L_X \cdot L_Y}} \quad (33)$$

$$n_d = 1 \quad (34)$$

Para mallas cuadradas, rectangulares y en forma de L

Donde:

L_C Longitud del conductor [m]

L_P Perímetro de la malla [m]

A Área de la malla [m²]

L_X Máxima longitud de la malla en la dirección X

L_Y Máxima longitud de la malla en la dirección Y

Para las configuraciones con varillas a lo largo del perímetro o en las esquinas LM, se calcula mediante la ecuación (35):

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (35)$$

Donde :

L_r Longitud de cada varilla [m]

L_R Longitud total de todas las varillas [m]

$$L_R = L_r \cdot C_V \quad (36)$$

Donde :

C_V Cantidad de varillas

Si el diseño no contiene varillas o electrodos de puesta a tierra en el perímetro o en las esquinas L_M es igual a la longitud total del conductor (L_C).

Tensión de paso La tensión de paso se obtiene como el producto de la resistividad del terreno, un factor geométrico (K_s)[7] y un factor de corrección (K_i)[7], el cual tiene en cuenta el incremento de la densidad de corriente en los extremos de la malla y la densidad promedio de corriente por unidad de longitud (I_G/L), se calcula mediante la ecuación (37):

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (37)$$

Donde:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (38)$$

D Distancia entre conductores paralelos [m]

d Diámetro del conductor seleccionado[m]

n Numero de conductores paralelos

La longitud efectiva L_s con varillas se calcula con la ecuación (39):

$$L_s = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (39)$$

La longitud efectiva L_s sin varillas se calcula con la ecuación (40):

$$L_s = 0,75 \cdot L_C \quad (40)$$

9 Programa de cálculo

Para observar el procedimiento seguido por el programa, se considera un ejemplo, en el que se calcula la malla de puesta a tierra de una subestación con las siguientes consideraciones:

Terreno rectangular Largo: 84[m]

Ancho: 80 [m]

Separación entre conductores paralelos: 7 [m]

Corriente de falla: 3170 [A]

Resistividad de la gravilla: 2500 [Ω -m]

Temperatura ambiente: 40 [°C]

Tiempo de duración de la falla: 0,5 [s]

Espesor de la gravilla: 0,102[m]

Enterramiento de los conductores: 0,5 [m]

Factor de decremento: 1,125

Factor de crecimiento: 1,5

Cantidad de electrodos: 45

Longitud del electrodo: 2,4 [m]

Material: Cobre comercial

Para calcular la resistividad del terreno se realizaron 5 medidas al terreno aplicando el método Wenner, con una profundidad de 0,6 [m], y se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 4:

Tabla 12: Medidas de resistividad

Medida	Separación a [m]	Medida Voltímetro [V]	Medida Amperímetro [A]
1	2	160,1057	5
2	4	74,5534	5
3	6	53,7177	5
4	8	37,237	5
5	10	29,02311	5

Una vez instalado el programa se accede al mismo a través de AutoCAD, en la cinta de opciones “Subestaciones Eléctricas”, icono “Malla”, aparece una ventana como la que se muestra en la figura 3. En esta ventana el usuario selecciona el modo de ingresar los datos, automáticamente o manualmente. En este caso será manualmente. En la ventana siguiente se escoge la geometría del terreno de la malla; al seleccionar alguno de los casos, el programa pide al usuario las dimensiones necesarias.

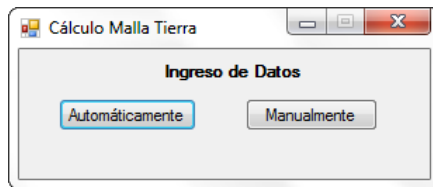


Fig. 18: Interfaz inicial

Ya ingresados los datos geométricos de la malla y después de haber hecho “Click” en “Siguiente” aparecerá una ventana en la cual el usuario selecciona si desea previamente antes del diseño, calcular la resistividad del terreno aplicando alguno de los dos métodos dispuestos en el programa, ver figura 4.

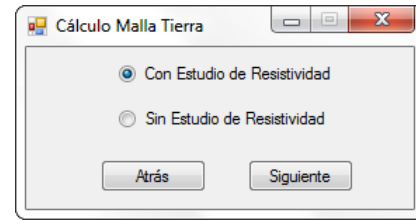


Fig. 19: Selección con o sin estudio de Resistividad

Para este ejemplo se va a realizar “Con estudio de resistividad”, en la ventana siguiente se escoge por cual método se va realizar el estudio, el usuario podrá elegir entre el método Wenner o Schlumberger-Palmer, para este ejemplo se realiza con Wenner. En la figura 5 se muestra la ventana en la que se calcula la resistividad aplicando el método Wenner.

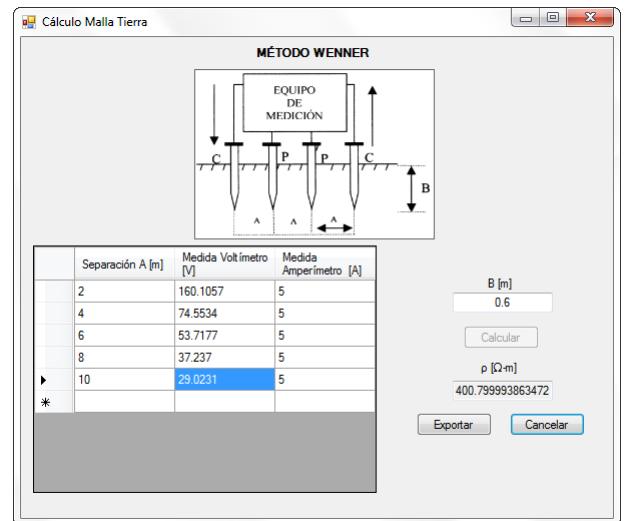


Fig. 20: Método Wenner

Una vez calculada la resistividad del terreno este valor se exporta con el botón de “Exportar” que aparece en la ventana. Ya exportado se muestra otra ventana en la que el usuario selecciona el tipo de material a utilizar, Figura 6.

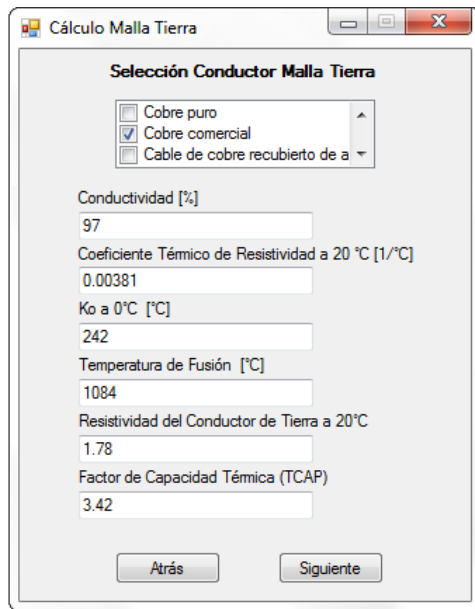


Fig. 21: Selección material

Ya seleccionado el material de conductor se procede a ingresar los datos tales como:

- Corriente
- Resistividad del Terreno (Este valor ya fue calculado aplicando el método Wenner)
- Resistividad de la gravilla
- Temperatura ambiente
- Profundidad de la malla
- Espesor de la gravilla
- Tiempo de duración de la falla
- Factor decremento
- Factor crecimiento
- Espaciamiento entre conductores

Además en esta ventana se escoge si el diseño contiene o no electrodos de puesta a tierra, si va aplicar factor de división de corriente y como lo va a hacer, conociendo el valor del factor o calculando con los datos de los cables de guarda de la subestación. En la ventana siguiente se introducen los datos de los electrodos y los del factor de división de acuerdo a la selección hecha en la ventana anterior. Ya después de introducidos los datos necesarios se hace click en

siguiente y el programa muestra una ventana tanto con los datos introducidos por el usuario como los calculados. En este formulario se observa si el diseño inicial cumple con los valores permisibles por el cuerpo humano.

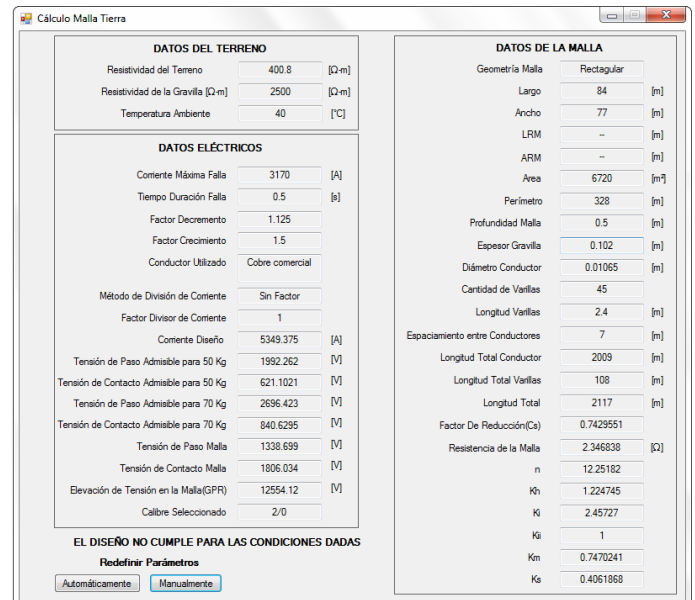


Fig. 22: Resultados

Si el diseño no cumple con los valores permisibles. La aplicación le permite al usuario redefinir los parámetros de manera manual o automática. Si selecciona “Manual”, el programa lleva al usuario a la ventana donde seleccionó la geometría del terreno y sus dimensiones, de ahí en adelante se pueden realizar los cambios que se deseen, por el contrario si selecciona “Automática”, el programa busca por si solo la mejor configuración para que el diseño cumpla con los requisitos mínimos de seguridad.

Después que el diseño cumpla, aparece el botón de finalizar, al hacer “Click” se muestra la ventana final del programa, aquí se ve la geometría de la malla con los conductores paralelos y los electrodos de puesta a tierra en el perímetro de esta. Aquí el usuario puede guardar los resultados de la malla en un archivo de texto que será ubicado donde el usuario así lo decida, además se puede guardar la imagen.

A continuación se muestra los resultados del archivo de texto así como la imagen guardada por el usuario

RESULTADOS MALLA TIERRA

DATOS DE DISEÑO

Largo [m]: 84
Ancho [m]: 78
Conductor Seleccionado: Cobre comercial
Conductividad [%]: 97
Coeficiente Térmico de Resistividad a 20 °C [1/°C]: 0,00381
Ko a 0°C [°C]: 242
Temperatura de Fusión [°C]: 1084
Resistividad del Conductor de Tierra a 20°C: 1,78
Factor de Capacidad Térmica (TCAP): 3,42
Corriente [A]: 3170
Resistividad Terreno: 400,8
Resistividad Gravilla: 2500
Temperatura Ambiente [°C]: 40
Profundidad Malla [m]: 0,5
Espesor Grava [m]: 0,102
Tiempo Duración Falla [s]: 0,5
Factor de Decremento: 1,125
Factor de Crecimiento: 1,5
Espaciamiento entre Conductores [m]: 3
Cantidad de Electrodo: 52
Longitud Electrodo [m]: 2,4

DATOS CALCULADOS

Área [m]: 6552
Lp [m]: 324
Factor de Reducción (Cs): 0,7429551
Tensión de Paso Para 50Kg [V]: 1992,262
Tensión de Contacto Para 50Kg [V]: 621,1021
Tensión de Paso Para 70Kg [V]: 2696,423
Tensión de Contacto Para 70Kg [V]: 840,6295
Longitud del Conductor [m]: 4530
Longitud Total de las varillas [m]: 124,8
Longitud Total [m]: 4654,8
Resistencia de la Malla: 2,270739
Factor División: 1
Corriente que Circulará por la Malla: 5349,375
Elevación de Tensión en la Malla [V]: 12147,04
Sección del Conductor Calculado [mm²]: 13,53817
Calibre Conductor Seleccionado: 600 MCM
Sección Conductor Seleccionado [mm²]: 304
Diámetro Conductor Seleccionado [m]: 0,0225
na: 27,96296
nb: 1,000343
nc: 1
nd: 1
n: 27,97256
Kh: 1,224745
Ki: 4,783939

Kii: 1
Lm: 4726,628
Ls: 3503,58
Km: 0,2860167
Ks: 0,5153589
Tensión de Paso [V]: 1508,739
Tensión de Contacto [V]: 620,6636
Corriente de soltar [A]: 32631,47

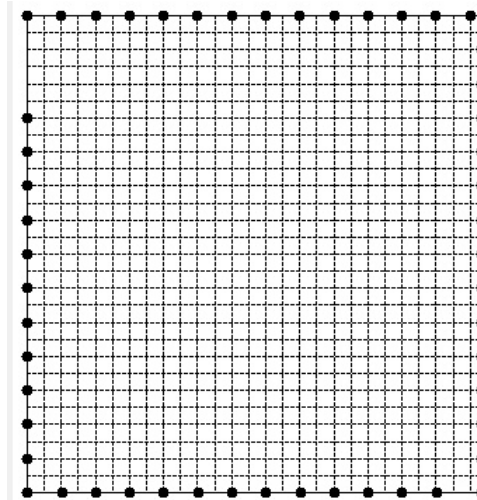


Fig. 23: Configuración malla diseño final

10 Conclusiones

Con la aplicación GROUNDGRID el cálculo de la malla de puesta a tierra se vuelve más simple para el usuario, ya que siguiendo la metodología IEEE 80-2000 a partir de los datos iniciales ingresados, la aplicación misma realiza todos los cálculos necesarios hasta que se obtenga la malla de puesta a tierra adecuada. En consecuencia, le evita al usuario el trabajo largo y tedioso, ya que para encontrar el diseño apropiado que cumpla con los valores de seguridad puede necesitar de una gran cantidad de iteraciones.

Un sistema de puesta a tierra dentro de una subestación tiene como objetivos salvaguardar la vida de las personas dentro de la instalación y proteger los equipos al momento de ocurrir una falla, disipando las corrientes de falla las cuales pueden ocasionar hasta la muerte.

En la aplicación se puede notar que al aumentar el calibre del conductor o al disminuir el espaciamiento

entre conductores, la resistencia de la malla disminuye, este es un factor importante a la hora de realizar un diseño óptimo, puesto que entre menor sea la impedancia de la malla, mejor será el camino para evacuar las corrientes de falla.

Referencias

- [1] Moreno O. German, Valencia V. Jaime, Cárdenas A. Carlos, Villa A. Walter. Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Respuestas ante fallas eléctricas y rayos. Editorial Universidad de Antioquia. Septiembre de 2007.
- [2] Autores
- [3] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE std 80-2000.
- [4] GARCIA MARQUEZ ROGELIO “LA PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELCTRICAS” Editorial Alfa y Omega 1999.
- [5] Thapar, B., Gerez, V., and Kejriwal, H., “Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 360–368, Jan. 1994.
- [6] José Raúl Martín. 1990. Diseño de Subestaciones Eléctricas. México. Capítulo 4.
- [7] Sverak, J. G., “Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid; Part I—How good is the present IEEE method?” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 1, pp. 7–25, Jan. 1984.
- [8] Ministerio de Minas y Energías. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. 2008. Resolución Número 18 1294. Colombia.
- [9] Sverak, J. G., “Sizing of ground conductors against fusing,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS- 100, no. 1, pp. 51–59, Jan. 1981.
- [10] Mejía Villegas S. A. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 1991. Segunda Edición. Colombia. Capítulos 12.



Ángel Cáceres Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia.



Adriana Ortiz Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia.



Sergio Gualdrón Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia.



Fernando Gomez Ingeniero electricista UIS, Candidato a Magíster en Maestría en Ingeniería Eléctrica UIS. Investigador GISEL. Áreas de trabajo: Calidad de suministro de energía y Estabilidad en sistemas de potencia. Bucaramanga, Colombia.



Hermman Vargas Ingeniero Electricista UIS, Magíster en Potencia Eléctrica UIS. Doctor en Ingeniería Eléctrica por la UPCO Madrid, España. Profesor Titular UIS Investigador GISEL. Áreas de trabajo: Calidad de suministro de energía, Estabilidad en sistemas de potencia, Mercados de energía. Bucaramanga, Colombia.

ANEXOS