

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

APLICACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL GRNDSTUDIO V1.0 PARA ENCONTRAR UNA RELACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES VARIABLES EN EL DISEÑO DE MALLA DE PUESTA A TIERRA

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

DIEGO FRANCISCO TAIPE ECHEVERRÍA

lego_485@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. PAÚL AYORA GONZÁLEZ

paul.ayora@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2013

© Escuela Politécnica Nacional (2013) Reservados todos los derechos de reproducción **DECLARACIÓN**

Yo, Diego Francisco Taipe Echeverría, declaro bajo juramento que el trabajo aquí

descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún

grado o calificación personal; y, que he consultado las referencias bibliográficas

que se incluyen en este documento.

A través de la presenta declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual

correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo

establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la

normatividad institucional vigente.

Diego Francisco Taipe Echeverría

CERTIFICACIÓN

Certifico que el	presente trabajo	rue	desarrollado	por	Diego	Francisco	raipe
Echeverría, bajo	mi supervisión.						

Ing. Paúl Ayora González
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Durante el transcurso de mi vida, en mis aciertos y desaciertos, he tenido a personas que han estado presentes para levantarme en las caídas y disfrutar juntos el dulce sabor de las victorias. Este trabajo es una alegría más para disfrutar junto a ellos y por eso agradezco primero a Dios por darme la vida, fuerzas y salud para afrontar el día a día. A mis padres por su gran amor y su apoyo incondicional en todo momento. Gracias Mamita y Papá por ser un pilar fundamental en mi vida.

A mis hermanos, Danny, Christian, Santiago y Diana y a mi sobrina Carolina, mi última hermana, por su cariño y apoyo en todo momento.

Un agradecimiento sincero al Ing. Paul Ayora, director de este proyecto, quien confió en mí y con sus acertadas enseñanzas e indicaciones permitió transformar este trabajo en realidad.

A mis compañeros Kleber, Xavier y Alicia por ser solidarios en el trascurso del tiempo en las aulas y fuera de ellas. A mis mejores amigos Jefferson Benavides y Fernando Calero, por toda su ayuda desde pequeños hasta el presente momento y por haber compartido la travesía de la vida. Además y de manera especial a VCVS por su apoyo y amor que me dio fuerzas cuando este trabajo decaía y gracias por las alegrías compartidas en un buen tiempo de nuestras vidas que siempre las tendré como gratos recuerdos.

A mis tías tíos, la familia, los amigos, los profesores y compañeros, un ¡gracias! de corazón.

Diego

DEDICATORIA

Al amigo que nuca falla, al padre que siempre está a nuestro lado apoyándonos y animándonos, a ti amado Dios, te dedico este trabajo por darme la fortaleza y apoyarme cuando más necesito y comprobar que estoy solo una oración a la distancia de ti.

"Manda a los hijos de Israel que te traigan para el alumbrado aceite puro de olivas machacadas, para hacer arder lámparas continuamente"

Levítico 24:2

CONTENIDO

Declaración	l	ii
Certificaciór	າ	iii
Agradecimie	entos	iv
Dedicatoria		v
Contenido		vi
Índice de fig	guras	xi
Índice de ta	blas	xxxi
Glosario de	terminos	xxxii
Resumen		xxxiv
Introducciór	າ	xxxv
Capítulo I		1
Introducciór	n al funcionamiento de puestas a tierra	1
1.1 Def	inición	1
1.2 Obj	etivos de una puesta a tierra	1
1.3 Fur	nciones de la puesta a tierra	2
1.3.1	Puesta a tierra de protección	2
1.3.2	Puesta a tierra para sistemas eléctricos	3
1.3.3	Puesta a tierra en señales electrónicas	3
1.3.4	Puesta a tierra de protección electrónica	3
1.3.5	Puesta a tierra de protección atmosférica	3
1.4 Par	ámetros que influyen en una puesta a tierra	4
1.4.1	Resistencia y resistividad de suelo	4
1.5 Asp	pectos de seguridad humana	7
1.5.1	Efectos de la electricidad en el cuerpo humano	8
1.5.2	Voltajes o potenciales tolerables	9
1.6 Mal	llas de puesta a tierra	13
1.6.1	Componentes de una malla de puesta a tierra	13
1.6.2	Tipos de configuraciones de malla	14
Capítulo II		15
Introducciór	n al funcionamiento del programa GROUND STUDIO	15
2.1 Res	sumen	15

2.2	Intr	roducción	15
2.3	De	scripción del programa	16
2	2.3.1	Barra de menús	17
2	2.3.2	Barra de herramientas	20
2.4	Re	querimientos del software	25
2.5	For	rmato del archivo en excel	25
2.6	Ana	álisis matemático	26
2.7	Re	stricciones del programa	26
Capít	ulo III		37
Anális	sis de	electrodos con perímetro cuadrado	37
3.1	Re	sumen del estudio	37
3.2	Ana	álisis en electrodos con perímetro cuadrado sin jabalinas en	ı los
vér	tices.		38
3	3.2.1	Análisis del potencial de toque	38
3	3.2.2	Análisis del potencial de paso	41
3	3.2.3	Análisis del efecto del cambio de resistividad	47
3	3.2.4	Análisis del efecto del cambio de corriente	49
3.3	Ana	álisis en electrodos con perímetro cuadrado con jabalinas en	ı los
vér	tices.		50
3.2	.3 A	Análisis del potencial de toque	51
3.4	Ana	álisis en electrodos con perímetro cuadrado con reticulado intern	o de
2x	2 metı	ros y sin jabalinas en los vértices	54
3.5	Ana	álisis en electrodos con perimetro cuadrado con reticulado interno	de 2
x 2	con e	electrodos en los vértices	57
3	3.5.1	Análisis del voltaje de toque con electrodos de 180 centímetros	57
3	3.5.2	Análisis del voltaje de toque con electrodos de 240 metros	59
3.6	Ana	álisis en electrodos con perimetro cuadrado con reticulado interno	de 2
x 2	con ja	abalinas en las uniones perimetrales	60
3	3.6.1	Análisis del voltaje de toque con electrodos de 180 centímetros	60
3	3.6.2	Análisis del voltaje de toque con electrodos de 240 metros	62
3.7	Ana	álisis en electrodos con perimetro cuadrado con reticulado interno	de 8
x 8	metro	os sin jabalinas en los vértices	64

	3.8	Análisis en electrodos con perimetro cuadrado con reticulado interno de 8
	x 8 co	on jabalinas en los vértices66
	3.9	Análisis en electrodos con perimetro cuadrado con reticulado interno de 8
	x 8 co	on jabalinas en las uniones perimetrales68
С	apítul	o IV71
A	nálisis	de electrodos con perímetro rectangular71
	4.1	Resumen del estudio71
	4.2	Análisis en electrodos con perímetro rectangular sin jabalinas en los
	vértic	es72
	4.2	.1 Análisis del potencial de toque o contacto
	4.2	.2 Análisis del potencial de paso77
	4.3	Análisis en electrodos con perímetro rectangular con jabalinas en los
	vértic	es81
	4.3	.1 Análisis con electrodos de 180 centímetros
	4.3	.2 Análisis con electrodos de 240 centimetros84
	4.4	Análisis en electrodos con perímetro rectangular con reticulado interno sin
	jabali	nas en los vértices86
	4.5	Análisis en electrodos con perímetro rectangular con reticulado interno
	con ja	abalinas en los vértices88
	4.6	Análisis en electrodos con perímetro rectangular con reticulado interno
	con ja	abalinas en los vértices en las uniones perimetrales90
С	apítul	o V92
A	nálisis	de electrodo con perímetro en forma de "L"92
	5.1	Resumen del estudio
	5.2	Análisis en electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices 95
	5.2	.1 Análisis del potencial de toque95
	5.2	.2 Análisis del potencial de paso101
	5.3	Análisis en electrodos con perímetro en L con jabalinas en los vértices 109
	5.4	Análisis en electrodos con perímetro en L con reticulado interno y sin
	jabali	nas en los vértices115
	5.5	Análisis en electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con
	jabali	nas en los vértices118

5.6	Análisis en electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con
jabali	nas en las uniones perimetrales123
Capítulo) VI128
análisis	de electrodos con perímetro en "T"
6.1	Resumen del estudio
6.2	Análisis en electrodos con perímetro en T sin jabalinas en los vértices. 131
6.2	.1 Análisis del potencial de toque
6.2	.2 Análisis del potencial de paso
6.3	Análisis en electrodos con perímetro en T con jabalinas en los vértices 138
6.4	Análisis en electrodos con perímetro en T con reticulado interno y sin
jabali	nas en los vértices140
6.5	Análisis en electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con
jabali	nas en los vértices142
6.6	Análisis en electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con
jabali	nas en las uniones perimetrales144
Capítulo) VII
Análisis	de mallas en otras configuraciones
7.1	Resumen del estudio
7.2	Análisis en electrodos con perímetro en C sin jabalinas en los vértices 150
7.2	.1 Análisis del potencial de toque
7.2	.2 Análisis del potencial de paso
7.3	Análisis en electrodos con perímetro en C con jabalinas en los vértices 157
7.4	Análisis en electrodos con perímetro en C con reticulado interno y sin
jabali	nas en los vértices
7.5	Análisis en electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con
jabali	nas en los vértices
7.6	Análisis en electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con
jabali	nas en las uniones perimetrales163
8. Co	nclusiones y recomendaciones
Referen	cias Bibliográficas169
Anexos	
Anexo A	173

Ecuaciones empleadas para evaluar el comportamiento de electrodos en e
programa GRDNSTUDIO V1.017
APÉNDICES18
Apéndice A18
Análisis del comportamiento de manera uniforme de variables de diseño de
puesta a tierra
apéndice B
Configuración de electrodos
Apéndice C
Procedimiento para encontrar los valores de potenciales máximos y mínimos 20
Apéndice D21
Análisis del potencial de paso en electrodos con perímetro cuadrado sin jabalinas
en los vértices manteniendo el origen del paso21
Apéndice E22
Relaciones entre electrodos con cuadrícula
Apéndice F22
Análisis del potencial de paso en electrodos con perímetro rectangular sin
jabalinas en los vértices y manteniendo el origen del paso22
Apendice G23
Análisis del potencial de paso en electrodos con perímetro en "L" sin jabalinas en
los vértices manteniendo el origen del paso
Apendice H25
Análisis del potencial de paso en electrodos tipo T manteniendo el origen de
paso25
Apendice I
Análisis del potencial de paso en electrodos tipo C manteniendo el origen de
paso27
Apendice J
Análisis de potenciales en electrodos con perímetro cuadrado con reticulado
interno en base a un rectángulo sin jabalinas en los vértices

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Interfaz gráfica de usuario del programa gndstudio v1.0 17
Figura 2. 2. Barra de menús
Figura 2. 3. Menú archivo
Figura 2. 4. Menú opciones
Figura 2. 5. Ventana de la opción área
Figura 2. 6. Menú grafico en tres posiciones: deshabilitado (a), habilitado para el
cambio de sólido a líneas (b), y habilitado para el cambio de líneas a sólido (c). 19
Figura 2. 7. Barra de herramientas
Figura 2. 8. Panel "tipo de suelo"
Figura 2. 9. Panel "electrodo"
Figura 2. 10. Panel "coordenadas"
Figura 2. 11. Panel "resultados"
Figura 2. 12. Ventana con resumen de resultados
Figura 2. 13. Ventana de visualización de los gráficos
Figura 2. 14. Potenciales alrededor de la superficie
Figura 2. 15. Coordenadas del electrodo
Figura 2. 16. Coordenadas de los segmentos en formato
excel
Figura 2. 17. Ventana que se genera al tener la hoja de las coordenadas de excel
encendida27
Figura 2. 18. Ventana generada por un error en la hoja de excel
28
Figura 2. 19. Ventana de error generado al tener datos alfanuméricos o
alfabéticos en las coordenadas de los electrodos
Figura 2. 20. Ventana que se genera al pulsar la tecla enter o esc en el ingreso de
datos31
Figura 2. 21. Visualización de potenciales sobre la superficie: a) recorte del
potencial, b) potencial completo
Figura 2. 22. Ventana generada al detectar una repetición de coordenadas un
electrodo si estos se encuentran seguidos

Figura 2. 23. Ventana generada al detectar una repetición de un electrodo si estos
se encuentran separados
Figura 2. 24. Ventana generada al detectar una repetición de un electrodo si estos
se encuentran alterados los puntos
Figura 2. 25. Coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado de 10 m de
lado con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas en los vértices con repetición
seguida de una coordenada de una parte del electrodo
Figura 2. 26. Coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado de 10 m de
lado con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas en los vértices con repetición
separada de una coordenada de una parte del electrodo
Figura 2. 27. Coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado de 10 m de
lado con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas en los vértices con repetición
separada y alterado el orden de una coordenada de una parte del electrodo 36
Figura 3. 1. Esquema con coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado
sin jabalinas en los vértices de lado a39
Figura 3. 2. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado por un
electrodo de puesta a tierra con perímetro cuadrado sin jabalinas en los
vértices40
Figura 3. 3. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los
vértices41
Figura 3. 4. Esquema de puntos para el estudio de potencial de paso42
Figura 3. 5. Electrodo con perímetro cuadrado de 2x2 m sin jabalinas en los
vértices, muestra (en rojo con línea segmentada) las trayectorias para el análisis
del voltaje de paso46
Figura 3. 6. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro
cuadrado de 2x2 m sin jabalinas en los vértices para varios valores en el eje Y 47
Figura 3. 7. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado un
electrodo de puesta a tierra con perímetro cuadrado con jabalinas en los
vértices51
Figura 3. 8. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con
perímetro cuadrado con jabalinas de 1.80 m en los vértices

Figura 3. 9. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con
perímetro cuadrado con jabalinas de 2,40 m en los vértices53
Figura 3. 10. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 8x8 m con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas en
los vértices
Figura 3. 11. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m sin
jabalinas56
Figura 3. 12. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 18 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con
jabalinas de 180 centímetros en los vértices57
Figura 3. 13. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m con
jabalinas de 180 centímetros en los vértices
Figura 3. 14. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 16 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con
jabalinas de 240 centímetros en los vértices
Figura 3. 15. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m con
jabalinas de 240 centímetros en los vértices60
Figura 3. 16. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 10 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con
jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales61
Figura 3. 17. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m con
jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales62
Figura 3. 18. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 22 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con
•
jabalinas de 240 centímetros en las uniones perimetrales
•
jabalinas de 240 centímetros en las uniones perimetrales

Figura 3. 20. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 24 m de lado, con reticulado interno de 8x8 m sin
jabalinas en los vértices
Figura 3. 21. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m sin
jabalinas en los vértices
Figura 3. 22. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 24 m de lado, con reticulado interno de 8x8 m con
jabalinas de 240 centímetros en los vértices
Figura 3. 23. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con
jabalinas de 180 en los vértices
Figura 3. 24. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con
jabalinas de 240 en los vértices
Figura 3. 25. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo
con perímetro cuadrado de 24 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con
jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales68
Figura 3. 26. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con
jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales69
Figura 3. 27. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el
lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con
jabalinas de 240 centímetros en las uniones perimetrales69
Figura 4. 1. Modelo básico de un rectángulo71
Figura 4. 2. Esquema con coordenadas de un electrodo con perímetro rectangular
de área axb73
Figura 4. 3. Comportamiento de electrodos con perímetro rectangular sin jabalinas
en los vértices a) de 10x14 b) de 12x18 c) de 2x4 m d) de 8x16
Figura 4. 4. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un
electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de varias
dimensiones con relación r=1.4.

Figura 4. 5. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un
electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de varias
dimensiones con relación r=1,576
Figura 4. 6. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un
electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de varias
dimensiones con relación r=276
Figura 4.7. Electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de
2x4 m con coordenadas y direcciones de los puntos para el cálculo del potencial
del paso
Figura 4. 8. Electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de
2x4 m con coordenadas, con las trayectorias en el eje (en rojo con línea
segmentada) y para el análisis del voltaje de paso en estudio79
Figura 4. 9. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro
rectangular sin jabalinas en los vértices de 4x2 m para varios valores en el eje
X80
Figura 4. 10. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro
rectangular sin jabalinas en los vértices de 4x2 m para varios valores en el eje
Y80
Figura 4. 11. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de
un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.4 y con electrodos
de 180 cm en los vértices82
Figura 4. 12. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de
un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.5 y con electrodos
de 180 cm en los vértices83
Figura 4. 13. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de
un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 2 y con electrodos de
180 cm en los vértices
Figura 4. 14. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de
un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.4 y con jabalinas de
240 cm en los vértices

Figura 4. 15. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de
un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.5 y con jabalinas de
240 cm en los vértices85
Figura 4. 16. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de
un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 2 y con electrodos de
240 cm en los vértices85
Figura 4. 26. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de
malla rectangular con reticulado interno de 2 x 2 m, con relación 2 y sin
electrodos87
Figura 5.1. Modelo básico de un esquema tipo L
Figura 5. 2. Esquemas de los diferentes casos de estudio para mallas tipo "L" 94
Figura 5. 3. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices para el caso 196
Figura 5. 4. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices para el caso 297
Figura 5. 5. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices para el caso 397
Figura 5. 6. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado por un
electrodo de puesta a tierra con perímetro en L sin jabalinas en los vértices a)
ax7x14 b) bx4x16 c) cx4x1698
Figura 5. 7. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices para el caso 199
Figura 5. 8. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices para el caso 2100
Figura 5. 9. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices para el caso 3100
Figura 5. 10. Electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de ax2x4
con coordenadas, con las trayectorias en el eje (en rojo con línea segmentada) y
para el análisis del voltaje de paso en estudio102
Figura 5. 11. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.2 y 3.10
manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices de ax2x4 m para varios valores en el eje X 103

Figura 5. 12. Electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de bx2x8
con coordenadas, con las trayectorias paralelas a los ejes (en rojo con línea
segmentada) para el análisis del voltaje de paso en estudio
Figura 5. 13. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices de bx2x8 m para varios valores en el eje X105
Figura 5. 14. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices de bx2x8 m para varios valores en el eje Y106
Figura 5. 15. Electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de cx2x8
con coordenadas, con las trayectorias paralelas a los ejes (en rojo con línea
segmentada) para el análisis del voltaje de paso en estudio
Figura 5. 16. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices de cx2x8 m para varios valores en el eje Y108
Figura 5. 17 análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en L sin
jabalinas en los vértices de cx2x8 m para varios valores en el eje X109
Figura 5. 18. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con jabalinas
1,80m en los vértices a) ax4x8 b) bx3x12 c) cx4x16110
Figura 5. 19. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
jabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 1111
Figura 5. 20. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
jabalinas de 240 cm en los vértices para el caso 1112
Figura 5. 21. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
jabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 2112
Figura 5. 22. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
jabalinas de 240 cm en los vértices para el caso 2113
Figura 5. 23. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
jabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 3113
Figura 5. 24. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
iabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 3

Figura 5. 25. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con reticulado
interno sin jabalinas en los vértices a) ax8x16 b) bx4x16 c) cx4x16 116
Figura 5. 26. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y sin jabalinas en los vértices para el caso 1117
Figura 5. 27. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y sin jabalinas en los vértices para el caso 2117
Figura 5. 28. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y sin jabalinas en los vértices para el caso 3 118
Figura 5. 29. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con reticulado
interno con jabalinas de 1.80 m en los vértices a) ax8x16 b) bx4x16 c) cx4x16 119
Figura 5. 30. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80 en los vértices para el caso 1 120
Figura 5. 31. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices para el caso 1 120
Figura 5. 32. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80 en los vértices para el caso 2 121
Figura 5. 33. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices para el caso 2 121
Figura 5. 34. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80 en los vértices para el caso 3 122
Figura 5. 35. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices para el caso 3 122
Figura 5. 36. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con reticulado
interno sin jabalinas en los vértices a) ax8x16 b) bx4x16 c) cx6x24 124
Figura 5. 37. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones perimetrales para el
caso 1
Figura 5. 38. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones perimetrales para el
caso 1
Figura 5. 39. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80m en las uniones perimetrales para el
caso 2

Figura 5. 40. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40m en las uniones perimetrales para el
caso 2
Figura 5. 41. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80m en las uniones perimetrales para el
caso 3
Figura 5. 42. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40m en las uniones perimetrales para el
caso 3
Figura 6.1. Modelo básico de un esquema tipo T128
Figura 6.2. Esquema del caso de uniformidad para electrodos tipo "T"
Figura 6.3. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en T sin
jabalinas en los vértices
Figura 6. 4. Potenciales sobre el suelo en electrodos con perímetro en T sin
jabalinas en los vértices
Figura 6. 5 potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T sin
jabalinas en los vértices
Figura 6. 6. Ubicación de 27 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro
en T sin jabalinas en los vértices
Figura 6.7. Electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices de 2x6 con
coordenadas, con las trayectorias en el eje (en rojo con línea segmentada) y para
el análisis del voltaje de paso en estudio
Figura 6. 8. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro en T sin
jabalinas en los vértices de ax2x6 m para varios valores en el eje Y 137
Figura 6. 9. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en T sin
jabalinas en los vértices de ax2x6 m para varios valores en el eje X
Figura 6. 10. Comportamiento de electrodos con perímetro en T sin reticulado
interno con jabalinas en los vértices
Figura 6. 11. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con
jabalinas en los vértices de 180 cm

Figura 6. 12. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con
jabalinas en los vértices de 240 cm140
Figura 6. 13. Potenciales sobre el suelo en electrodos con perímetro en T con
reticulado interno sin jabalinas en los vértices141
Figura 6. 14. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con
reticulado interno y sin jabalinas en los vértices141
Figura 6. 15. Comportamiento de electrodos con perímetro en T con reticulado
interno con jabalinas de 180 cm en los vértices142
Figura 6. 16. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en los vértices 143
Figura 6. 17. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices 143
Figura 6. 18. Potenciales sobre el suelo en electrodos con perímetro en T con
reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales144
Figura 6. 19. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en las uniones perimetrales 145
Figura 6. 20. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones perimetrales 145
Figura 7. 1. Esquema de básico de un electrodo tipo "C"147
Figura 7. 2. Esquema del caso de uniformidad para mallas tipo "C"149
Figura 7. 3. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en C sin
jabalinas en los vértices150
Figura 7. 4. Potenciales generados sobre el suelo en electrodos con perímetro en
C sin jabalinas en los vértices151
Figura 7. 5 potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C sin
jabalinas en los vértices152
Figura 7. 6. Ubicación de 27 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro
en C sin jabalinas en los vértices153
Figura 7.7. Electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices de 2x6 con
coordenadas, con las trayectorias en el eje (en rojo con línea segmentada) y para
el análisis del voltaje de paso en estudio154
Figura 7. 8. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.2 y 3.10
manteniendo una travectoria paralela al eie X del electrodo con perímetro en C sin

jabalinas en los vértices de cx2x6 m para varios valores en el eje
Y155
Figura 7. 9. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11
manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en C sin
jabalinas en los vértices de cx2x6 m para varios valores en el eje
X156
Figura 7. 10. Comportamiento de electrodos con perímetro en C sin reticulado
interno con jabalinas de 180 cm en los vértices158
Figura 7. 11. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con
jabalinas en los vértices de 180 cm158
Figura 7. 12. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con
jabalinas en los vértices de 240 cm159
Figura 7. 13. Comportamiento de electrodos con perímetro en C con reticulado
interno sin jabalinas en los vértices160
Figura 7. 14. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con
reticulado interno y sin jabalinas en los vértices160
Figura 7. 15. Comportamiento de electrodos con perímetro en C con reticulado
interno con jabalinas en los vértices de 180 cm161
Figura 7. 16. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en los vértices162
Figura 7. 17. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices162
Figura 7. 20. Comportamiento de electrodos con perímetro en C con reticulado
interno con jabalinas en las uniones perimetrales163
Figura 7. 21. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con
reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en las uniones
perimetrales164
Figura 7. 22. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con
reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones
perimetrales165
Figura a. 1. Modelo de un suelo estratificado de n capas174
Figura a. 2. Modelo de un suelo estratificado de 3 capas
Figura a. 3. Modelo de un suelo estratificado de 2 capas

Figura a. 4. Modelo de un electrodo entre un suelo estratificado de 3 capas
176
Figura a. 5. Resultado obtenido al aplicar la simplificación177
Figura b. 1. Modelo de electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los
vértices191
Figura b. 2. Modelo de un electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los
vértices191
Figura b. 3. Modelo de un electrodo con perímetro el "L" sin jabalinas en los
vértices a) caso 1, b) caso 2, c) caso 3192
Figura b. 4. Modelo de un electrodo con perímetro el "T" sin jabalinas en los
vértices192
Figura b. 5. Modelo de un electrodo con perímetro el "C" sin jabalinas en los
vértices193
Figura b. 6. Modelo de electrodo con perímetro cuadrado con jabalinas en los
vértices195
Figura b. 7. Modelo de electrodo con perímetro rectangular con jabalinas en los
vértices195
Figura b. 8. Modelo de un electrodo con perímetro en L con jabalinas en los
vértices. A) ax8x16, b) bx4x16 y c) cx5x20196
Figura b. 9. Modelo de un electrodo con perímetro en T con jabalinas en los
vértices196
Figura b. 10. Modelo de un electrodo con perímetro en C con jabalinas en los
vértices197
Figura b. 11. Modelo de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado
interno sin jabalinas en los vértices198
Figura b. 12. Modelo de un electrodo con perímetro rectangular con reticulado
interno sin jabalinas en los vértices198
Figura b. 13. Modelo de un electrodo con perímetro en L con reticulado interno
sin jabalinas en los vértices. A) ax6x12, b) bx4x16 y c) cx6x24199
Figura b. 14. Modelo de un electrodo con perímetro en "T" con reticulado interno
sin jabalinas en los vértices199
Figura b. 15. Modelo de un electrodo con perímetro en "C" con reticulado interno
sin jabalinas en los vértices

Figura b. 16. Modelo de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado
interno con jabalinas en los vértices201
Figura b. 17. Modelo de un electrodo con rectangular cuadrado con reticulado
interno con jabalinas en los vértices201
Figura b. 18. Modelo de un electrodo con perímetro en L con reticulado interno
con jabalinas en los vértices. A) ax6x12, b) bx6x24 y c) cx4x16202
Figura b. 19. Modelo de un electrodo con perímetro en T con reticulado interno
con jabalinas en los vértices202
Figura b. 20. Modelo de un electrodo con perímetro en C con reticulado interno
con jabalinas en los vértices
Figura b. 21. Modelo de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado
interno con jabalinas en las uniones perimetrales204
Figura b. 22. Modelo de un electrodo con perímetro rectangular con reticulado
interno con jabalinas en las uniones perimetrales204
Figura b. 23. Modelo de un electrodo con perímetro en L con reticulado interno
con jabalinas en las uniones perimetrales. A) ax6x12, b) bx4x16 y c)
cx6x24
Figura b. 24. Modelo de un electrodo con perímetro en "T" con reticulado interno
con jabalinas en las uniones perimetrales205
Figura b. 25. Modelo de un electrodo con perímetro en "C" con reticulado interno
con jabalinas en las uniones perimetrales206
Figura c. 1. Configuración básica de un electrodo con perímetro cuadrado sin
jabalinas en los vértices
Figura c. 2. Configuración básica de un electrodo con perímetro cuadrado sin
jabalinas en los vértices de 4m de lado con los puntos en el plano cartesiano en
los vértices
Figura c. 3. Puntos de coordenadas en excel para una configuración un electrodo
con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4 m de lado 209
Figura c. 4. Vista del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los
vértices de 4m de lado en el software gndstudio v1.0
Figura c. 5. Vista de los potenciales de punto generados sobre del suelo del
electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4m de lado en el
software and studio v1.0

Figura c. 6. Vista de cortes perpendicular al plano a) yz b) xz de los potenciales de
punto generados sobre la superficie de un electrodo con perímetro cuadrado de 4
m. De lado
Figura c. 7. Potenciales sobre uno de los lados del electrodo con perímetro
cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4m de largo213
Figura c. 8. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un
electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices para varias
longitudes de lado
Figura d. 1. Malla cuadrada en una sola cuadrícula sin electrodos de 2x2 m con
coordenadas217
figura d. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de
los vértices del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices
modificando la dirección del punto final
figura d. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el centro
del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices modificando la
dirección del punto final
figura d. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el centro
de uno de los lados del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los
vértices modificando la dirección del punto final
Figura f.1. Electrodo con perimetro rectangular de 4x2 m con coordenadas227
Figura f. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de
los vértices del electrodo con perímetro rectangular sin electrodos en los vértices
modificando la dirección del punto final
Figura f. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el centro
del electrodo con perímetro rectangular sin electrodos en los vértices, modificando
la dirección del punto final
Figura f. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de
los centros de los lados más largos del electrodo con perímetro rectangular sin
electrodos en los vértices modificando la dirección del punto final
Figura f. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de
los centros de los lados más cortos del electrodo con perímetro rectangular sin
electrodos en los vértices modificando la dirección del punto final

Figura g. 1. Ubicación de 21 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro
en L sin jabalinas en los vértices
Figura g. 2. Trayectoria, sentido e inicio para estudio manteniendo el origen de
paso235
Figura g. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
uno y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en l
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
dos y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en l
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
tres y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 6. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
cuatro y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro er
L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 7. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
cinco y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en l
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
seis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 9. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en l
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 10. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en e
punto ocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo cor
perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 11. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
nueve y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro er
L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Figura g. 12. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
diez y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos246
Figura g. 13. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
once y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 14. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el
punto doce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con
perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos248
Figura g. 15. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el
punto trece y modificando la dirección del punto final en un electrodo con
perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos249
Figura g. 16. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el
punto catorce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con
perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos250
Figura g. 17. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el
punto quince y modificando la dirección del punto final en un electrodo con
perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos251
Figura g. 18. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en punto
dieciséis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro
en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 19. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en punto
diecisiete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro
en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 20. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el
punto dieciocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con
perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos254
Figura g. 21. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el
punto diecinueve y modificando la dirección del punto final en un electrodo con
perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura g. 22. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el
punto veinte y modificando la dirección del punto final en un electrodo con
nerímetro en L sin jahalinas en los vértices, nara los tres casos 256

Figura g. 23. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en punto
seis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L
sin jabalinas en los vértices, para los tres casos
Figura h. 1. Ubicación de 27 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro
en T sin jabalinas en los vértices259
Figura h. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
uno y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
dos y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
tres y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
cuatro y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
T sin jabalinas en los vértices
Figura h. 6. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
cinco y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h. 7. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
ata tahari ara ara bara Katara
sin jabalinas en los vértices
Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices
Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices
Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices
Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

Figura h.11. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
diez y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h.12. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
once y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h.13. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
doce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h.14. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
trece y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T
sin jabalinas en los vértices
Figura h.15. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
catorce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
T sin jabalinas en los vértices
Figura h.16. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
quince y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
T sin jabalinas en los vértices
Figura h.17. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
dieciséis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro
en T sin jabalinas en los vértices
Figura i. 1. Ubicación de 33 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro
en C sin jabalinas en los vértices277
Figura i. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
uno y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
dos y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
tres y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices

Figura i. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
cuatro y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
C sin jabalinas en los vértices
Figura i. 6. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
cinco y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
C sin jabalinas en los vértices
Figura i. 7. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i. 9. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
ocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i. 10. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
nueve y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
C sin jabalinas en los vértices
Figura i. 11. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
diez y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i.12. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
once y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i.13. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
doce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i.14. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
trece y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C
sin jabalinas en los vértices
Figura i.15. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
catorce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
C sin jahalinas en los vértices

Figura i.16. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
quince y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en
C sin jabalinas en los vértices
Figura i.17. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
dieciséis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro
en C sin jabalinas en los vértices
Figura i.18. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
diecisiete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro
en C sin jabalinas en los vértices
Figura i.19. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto
dieciocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro
en C sin jabalinas en los vértices
Figura j. 1. Modelo básico de un rectángulo empleado en el reticulado interno de
electrodos con perímetro cuadrado297
Figura j. 2. Esquema de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado
interno rectangular
Figura j. 3. Potenciales de punto generados en el suelo sobre la superficie del
electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno rectangular sin jabalinas
en los vértices de 12 m de lado299
Figura j. 4. Ubicación de los potenciales de toque mínimos generados sobre la
superficie del suelo de un electrodo con perímetro cuadrado de 6 m con
cuadricula rectangular de 2 x 3 m sin jabalinas en los vértices
Figura j. 5. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con
perímetro cuadrado con reticulado rectangular sin jabalinas
Figura j. 6. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con
perímetro cuadrado con reticulado rectangular con jabalinas de 240 cm en los
vertices
Figura j. 7. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con
perímetro cuadrado con reticulado rectangular con jabalinas de 240 cm en las
perimetro cuadrado con reticulado rectarigular con jabalinas de 240 cm en las

ÍNDICE DE TABLAS

l abla 1. 1. Algunos rangos de valores de resistividad tipico5
Tabla 1. 2. Influencia en el comportamiento de puesta a tierra según los
parámetros de spt7
Tabla 1. 3. Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano9
Tabla 2. 1. Representación de las coordenadas (Formato Excel)26
Tabla c. 1. Potenciales generados en puntos críticos de la malla212
Tabla c. 2. Potenciales generados en un lado del electrodo con perímetro
cuadrado sin jabalinas en los vértices de 2 m de lado214
Tabla c. 3. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un
electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices para varias
longitudes de lado y sus ubicaciones216
Tabla e. 1. Característica de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado
interno, y la simetría existente221
tabla e. 2. Resumen de datos expuestos en la tabla e.1

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Bisectriz: es el segmento de recta que pasa por el vértice de un ángulo y divide en dos ángulos de igual medida.

Conductor a tierra o conductor del electrodo de puesta a tierra: conductor que es intencionalmente conectado a una puesta a tierra, desde el punto neutro, desde el conductor puesto a tierra, desde el barraje principal de tierra o desde los equipos bien sólidamente o a través de una impedancia limitadora de corriente.

Conexión a Tierra. Es la conexión eléctrica entre una malla o electrodo en tierra y una parte exterior. Las partes de conexiones a tierra no aisladas y enterradas, se consideran como parte de la malla de electrodo.

Corriente de falla a tierra: aquella que se presenta durante una falla y que fluye por el SPT.

Corrosión: ataque a una materia y destrucción progresiva de la misma, mediante una acción química, electroquímica o bacteriana.

Diafonía: Es la interacción o acoplamiento entre señales cercanas. Suele ocurrir cuando se acoplan los cables de pares o señales diferentes y rara vez en cables coaxiales. No debe confundirse con Interferencias.

Electrodo de puesta a tierra: conductor o grupo de conductores enterrados que permiten establecer una conexión eléctrica con el suelo o terreno. Puede ser una varilla, un tubo, una placa o un cable, resistentes a la humedad.

Falla: degradación de componentes. Alteración intencional o fortuita de la capacidad de un sistema, componente o persona, para cumplir una función requerida.

Mediatriz: es la recta perpendicular a un segmento que pasa por su punto medio dividiendo al segmento en dos de igual medida.

Puesta a tierra (PT): grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende los electrodos, conexiones y cables enterrados.

Resistencia de puesta a tierra o resistencia de dispersión: relación entre el potencial del sistema de puesta a tierra a medir, respecto a una tierra remota y la corriente que fluye entre estos puntos.

Resistividad del terreno: relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas. Se da en ohmio metro (W.m).

Suelo o terreno: capa de productos de meteorización, llena de vida, que se encuentra en el límite entre la roca inerte de la corteza y la atmosfera.

Suelo artificial: compuesto preparado industrialmente, de baja resistividad, para potenciar la conductividad de un electrodo enterrado.

Tiempo de despeje de falla: tiempo que transcurre desde el inicio de una falla, hasta el momento en que se despeje por medio de un dispositivo de desconexión accionado por un dispositivo de protección. Comprende tiempos de despeje, comparación, decisión y acción.

Voltaje transferido: caso especial de tensión de contacto (el más crítico), donde un potencial es conducido hasta un punto remoto respecto a la subestación o a una puesta a tierra.

RESUMEN

En la actualidad se colocan varios tipos de malla de puesta a tierra como resguardo para edificaciones, centrales de generación, subestaciones, etc., con la finalidad de dar protección a la vida humana y a los equipos. El problema que se investigó es el comportamiento de la malla de puesta a tierra, es decir, su funcionamiento para absorber la corriente que se da en condiciones anormales, mediante modelos de simulación del programa informático GRNDSTUDIO V 1.0 en condiciones de falla; y los sitios por donde la malla genera una diferencia de potencial que provoca riesgos, en particular para los seres humanos que tienen contacto con la misma. Se trató de una investigación cualitativa que estudia un hecho o fenómeno, tiene un proceso inductivo y busca soluciones a los problemas de la realidad. Por los objetivos fue una investigación exploratoria ya que realiza un sondeo del problema anterior a la toma de decisiones y descriptiva que es una caracterización del fenómeno para determinar su incidencia. Según los fines fue una investigación aplicada, sometiendo los procedimientos del programa informático en problemas y hechos prácticos porque se crearon varias configuraciones de malla de diversas magnitudes en las que se puso a prueba el software. Este proyecto permitió encontrar la relación de comportamiento del cambio de los potenciales en la superficie del suelo sobre la malla de puesta a tierra, la resistencia de puesta a tierra y evaluó los sitios de peligro para el contacto humano. Además, se determinó las ubicaciones y direcciones en las que se encuentran los potenciales máximos y mínimos de punto, toque y paso de configuración. Posteriormente extrajeron las conclusiones cada se recomendaciones. Los recursos humanos fueron el tutor, los expertos en la materia y los recursos materiales fueron la bibliografía y servicios. El costo de la investigación fue USD 3000; no obstante no se da un valor económico al programa GRDROUNDSTUDIO V.1.0, de propiedad de la Escuela Politécnica Nacional.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto permite encontrar la relación de comportamiento del cambio de los potenciales en la superficie del suelo sobre la malla de puesta a tierra, la resistencia de puesta a tierra y evalúa los sitios de peligro para el contacto humano, mediante la aplicación del programa GRNDSTUDIO V1.0, realizando un análisis para varios tipos de configuraciones de suelos. Se realizan varias simulaciones de los tipos de malla de puesta a tierra modificando la magnitud de las longitudes de la configuración así como el tipo de suelo, con lo cual se visualiza el comportamiento de los potenciales de punto, toque y paso en la superficie de la malla, además, la resistencia de puesta a tierra. El trabajo se presenta en ocho capítulos claramente diferenciados.

En el Capítulo 1, Introducción al funcionamiento de puestas a tierra; se enlistan los conceptos, objetivos y usos de la puesta tierra, es decir la parte teórica que precisa las definiciones para evitar la confusión en los capítulos que se presentan a continuación. También constan los datos requeridos para el diseño así como las variables que influyen en la puesta a tierra.

En el Capítulo 2, Introducción al funcionamiento del programa GRNDSTUDIO V1.0 se abordan los criterios y algoritmos de programación utilizados para la implementación del software, así como la funcionalidad, los requerimientos y complicaciones que pueden presentarse en esas simulaciones.

Desde el Capítulo 3 hasta el Capítulo 7, se realiza un estudio minucioso del comportamiento de los potenciales en la superficie del suelo sobre la malla de puesta a tierra, se verifica el cambio del valor de los mismos; se comprueba la resistencia de puesta a tierra y se encuentra la ubicación de los potenciales más peligrosos y más seguros. En el capítulo 3 se demuestra la influencia directa de la mayoría de parámetros que influencian en los potenciales generados; por lo que para los cuatro capítulos siguientes se considera únicamente el cambio de la geometría de la configuración de la malla y el tamaño de las mismas.

En el Capítulo 8, Conclusiones y Recomendaciones, se resumen y explican los logros y complicaciones que surgen en la elaboración del proyecto. Además se destacan los resultados de los estudios realizados en el proyecto.

Finalmente se compilan las referencias bibliográficas, anexos y apéndices.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL FUNCIONAMIENTO DE PUESTAS A TIERRA

1.1 DEFINICIÓN

Se define la puesta a tierra o conexión a tierra de un aparato, instalación o red eléctrica como la unión directa tanto eléctrica como mecánica de un punto referencial, sin protección alguna, a la tierra física (suelo).¹

1.2 OBJETIVOS DE UNA PUESTA A TIERRA

Los objetivos o propósitos de una puesta a tierra son múltiples y obedecen a razones y situaciones diversas, entre las que se pueden mencionar:²

- "Mantener dentro de los límites de seguridad los potenciales producidos por las corrientes de falla de modo que los voltajes de paso y de toque no sean peligrosos para los seres humanos y/o animales".3
- "Proporcionar una ruta de derivación a tierra de las corrientes producidas por descargas atmosféricas, transitorios y sobre-tensiones internas del sistema".³
- Evitar la ocurrencia de voltajes peligrosos entre estructuras o cualquier elemento expuesto de la instalación a protegerse y el terreno, tanto durante

¹ MARTÍNEZ Juan, TOLEADO José, Puestas a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas, Madrid España, 2004. Thomson Editores Spain, pág. 2.

² Jiménez Edgar (2012), Manual de diseño de puesta a tierra. Recuperado de http://es.scribd.com/doc/104729449/MANUAL-DISENO-PUESTA-A-TIERRA-1 (abril, 2012).

³ Parra-rayos(2006). MANUAL DE PUESTAS A TIERRA THOR-GEL recuperado de http://www.para-rayos.com/datos/gel20061.pdf (Marzo, 2012).

fallas como en condiciones normales de operación.²

 Limitar a valores prescritos, la diafonía y los ruidos inducidos en circuitos electrónicos especialmente los relacionados con la telefonía.²

1.3 FUNCIONES DE LA PUESTA A TIERRA

Según los especialistas, las principales funciones o usos que se da a un Sistema de Puesta a Tierra SPT son:

1.3.1 PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN⁴

Es un sistema que se utiliza, principalmente, para la protección física de personas, animales y equipos en condición de funcionamiento normal y en condiciones de falla. Cuando el sistema de puesta a tierra tiene esta funcionalidad, se brinda protección a las instalaciones eléctricas, protección electrónica, protección atmosférica, siempre privilegiado la integridad de la vida de personas.

La puesta a tierra para sistemas eléctricos proporciona una conexión eléctrica equipotencial de todos los elementos metálicos (aislados o desnudos) a los cuales se tiene acceso en una instalación. Además de proporcionar un camino idóneo a las corrientes de falla, en ciertos casos limita su valor a magnitudes apropiadas para el sistema.

² Jiménez Edgar (2012), Manual de diseño de puesta a tierra. Recuperado de http://es.scribd.com/doc/104729449/MANUAL-DISENO-PUESTA-A-TIERRA-1 (abril, 2012).

⁴ Rojas Gregor (2007), Manual de sistemas de puesta a tierra. Recuperado de http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/00%20MANUAL%2 0GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf (abril, 2012)

1.3.2 PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS4

Este sistema se usa con el fin de disminuir el potencial de toque que pudiese existir en cualquier elemento metálico en condiciones normales o de falla. El SPT protege también las propiedades físicas de los elementos aterrizados, mediante protecciones de sobre-corriente de los equipos, con lo cual se garantiza la seguridad, un mejor funcionamiento y una mayor confiabilidad en la operación del sistema eléctrico protegido.

1.3.3 PUESTA A TIERRA EN SEÑALES ELECTRÓNICAS4

La puesta a tierra tiene el propósito de generar una tierra sin contaminación de señales de frecuencias diferentes a la deseada, además filtra el ruido que distorsiona la onda de alta frecuencia en la cual trabajan los equipos electrónicos.

1.3.4 PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN ELECTRÓNICA⁴

El SPT se usa como un filtro de sobre voltajes, los cuales pueden destruir completa o parcialmente los elementos electrónicos internos de los equipos. Además es una vía de drenaje de las cargas electrostáticas.

1.3.5 PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN ATMOSFÉRICA⁴

El sistema exige la instalación de un conjunto de equipos (pararrayos, atraparrayos, etc) que ayudan a inyectar a tierra la corriente producida por las descargas atmosféricas, además, la resistencia de esta puesta a tierra no debe superar un valor de 1 Ω .

⁴ Rojas Gregor (2007), Manual de sistemas de puesta a tierra. Recuperado de http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/00%20MANUAL%2 0GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf (abril, 2012).

1.4 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN UNA PUESTA A TIERRA

Los parámetros que afectan a un sistema de puesta a tierra se detallan a continuación.

1.4.1 RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD DE SUELO

Se define como la resistencia eléctrica del suelo al flujo de corriente continua y/o alterna. La unidad más común usada es el ohm-metro (Ω m), conociendo que el símbolo de la resistividad es ρ .

Teóricamente, la resistencia eléctrica viene determinada por la siguiente relación:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$
 [1. 1]

Donde:

R: resistencia eléctrica expresada en Ω .

L: longitud de la muestra por donde atraviesa la corriente (m).

S: área de la cara de los extremos de L, de la muestra que atraviesa la

corriente, por lo general tienen la misma magnitud (m²).

ρ: resistividad del suelo (Ω m).

Los estudios han demostrado que el suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del suelo no sólo dependa de su composición interna sino que también dependa de otros factores externos como humedad, temperatura, composición química de las sales, etc., que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo.

1.4.1.1 Tipo de suelo

"No hay una definición clara de los diferentes tipos de suelo"⁶, como se menciona en el subcapítulo anterior, porque es una mezcla de varios elementos, que se observan en la Tabla 1. 1, que a continuación se transcribe:

Tabla 1. 1. Algunos rangos de valores de resistividad típicos⁷

MATERIAL	RESISTIVIDAD		
	(Ωm)		
Agua salada	0,01-1		
Lama	5-10		
Suelo Orgánico	5-200		
Humus	10-150		
Arcilla	10-300		
Agua de río	50-500		
Gneises descompuestos	100-2000		
Rocas calcáreas	140-480		
Tierra de Jardín	2.000-1'000.000		
Rocas cristalinas	500-1.000		
Caliza fisurada	500-5.000		
Caliza compacta	1.000-5.000		
Granitos y basaltos	1.000-50.000		
Arena común	3.000-8.000		

De lo anterior se infiere que existen franjas de valores característicos para diferentes tipos de suelo. Por consiguiente, el suelo o terreno en función de su naturaleza puede ser: buen, regular o mal conductor. El conocimiento de las características del suelo es el primer paso a considerarse para obtener una buena puesta a tierra.

⁷ MORENO Germán, Fundamentos e ingeniería de las puestas respuestas ante fallas eléctricas y rayos, Medellín Colombia, 2007. Editorial Universidad de Antioquia, pág. 16.

⁶ MORENO Germán, Fundamentos e ingeniería de las puestas respuestas ante fallas eléctricas y rayos, Medellín Colombia, 2007. Editorial Universidad de Antioquia, pág. 15.

1.4.1.2 Contenido de humedad

La resistividad del suelo es inversamente proporcional a la humedad existente en el terreno, como resultado de lo expuesto, la adición de humedad en suelos que incluyen granito, arenisca, y piedra caliza en la superficie tendrá efecto en la reducción de la resistividad.^{7,8}

1.4.1.3 Composición química de las sales disueltas en el agua contenida

Las sales son un elemento conductor de energía eléctrica, por eso la cantidad de estos elementos disueltos en el agua que contiene el suelo, también influyen en su resistividad de manera inversamente proporcional, en general cuanto más sal o electrolitos contenga el suelo, la resistividad será más baja.

1.4.1.4 Compactación del suelo

La compactación del suelo aumenta la continuidad del suelo, por esta razón la compactación del suelo es inversamente proporcional a su resistividad.

1.4.1.5 Corrosión

Es un factor externo al tipo de suelo que también se encuentra presente con el paso del tiempo, en el caso de no realizar un mantenimiento adecuado y se relaciona con las condiciones ambientales. La corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente.

La corrosión afecta al elemento que forma la malla en sí, que puede ser de cobre (el más usado) o aluminio. El aumento de la presencia de la corrosión en la malla

⁸ MARTÍNEZ Juan, TOLEADO José, Puestas a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas, Madrid España, 2004. Thomson Editores Spain, pág. 6 y 7.

de puesta a tierra disminuye la presencia de la misma, por lo que afecta la vida útil del SPT.

1.4.1.6 Corriente De Falla

Este es uno de los parámetros que se toma en cuenta en el diseño de la puesta a tierra debido a que es necesario que al presentarse esta corriente la malla de puesta a tierra no genere voltajes peligrosos sobre la superficie de la misma.

Tabla 1. 2. Influencia en el comportamiento de puesta a tierra según los factores que la afectan

Parámetro	Influencia sobre la puesta a tierra				
Resistividad de suelo	Inversamente				
Tipo de suelo	Directamente				
Humedad	Inversamente				
Sales disueltas	Inversamente				
Compactación del suelo	Inversamente				
Temperatura	Inversamente				
Resistencia de una malla	Directamente				
Corrosión	Directamente				
Corriente de falla	Directamente				

^{*} El Autor

Un resumen del efecto de los factores mencionados previamente se observa en la Tabla 1. 2, de la cual se concluye que existe un conjunto de parámetros que influencian en la puesta a tierra; por consiguiente, en un sistema, se debe tomar en cuenta el comportamiento que tiene en condiciones de falla.

1.5 ASPECTOS DE SEGURIDAD HUMANA

El sistema de puesta a tierra tiene como función principal la seguridad, primordialmente la de las personas que laboran o que se encuentran cercanas al

elemento o conjunto de elementos en donde haya presencia de electricidad, en condiciones normales y de falla.

Por esta razón es necesario saber los efectos que tienen las corrientes en el cuerpo humano, pese a que esto depende de otros factores externos, por consiguiente se toma en cuenta los valores obtenidos en investigaciones, separados en rangos seguros y confiables.

1.5.1 EFECTOS DE LA ELECTRICIDAD EN EL CUERPO HUMANO

Los efectos de la electricidad en el cuerpo humano dependen de tres factores que intervienen en la peligrosidad de la electrocución y son: la resistencia del cuerpo humano, el tiempo de contacto y la corriente que atraviesa el cuerpo humano.

La resistencia del cuerpo humano promedio tiene un valor de $1000~\Omega$, pero este valor puede disminuir dependiendo del grado de humedad, la cual variará desde seca, húmeda, mojada o sumergida en agua. Además otro factor que repercute mucho en el valor de la resistencia son las condiciones psíquicas y estados de ánimo de las personas, ya que la condición más crítica es cuando hay una baja del estado de ánimo o depresión.

El otro factor que repercute en los efectos de la electricidad es el tiempo de contacto o la duración de la circulación de la corriente por el cuerpo humano, a mayor tiempo de exposición, peores consecuencias.

De los tres factores que inciden en los efectos de la electricidad, el que más peso se toma en cuenta son los efectos de la corriente que atraviesa al ser humano, lo cual se detalla en la Tabla 1. 3

Tabla 1. 3. Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano⁹

Corriente que atraviesa el cuerpo humano (mA)	Efectos fisiológicos que se observan en condiciones normales			
0 - 0,5 mA	No se observan sensaciones ni efectos. El umbral de percepción se sitúa en 0.5 mA.			
0,5 - 10 mA	Calambres y movimientos reflejos musculares. El umbral de no soltar se sitúa en 10 mA.			
10-25 mA	Contracciones musculares. Agarrotamiento de brazos y piernas con dificultad de soltar objetos. Aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias.			
25-40 mA	Fuerte tetanización. Irregularidades cardiacas. Quemaduras. Asfixia a partir de 4 s			
40 - 100 mA	Efectos anteriores con mayor intensidad y gravedad. Fibrilación y arritmias cardiacas.			
~ 1 A	Fibrilación y paro cardiaco. Quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte.			
1 - 5 A	Quemaduras muy graves. Parada cardiaca con elevada probabilidad de muerte.			

1.5.2 VOLTAJES O POTENCIALES TOLERABLES

Existen tres clases de voltajes tolerables que son: de paso, toque y las transferidas, cada uno de ellos debe cumplir un límite máximo de tiempo y cantidad del mismo que el cuerpo humano pueda soportar sin tener daño alguno.

1.5.2.1 Voltaje o potencial de paso

Varios autores le denominan tensión o voltaje de pie, tensión o voltaje pie-pie. Según la IEEE Standart 80, la tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro en dirección del gradiente de potencial máximo.¹⁰ El voltaje de paso tolerable responde a la ecuación [1. 2].

⁹ Villarrubia M. Seguridad eléctrica: efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano (2000), recuperado de http://www.ing.unp.edu.ar/electronica/asignaturas/ee016/anexo/s-BIB851.pdf (Marzo, 2012).
¹⁰ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, párrafo 9, pág. 23

$$V_{P-T} = (R_k + 2R_T)I_K [1. 2]^{11}$$

Además:

$$R_T = 3 \times C_s \times \rho_s \tag{1.3}^{11}$$

$$I_K = \frac{K}{\sqrt{t}}$$
 [1. 4]¹²

De lo que si se remplaza la ecuación [1. 3] y [1. 4] en la ecuación [1. 2], se obtiene la ecuación [1. 5].

$$V_{P-T} = (R_k + 6 \times C_s \times \rho_s) \frac{K}{\sqrt{t}}$$
 [1.5]

Donde:

 V_{P-T} : Voltaje de paso tolerable (V).

 R_K : Resistencia típica del cuerpo humano en ohms (1000 Ω).

 R_T : Resistencia de contacto a tierra de un pie (Ω) .

 I_K : Valor eficaz de la corriente que circula por el cuerpo humano (A).

 ρ_S : Resistividad aparente de la capa superficial (Ω m).

C_S: Coeficiente en función del terreno y la capa superficial.

K: Constante basada en el peso del cuerpo (0,116 ó 0,157 para

personas de 50 ó 70 kg respectivamente).

t: Tiempo total de ocurrencia de falla, incluyendo efectos acumulativos

por recierres.

En este trabajo pese a que se define tensiones de paso o voltaje de paso este término no se empleará muy a menudo, sino que se utilizara el término de potencial de paso, ya que en el programa permite obtiene esta magnitud con el nombre de potencial de paso.

¹¹ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, ecuacion 28, pág. 27.

¹² IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, Ecuación 7, pág. 13

1.5.2.2 Voltaje o potencial de toque

Los especialistas le denominan tensión o voltaje de contacto, tensión o voltaje mano-pie. La IEEE Standart 80 define que la tensión de contacto es la diferencia entre el potencial [del electrodo] de tierra y el potencial de la superficie en un punto en que una persona está de pie mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metálica puesta a tierra.¹³

El voltaje de toque tolerable o permisible proporciona la ecuación [1. 6].

$$V_{T-T} = \left(R_k + \frac{R_T}{2}\right) I_K {[1. 6]}^{14}$$

De lo que si se remplaza la ecuación [1. 3] y [1. 4] en la ecuación [1. 6], se obtiene la ecuación [1.7].

$$V_{T-T} = (R_k + 1.5 \times C_s \times \rho_s) \frac{K}{\sqrt{t}}$$
 [1.7]¹⁵

Donde

 V_{T-T} : Voltaje de toque tolerable (V).

 R_K : Resistencia típica del cuerpo humano en ohms (1000 Ω).

 R_T : Resistencia de contacto a tierra de un pie (Ω) .

 I_K : Valor eficaz de la corriente que circula por el cuerpo humano (A).

 ρ_{S} : Resistividad aparente de la capa superficial (Ω m).

C_S: Coeficiente en función del terreno y la capa superficial.

K: Constante basada en el peso del cuerpo (0,116 ó 0,157 para

personas de 50 ó 70 kg respectivamente).

t: Tiempo total de ocurrencia de falla, incluyendo efectos acumulativos

por recierres de los circuitos.

¹³ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, párrafo 10, pág. 23.
 ¹⁴ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000,

¹⁴ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000 Ecuación 31, pág. 27.

¹⁵ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, Ecuación 32 y 33, pág. 27.

En el presente trabajo este parámetro se denominará potencial de paso, ya que en la pantalla de resultados se presenta con este nombre.

1.5.2.3 Voltajes transferidos

Es un caso especial de tensión de contacto, que aparecen en puntos apartados de la malla ya que un potencial es conducido hasta un punto remoto respecto a la subestación o una puesta a tierra. Esta transferencia se da a través de conductores que conectan el punto remoto con un punto de la malla¹⁶. Además de los voltajes que se menciona, se define también los conceptos de GPR y de potencial de punto, aunque a estos potenciales no directamente tiene contacto el ser humano, afectan a los voltajes que se menciono anteriormente que se busca un rango de tolerancia para evitar daños a personas y animales.

1.5.2.4 Máximo potencial de tierra, GPR (ground potential rise)

Es el máximo potencial eléctrico que una puesta a tierra, alcanza respecto a una tierra remota, es decir es el voltaje al que se entra la malla o electro de puesta a tierra, e igual al producto entre la corriente que circula por la puesta a tierra por la resistencia equivalente del electrodo de puesta a tierra.¹⁰

1.5.2.5 Potencial de punto

Es el voltaje que se genera en un punto sobre o fuera el perímetro del electrodo de puesta a tierra debido a la influencia a la malla de puesta a tierra.

¹⁶ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, párrafo 11, pág. 23.

1.6 MALLAS DE PUESTA A TIERRA

Se define a la malla o al electrodo de puesta a tierra, como un elemento o conjunto de elementos eléctricos conductores que se ubican en el interior del suelo.

1.6.1 COMPONENTES DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA

Los componentes básicos de una malla para un sistema de puesta a tierra son dos, el conductor (cable de preferencia desnudo) eléctrico y la varilla, pero para la unión de estos elementos se usan generalmente conexiones, sean mecánicas o exotérmicas, también conocidas como soldadas.

1.6.1.1 Conductor Eléctrico

Generalmente denominado cable, tiene como propósito conducir electricidad, por esta razón usualmente son fabricados de aluminio o cobre el primero tiene un costo muy bajo, pero genera mayores pérdidas eléctricas (tiene menor conductividad), mientras que el segundo supera notablemente el costo aunque tiene una mayor conductividad eléctrica. Para un buen sistema de puesta a tierra habitualmente se usan conductores de cobre.

1.6.1.2 Varilla de puesta a tierra

Se le conoce como jabalina, o electrodo vertical, porque en su mayor parte de SPT se instala perpendicular a la superficie de la puesta a tierra.

Normalmente estas varillas de puesta a tierra se clasifican por la cantidad del elemento conductor y por las dimensiones de las varillas. De acuerdo con el elemento conductor, la construcción se denomina varilla de alta camada si es de

cobre puro; varilla de baja camada si tiene un baño exterior de cobre un núcleo de aluminio o hierro según sea el caso; y las varillas electrostáticas. En el segundo tipo, por la longitud de la jabalina, entre las más usadas están las varillas de 180 cm y 240 cm.

Generalmente se utilizan las varillas para obtener una disipación de corriente más alta, además se colocan en los vértices de la malla y en las conexiones de las cuadrículas de la malla, en el caso de presentarse esas cuadrículas.

1.6.2 TIPOS DE CONFIGURACIONES DE MALLA

Existen varias configuraciones de malla, que se usan según los requerimientos eléctricos así como también del espacio disponible para su colocación. Las configuraciones conocidas se fundamentan en la presencia de la base en forma de anillo o plano; por eso, para anillos o perímetros establecidos (sean triangulares, cuadrados, rectangulares, en forma de "L", forma de "T", en forma de "C", en forma "Z", etc), se selecciona lo siguiente:

- Electrodos con perímetro establecido sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro establecido con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro establecido con reticulado interno y sin jabalinas.
- Electrodos con perímetro establecido con reticulado interno y con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro establecido con reticulado interno y con jabalinas en las uniones perimetrales.

Mientras que para planos se tienen las placas enterradas paralelamente o en forma perpendicular a la superficie.

Cada una de estas configuraciones se detalla en el APÉNDICE B.

CAPÍTULO II

INTRODUCCIÓN AL FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA GRNDSTUDIO V1.0

2.1 RESUMEN

El presente capítulo se fundamenta en el proyecto del autor VICTOR HUGO CAIZA CHAGO¹⁷, titulado: "Diseño e implementación de un software optimizado para el análisis y diseño del sistema de puesta a tierra"; que aborda la utilización del programa GNDSTUDIO V1.0, una herramienta informática creada en el año 2008 como proyecto de previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones; el mismo que permite analizar, evaluar y diseñar sistemas de puestas a tierra. No obstante, en el actual proyecto se han realizado las simulaciones del modelo o modificaciones, a medida que se ha sometido el software a la práctica.

INTRODUCCIÓN 2.2

El software GNDSTUDIO V1.0 corresponde a un mejoramiento continuo iniciado con el estudio realizado por el Ingeniero Jofre A. Navarrete García, quien tuvo inconvenientes especialmente en el tiempo de ejecución del programa. Posteriormente el Ingeniero Cristian Marín, modificó la estructura del suelo de un homogéneo a un estratificado. Nuevamente, con el aporte del Ingeniero Víctor Hugo Caiza Chago se mejoró el software, que en comparación con los dos programas anteriores es cincuenta veces más rápido en la ejecución, disminuyendo el tiempos de 2 y 3 días a 5 minutos.

¹⁷ Caiza, Victor Hugo (2008), Diseño e implementación de un Software optimizado para el análisis y diseño de sistemas de puestas a tierra. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Con el software GNDSTUDIO V1.0 se obtienen los parámetros más importantes de un sistema de puesta a tierra como son:

- Resistencia equivalente de un sistema de puesta a tierra.
- Potenciales de interés (potencial de toque, potencial de paso, potencial en la superficie).

Para esto, el software requiere de los siguientes datos:

- Tipo de configuración de puesta a tierra. (Este dato es proveniente de un archivo de Excel, que en el subcapítulo 2.5 se detalla más detenidamente).
- Corriente de corto circuito (Icc).
- Tipo de suelo (la resistividad y altura de cada una de la/las capa/capas).
- Tipo de conductor (diámetro del conductor)

La evaluación de los sistemas de puestas a tierra se puede realizar en distintos tipos de suelos, ya sea en suelo homogéneo o en suelo estratificado (dos o tres capas).

En la vida práctica no es común encontrar suelos homogéneos, pero para cuestión de estudio y comportamiento básico, resulta muy útil en la elaboración de un diseño. Los suelos reales, al ser estratificados, tienen una característica, que la capa superficial por lo general es la de mayor densidad, pero tiene un espesor muy pequeño.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa GNDSTUDIO V1.0, es una herramienta informática de fácil utilización, los datos de entrada y resultados son visibles en todo momento, y está dividido en cuatro áreas que son:

- Barra de menús.
- Barra de herramientas.

- Panel de ingreso de datos y salida de resultados.
- Ventana de visualización de los gráficos.

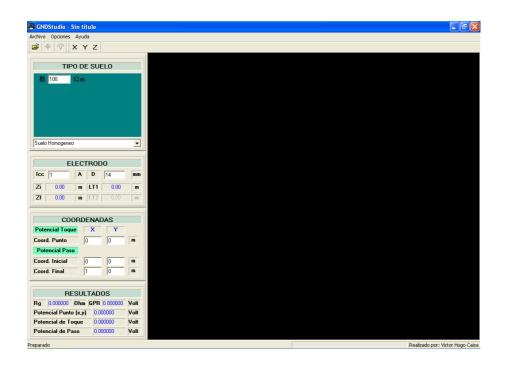


Figura 2. 1. Interfaz gráfica de usuario del programa GNDSTUDIO V1.0

2.3.1 BARRA DE MENÚS

Se encuentra en la parte superior de la ventana del programa. Presenta tres menús del programa:

- Archivo,
- Opciones y
- Ayuda.

Cada una de las opciones contiene las distintas funciones que el programa puede ejecutar, gráficamente se visualiza como en la Figura 2. 2.

Archivo Opciones Ayuda

Figura 2. 2. Barra de menús

El menú Archivo (se puede observar gráficamente en la Figura 2. 3) tiene las opciones de:

- Abrir el documento.- Abre un documento en formato Excel (*.xls), el cual contiene los puntos de las coordenadas de los conductores y jabalinas que forman parte de una malla de puesta a tierra. Es necesario archivar las coordenadas en el Programa Excel no mayor a la versión 2003 porque se generan errores.
- Salir.- Finaliza la ejecución del programa.



Figura 2. 3. Menú Archivo

El menú Opciones se representa en la Figura 2. 4. Se observa que tiene cuatro opciones Área, Grafico, Color y Segmentar.



Figura 2. 4. Menú Opciones

- Área.- Establece los límites del área. Se visualiza el gráfico en 3D. Estos valores pueden variar entre 1 a 100 m. La ventana gráfica de la opción Área se muestra en la Figura 2. 5. Pese a que el programa permite un ingreso de un área de un cuadrado de lado máximo de 100 m, inicialmente se creía que la

visualización de los potenciales generados sobre la superficie del suelo se podía ver claramente hasta un recuadro de 40 m, pero se encontró la forma de rectificar el zoom llegando a un área máxima para ver los potenciales que son de 100 m de lado.

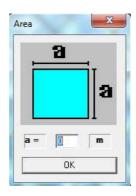


Figura 2. 5. Ventana de la opción área

Gráfico. - Este menú permite el cambio de un gráfico en 3D visualmente como un sólido a un gráfico mostrado por líneas, o viceversa. Es necesario que el usuario tenga acceso al menú "opciones" y visualice los voltajes sobre la superficie de la malla, si el archivo Excel está cargado. Una vez realizado este paso para una configuración de malla, no es necesario que se repita el proceso de visualización de voltajes en un próximo gráfico. En consecuencia, no existe un cambio de datos, pero la forma de visualizar es diferente. En la Figura 2. 6 se observan los detalles del menú.

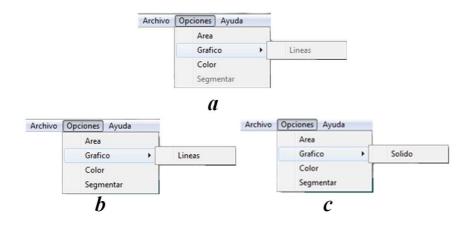


Figura 2. 6. Menú Grafico en tres posiciones: deshabilitado (a), habilitado para el cambio de sólido a líneas (b), y habilitado para el cambio de líneas a sólido (c)

- Color.- Establecer el color de fondo de la ventana de visualización del gráfico, el color por default es negro.
- Segmentar.- Se genera y guarda un único archivo Excel con el nombre de "Archivo segmentado" en la misma carpeta en donde se encuentre el archivo cargado en el programa. El gráfico se mantiene y las características en el programa no cambian, no obstante, se crea una copia de las últimas coordenadas de los puntos del electrodo utilizadas en el programa. Si se vuelve a segmentar, por default, se crea un nuevo archivo segmentado que borra el anterior, si este existiera.

2.3.2 BARRA DE HERRAMIENTAS

En esta barra se encuentran las funciones más importantes que realiza el programa. Se forma con botones cuyos gráficos representan la función a ejecutarse, también al pasar el mouse por cualquiera de los botones se despliega una etiqueta presentando la función que realiza este botón, como se observa en la Figura 2. 7.



Figura 2. 7. Barra de herramientas

- .- Abre el documento en formato (*.xls), el cual contiene las coordenadas de los electrodos.
- Calcula la resistencia equivalente que presenta los electrodos. También calcula los potenciales de interés (GPR, Toque, Paso).
- · Genera el gráfico de los potenciales alrededor de la superficie del electrodo.
- X Y Z .- Muestra las distintas vistas del gráfico, X muestra una vista paralela

al YZ, Y muestra una vista paralela al XZ, Z muestra una vista paralela al XY.

2.3.2.1 Panel de ingreso de datos y salida de resultados

El panel de manejo de datos, está ubicado en la parte izquierda del programa y permite el ingreso y la salida de resultados. Está formada por las siguientes áreas:

- Tipo de suelo.
- Electrodo.
- Coordenadas.
- Resultados.

2.3.2.2 Panel Tipo de suelo

Este panel permite seleccionar el tipo de suelo para el análisis, y según el tipo se presentan las diferentes capas del suelo y sus profundidades, como se muestra en la Figura 2. 8.

Los datos de ingreso según el tipo de suelo son:

- Suelo homogéneo (R1).
- Suelo estratificado 2 capas (R1-R2; H1).
- Suelo estratificado 3 capas (R1-R2-R3; H1-H2).



Figura 2. 8. Panel "Tipo de Suelo"

2.3.2.3 Panel Electrodo

Este panel permite ingresar la corriente de diseño y el diámetro de los conductores y del o las jabalinas en el caso que la configuración de la malla lo requiera. También permite mostrar la profundidad a la que se encuentra la varilla de puesta a tierra y la longitud total de las jabalinas, dependiendo de la capa en la que se encuentra ubicada. Se sugiere que al ingresar el diámetro sea la del conductor, pero no la del electrodo vertical en el caso de que intervengan en una configuración los dos, ya que el programa no diferencia entre ambos aunque en la práctica en la mayoría de instalaciones estos dos elementos no sea de igual diámetro. El panel de electrodo se muestra en la Figura 2. 9:

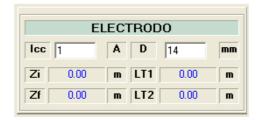


Figura 2. 9. Panel "Electrodo"

2.3.2.4 Panel Coordenadas

Este panel permite ingresar las coordenadas para obtener el potencial en el punto (x,y) y los potenciales de toque y paso. Gráficamente este panel se observa en la Figura 2. 10.

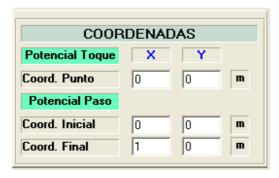


Figura 2. 10. Panel "Coordenadas"

2.3.2.5 Panel Resultados

Este panel muestra los resultados obtenidos como son:

- Resistencia equivalente.
- GPR.
- Potencial en el Punto (x,y).
- Potencial de Toque.
- Potencial de Paso.

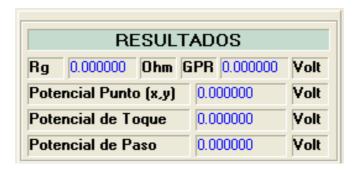


Figura 2. 11. Panel "Resultados"

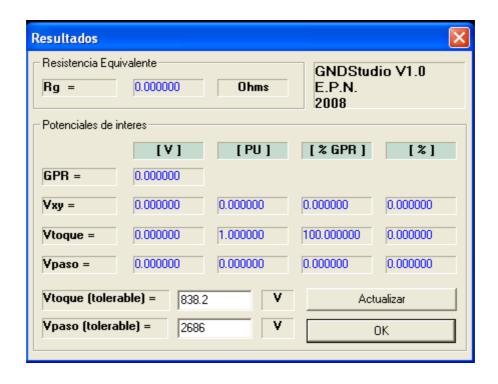


Figura 2. 12. Ventana con resumen de Resultados

Al hacer click en la palabra **RESULTADOS**, del panel de resultados se despliega una ventana para una mejor visualización de los resultados obtenidos, esta ventana se visualiza en la Figura 2. 12. Los resultados de los potenciales las magnitudes obtenidas no solo se observan en voltios, sino que valores de por unidad (PU), el porcentaje de GRP y el porcentaje de voltaje.

2.3.3 VENTANA DE VISUALIZACIÓN DE LOS GRÁFICOS

La ventana de visualización de los gráficos permite observar la ubicación de los electrodos al inicio de los cálculos. Esto permite identificar y verificar la correcta posición de cada uno de los electrodos que forman la malla. También se muestra los gráficos en 3D de los potenciales de interés. Es de gran ayuda visualizar la ubicación de los electrodos y potenciales en la superficie, para el análisis y la determinación de los potenciales de interés.

La ventana de visualización de los gráficos consta en la Figura 2. 13 y en Figura 2. 14:

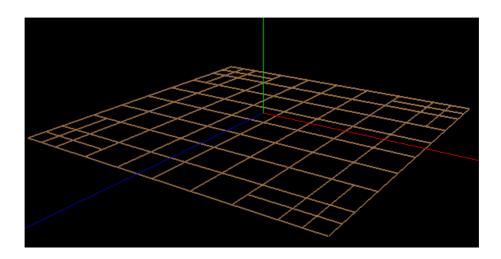


Figura 2. 13. Ventana de visualización de los gráficos

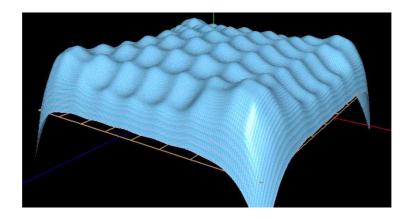


Figura 2. 14. Potenciales alrededor de la superficie

2.4 REQUERIMIENTOS DEL SOFTWARE

El programa se ejecuta en máquinas de capacidad superior (PIV 2.4GHz) y con el sistema operativo Windows XP. La resolución del monitor debe estar configurada en 1024 x 768 píxeles.

2.5 FORMATO DEL ARCHIVO EN EXCEL

Los electrodos o mallas, se ingresan mediante un archivo en formato Excel (*.xls). Se define cada electrodo mediante las coordenadas iniciales y finales, utilizando las coordenadas 3D o en tres dimensiones (Xi, Yi, Zi; Xf, Yf, Zf). La forma como se representan las coordenadas en el documento en Excel se muestra en la Figura 2. 15; el ingreso de las coordenadas debe seguir el modelo presentado en la Tabla 2. 1; lo que se demuestra en la pantalla con un ejemplo en la Figura 2. 17:

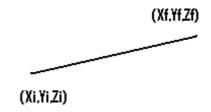


Figura 2. 15. Coordenadas del electrodo

Tabla 2. 1. Representación de las coordenadas (Formato Excel)

Coordenadas	Xi	Yi	Zi	Xf	Yf	Zf
Columnas	A	В	С	D	Е	F

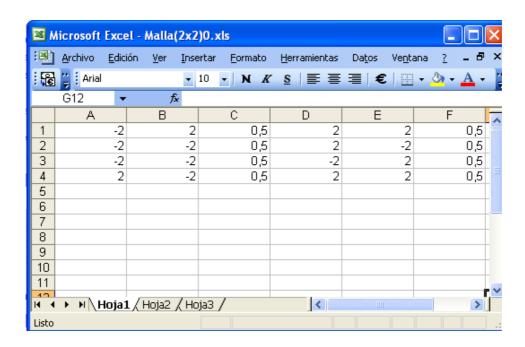


Figura 2. 16. Coordenadas de los segmentos en formato Excel

2.6 ANÁLISIS MATEMÁTICO

Ese análisis empleado para la relación del software GNDSTUDIO V1.0; se muestra detalladamente en el capítulo 2 (paginas 12-43) del plan te titulación previo a la obtención del título de ingeniero eléctrico del Ingeniero Jofre A. Navarrete García, del cual se muestra un resumen de las fórmulas en el Anexo A.

2.7 RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

Al utilizar el programa se han encontrado restricciones que no permiten ejecutar el software, entre las que se especifican las siguientes:

- a. Inicialmente en el manual de usuario no se detalla ninguna forma de lograr un zoom a los potenciales de la malla generados en la superficie de la malla, pero al usar el programa se encontró que el zoom, se ejecuta con un click izquierdo y manteniendo presionado este botón del mouse, se aleja si se desplaza el mouse hacia atrás o caso contrarios se hará un enfoque más de cerca según convenga al usuario.
- b. Excel apagado. Cuando se ejecuta el programa es necesario que las coordenadas de los puntos de una malla provenientes de una hoja de cálculo de Excel (formato similar al mostrado en subcapítulo 2.5), no se encuentre en funcionamiento; es decir, no esté apagado porque aparecerá una ventana como muestra en la Figura 2. 17. Ventana que se genera al tener la hoja de las coordenadas de Excel encendida que dice: "EPN 2008 ha parado de trabajar, Windows puede chequearse en línea para una solución del problema en la siguiente vez que tu estés en línea"; y posteriormente se cierra la ventana o se autoriza cualquiera de las dos opciones de cierre del programa. La solución para este inconveniente es cerrar la ventana de Excel que genera las coordenadas y luego volver a utilizar el software GNDSTUDIO V1.0, es decir, nuevamente cargar las coordenadas que no permitieron visualizar los potenciales.

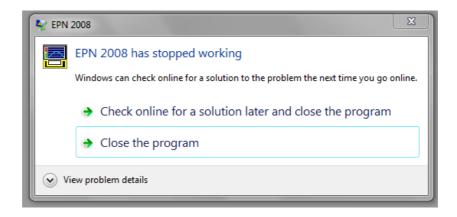


Figura 2. 17. Ventana que se genera al tener la hoja de las coordenadas de Excel encendida

c. Cambio de versión del Excel. Si las coordenadas se encuentran en una versión de Excel mayor a la 97-2003, y luego se quiere cargar en el programa,

aparecerá una ventana similar al caso anterior (Figura 2. 17). Para solucionar el problema se debe guardar todos los datos a utilizarse en el software con la versión de Excel sugerida por el programador.

d. Las coordenadas se encuentran basadas en fórmulas. Esto genera un error en el programa porque en la hoja de cálculo se tiene la facilidad de usar una o varias formulas, especialmente las cuatro operaciones básicas. Pero el programa, al detectarlo, genera una ventana similar a la Figura 2. 18, en la que se informa que el formato que contiene las coordenadas de los puntos de referencia de la malla no son válidos. Y el programa luego de dar un click en OK o cerrar la ventana seguirá activo pero no cargará las coordenadas de la malla elegida.



Figura 2. 18. Ventana generada por un error en la hoja de Excel

Para solucionar este error del programa, se abre la hoja de cálculo donde se encuentran las coordenadas, se selecciona copiar todo, luego en la celda A1 se da un click derecho y se realiza un pegado especial de únicamente valores. Después se guardan los cambios realizados y se cierra la hoja de cálculo. Posteriormente se vuelve a cargar en el programa la nueva versión modificada y se solucionarán los problemas causados.

e. La hoja de Excel contiene datos extras o datos errados. Se ha demostrado que el programa sólo reconoce los datos ingresados en las seis primeras columnas. Si existen datos en otras columnas, no los reconoce el programa ni genera ningún error en el proceso de ejecución. Cuando una hoja de Excel contiene datos extras, es decir, aparte de los puntos requeridos en otra celda sea numérico, alfabético o alfanumérico el programa tiene dos opciones:

- Si el dato extra es un dato numérico, el programa asume como que el resto de las coordenadas en esa fila será cero y graficará como que no tuviese ningún inconveniente. El usuario detecta el error cuando está generando la malla al observar en la ventana de visualización de los gráficos que está mal dibujada y tiene un componente extra o un segmento de conductor no deseado presente en el esquema del electrodo.
- Si el dato es alfabético o alfanumérico, el programa tratará de leer esos datos pero al no encontrar una relación, tardará mucho tiempo; se podría colgar la máquina en donde se ejecuta el programa; no permitirá los cambios y generará una ventana similar a la Figura 2. 19. En el caso de estar de acuerdo o cerrar la ventana se generará una similar a la Figura 2. 17, para posteriormente cerrar el software.

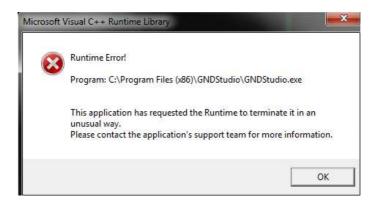


Figura 2. 19. Ventana de error generado al tener datos alfanuméricos o alfabéticos en las coordenadas de los electrodos

Para solucionar cualquiera de los inconvenientes anteriores se debe regresar a la hoja de cálculo y eliminar el dato erróneo; después es necesario guardar los cambios y cerrarla. Luego que se cargue nuevamente las coordenadas corregidas en el programa, no se generará ningún inconveniente.

f. El valor de separación de los electrodos. Este valor debe ser de una magnitud no menor al 0,5 del promedio de la longitud de las jabalinas. Por ejemplo, si se colocan jabalinas de 180 cm, la separación mínima debería ser de

90 cm, esta restricción es únicamente de programación.

- g. Coordenadas en el eje z están giradas. Al colocar las coordenadas de las diferentes configuraciones del electrodo, se debe tomar en cuenta que el nivel cero y el resto de puntos van aumentando a medida que la profundidad varía, es decir, el eje z positivo es paralelo a la profundidad del suelo.
- h. Ordenamiento de datos de menor a mayor. El programa da error si se no se ingresan los datos de la siguiente manera: primero los datos sucesivos del nivel superior o próximos a la superficie, desde el inicio hasta el final, después los datos del segundo nivel, en orden y así sucesivamente. Por el contrario, si se ingresan datos en forma arbitraria, el programa genera error en los potenciales que son diferentes a los que por el cálculo se debería obtener. Esto se comprueba al observar dos mallas porque los potenciales son diferentes y no tienen continuidad. Al modificar el orden de posición de las coordenadas, los voltajes encontrados por el programa varían totalmente pese a que el gráfico de la forma de la malla sea el mismo.
- i. Evitar poner enter o esc luego de ingresar los datos por teclado; pasar de un dato e ingresar otro o correr el programa. Para realizar las anteriores opciones se recomienda emplear únicamente el mouse. Cuando se ingresan los datos necesarios en el programa, al finalizar el proceso no se debe dar un enter o esc porque la ventana de datos y resultados desaparecerá tal como se muestra en la Figura 2. 20. Después de realizar los cálculos no se puede recuperar esa ventana para visualizar los resultados; por eso, para dar solución al problema se debe cerrar el programa y volver iniciar todo el proceso.

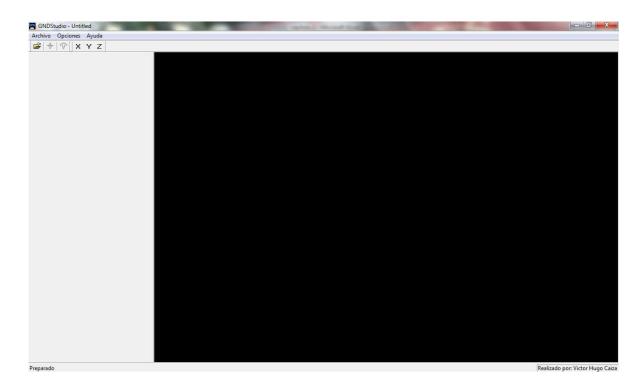


Figura 2. 20. Ventana que se genera al pulsar la tecla Enter o Esc en el ingreso de datos

- j. Área de visualización mayor a la recomendada, cuando la malla sobrepasa las dimensiones del lado mayor, igual a 40 m, como inicialmente se creyó que el programa no permitiría visualizar cómo se comportan los potenciales sobre la superficie. No obstante, se encontró que la solución estaba en modificar el zoom para que los valores calculados, o lo que se iba a generar se visualice gráficamente en forma similar a los valores del panel de resultados.
- k. Los potenciales generados sobre la superficie no se visualizan en su totalidad y se recortan antes de cubrir totalmente la malla. Un ejemplo claro de este inconveniente se observa en la parte a) de la Figura 2. 21. Esto se debe a que no se seleccionó adecuadamente el valor del área que cubrirá la malla. La solución al problema está en ir al menú opciones, seleccionar la opción Área y cambiar el valor establecido (por default el valor es cuatro). Lo adecuado es seleccionar el área de visualización de potenciales. Si el centro de la malla coincide con el centro de las coordenadas del plano XY, en valor del área debe ser igual al lado del mayor de los electrodos. Caso contrario, se compara y elige el valor mayor de la distancia máxima entre el eje X hasta una distancia

perpendicular que llegue al final del electrodo; y la distancia entre el eje Y con el mismo proceso. Seguidamente se vuelve a generar el gráfico de los potenciales sobre la superficie de la malla y se podrá visualizar en su totalidad el potencial generado como se muestra en la parte b) de la Figura 2. 21.

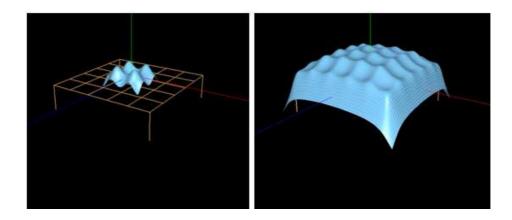


Figura 2. 21. Visualización de potenciales sobre la superficie: a) recorte del potencial, b) potencial completo

- I. No permite colocar varios tipos de conductores. El software no permite distinguir entre el conductor de la malla y la varilla de puesta a tierra. Por lo general en la vida práctica el diámetro de la varilla o electrodo es distinto al diámetro del conductor, que se encuentra formado por la malla, esto no influye en su total funcionamiento ya que se obtendrá resultados muy cercanos a la realidad.
- m. Evitar la repetición de las coordenadas de un segmento de un electrodo, Esto sucede cuando se trata de ingresar los datos de las coordenadas de los electrodos mallados. Una de las partes del conductor se puede repetir y si eso sucede, el programa detecta la falla y emite ventanas con error como las que se observan de la Figura 2. 22 hasta la Figura 2. 24. Para solucionar el inconveniente se elimina la fila que se repite en el archivo Excel generado y se vuelve a correr los electrodos.

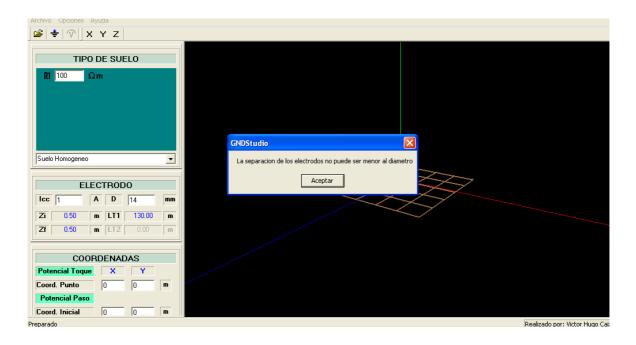


Figura 2. 22. Ventana generada al detectar una repetición de coordenadas un electrodo si estos se encuentran seguidos

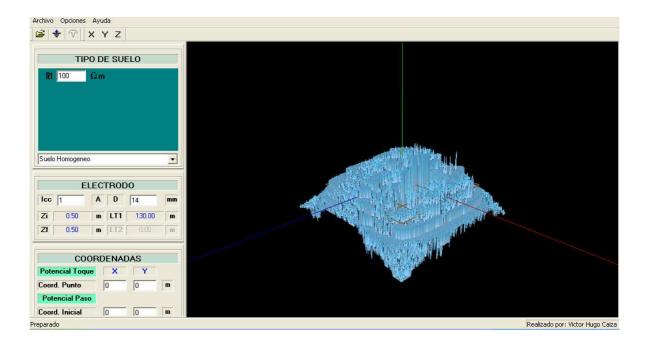


Figura 2. 23. Ventana generada al detectar una repetición de un electrodo si estos se encuentran separados

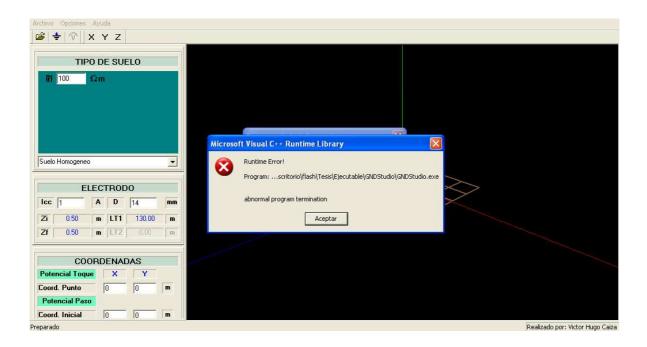


Figura 2. 24. Ventana generada al detectar una repetición de un electrodo si estos se encuentran alterados los puntos

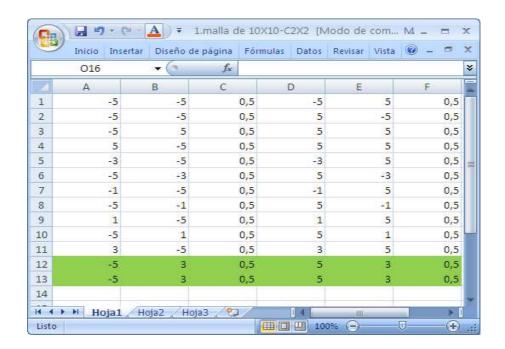


Figura 2. 25. Coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado de 10 m de lado con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas en los vértices con repetición seguida de una coordenada de una parte del electrodo

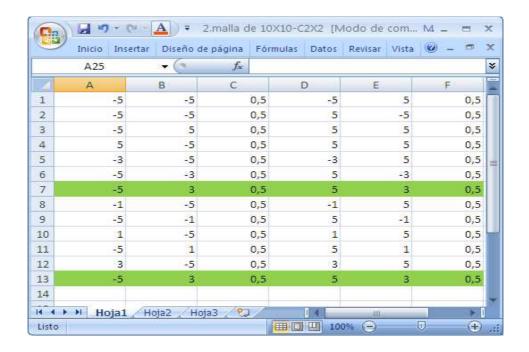


Figura 2. 26. Coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado de 10 m de lado con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas en los vértices con repetición separada de una coordenada de una parte del electrodo

Desde Figura 2. 25 hasta la Figura 2. 27 se muestran las ventanas de las hojas de cálculo con las filas de datos repetidos, resaltados con color verde, cada una de esas coordenadas genera distinto comportamiento en el programa del archivo Excel que ya se observaron como gráficos en las figuras anteriores a estas tres en referencia.

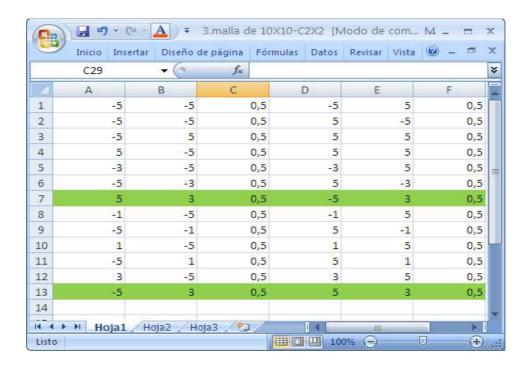


Figura 2. 27. Coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado de 10 m de lado con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas en los vértices con repetición separada y alterado el orden de una coordenada de una parte del electrodo

n. Evitar el ingreso de resistividades erróneas, pese a que el programa permite el ingreso de resistividades menores o iguales a cero ohm-metro, en la realidad estos valores no existen, y el programa al simular estos valores genera un error similar al que se muestra en la Figura 2. 19, y posterior a esta ventana obtenida se cerrará el programa. Para solucionar este inconveniente es necesario volver a reiniciar el programa e ingresar valores de resistividad mayores a cero ohm-metro.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO

3.1 RESUMEN DEL ESTUDIO

El análisis de esta configuración de mallas, se basa en los tres potenciales que se definieron en el capítulo 1, y son:

- El potencial de punto
- El potencial de toque
- El potencial de paso

Se necesita investigar, para cada potencial, el lugar sobre la superficie del suelo sobre la malla donde el electrodo genera el voltaje de mayor y menor valor. En el estudio se adoptarán parámetros que no se modifican durante el análisis, debido a que los resultados son linealmente dependientes al aumentar o disminuir la magnitud, como se verifica en el APÉNDICE A. En el ingreso del programa GNDSTUDIO V1.0 los parámetros técnicos que no tendrán variación son:

- Tipo de suelo, el estudio se basará para un suelo homogéneo (100 Ωm)
- Corriente de cortocircuito (Icc = 1000 A)
- Diámetro de los conductores (D = 14 mm)

Se ha incluido el diámetro de los conductores porque su influencia en los resultados es de un orden inferior a los otros parámetros.

Además de los requerimientos anteriores en el programa se modificarán continuamente otros parámetros que influyen en los potenciales como son:

- Tipo de configuración de mallas
- Las coordenadas para el cálculo de:
 - Potenciales de punto
 - Potenciales de toque
 - Potenciales de paso

El análisis que se realizará en esta parte del estudio se basa en la configuración de las mallas o electrodos con perímetro cuadrado, de las cuales se tiene:

- Electrodos con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro cuadrado con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno y sin jabalinas.
- Electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno y con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno y con jabalinas en las uniones perimetrales.

3.2 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Este tema tiene como base la aplicación del Programa de ordenador GNDSTUDIO V1.0 que realizó dos tipos de análisis: uno para encontrar el mayor y menor potencial de toque; y, otro que permite visualizar el mayor y menor potencial de paso que se genera sobre la superficie del suelo sobre la malla.

3.2.1 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE TOQUE

Para el análisis del potencial de toque se desarrolla el procedimiento descrito en el APÉNDICE C. Las coordenadas de la malla se muestran en la Figura 3. 1, coincidiendo el centro de la malla con el centro de los ejes de coordenadas XY.

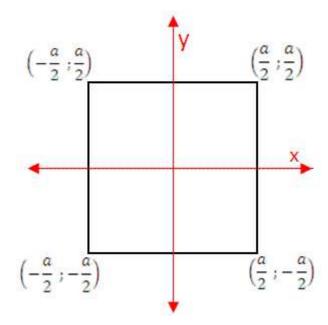


Figura 3. 1. Esquema con coordenadas de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de lado a

Los potenciales de punto generados sobre la superficie del electrodo son similares a la Figura 3. 2 . El estudio detallado del potencial de toque permite observar que el de mayor magnitud o más peligroso se encuentra en la superficie del suelo sobre las esquinas del electrodo; mientras que el voltaje de punto más alto se encuentra en el centro de los lados perimetrales de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices. Cabe indicar que el lugar donde se genera el mayor potencial de toque posible está en el mismo sitio en donde se genera el menor potencial de punto y viceversa, aclarando que este análisis se realiza sobre el perímetro del electrodo en referencia, los potenciales obtenidos fuera de este no son involucrados en este análisis debido a que se estudia el comportamiento del SPT sobre el suelo del electrodo empleado, además el menor potencial de punto se encuentra fuera de este espacio y por lo tanto el potencial de punto se convierte en un voltaje peligroso transferido.

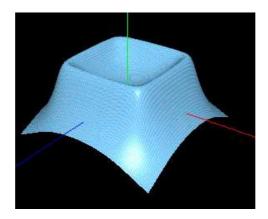


Figura 3. 2. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado por un electrodo de puesta a tierra con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices

De lo anterior se infiere, que el modelo matemático para encontrar los cuatro puntos donde se genera el voltaje de toque más peligroso, en la superficie de la malla, guarda relación con la ecuación [3. 1], mientras que la ecuación [3. 2] muestra el punto de coordenadas donde se genera el potencial menos peligroso de toque.

$$Vt_{m\acute{a}x} = \left(\pm \frac{a}{2} ; \pm \frac{a}{2} \right)$$
 [3. 1]

$$Vt_{min} = \begin{cases} \left(\begin{array}{c} 0 \ ; \ \pm \frac{a}{2} \end{array} \right) & \text{si el lado es paralelo al eje x} \\ \left(\begin{array}{c} \pm \frac{a}{2} \ ; \ 0 \end{array} \right) & \text{si el lado es paralelo al eje y} \end{cases}$$
 [3. 2]

Donde:

a: medida que tiene el lado del electrodo visto según la configuración

que muestra la Figura 3. 1.

 Vt_{min} : Voltaje de toque mínimo.

 $Vt_{máx}$: Voltaje de toque máximo.

Después de detectar los voltajes de punto; se detecta la variación del voltaje de toque entre sus valores máximo y mínimo que van disminuyendo. El análisis permite interpretar que, mientras aumenta el lado de una malla cuadrada, el

voltaje de toque se estabiliza en toda la superficie de la malla. Además el voltaje de toque va disminuyendo, es decir que, a medida que la longitud del electrodo aumenta, el voltaje de toque tiende a ser cero, con lo que se interpreta que no habría voltajes de toque peligrosos en una malla muy grande, lo que se puede visualizar en la Figura 3. 3.

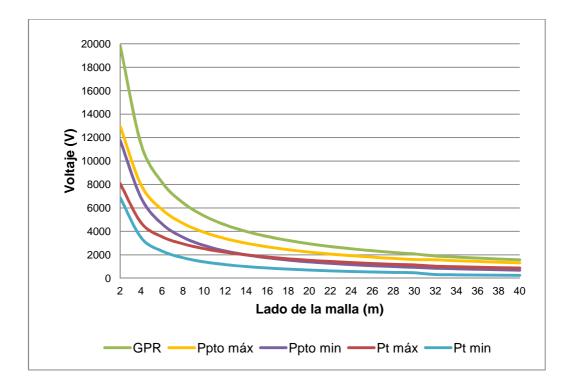


Figura 3. 3. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices

3.2.2 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE PASO

Para el estudio del comportamiento de paso se realizó un esquema como muestra la Figura 3. 4.

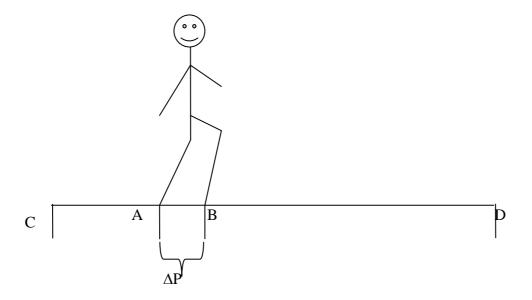


Figura 3. 4. Esquema de puntos para el estudio de potencial de paso

Como:

$$A = (x_0; y_0)$$
 [3. 3]

$$B = (x_o + \Delta x; y_o + \Delta y)$$
 [3. 4]

Donde:

 $\Delta P = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = 1m$ [3. 5]

Donde:

A:

punto de inicio del paso.

B:

punto de final del paso.

C:

punto inicial de un lado del electrodo.

D:

punto final de un lado del electrodo.

 ΔP :

longitud del paso de una persona ($\Delta P=1m$) ¹⁸.

 $^{^{18}}$ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, párrafo 9, pág. 23.

Para el análisis del voltaje de paso se tomó como referencia un electrodo con perímetro cuadrado de 2 X 2 m, sin jabalinas en los vértices el mismo que se ubicó en un suelo homogéneo de 100 Ω m y al cual se le insertó una corriente de falla de 1000 A.

También se consideró como referencia un paso (distancia entre el pie derecho y el pie izquierdo) de 1 m de longitud¹⁸.

En el estudio del potencial de paso se detectó que podía haber dos variables extras referidos a la dirección y el origen de paso, que determinan el análisis en dos partes:

- Manteniendo el origen del paso.
- Manteniendo la dirección del paso.

3.2.2.1 Manteniendo el origen del paso

El primer aspecto del estudio pretende encontrar la dirección hacia donde resulta más peligroso dar el paso, para lo que se mantendrá firme uno de los pies, que corresponde al punto inicial A de la Figura 3. 4; y se modifica la dirección hasta donde llega el otro pie, que es el punto final B de la Figura 3. 4. Este cambio de dirección se realiza mediante la tabulación en 10° en sentido anti horario; en algunos casos la variación será menor para encontrar los puntos en los que el voltaje de paso sea cero o donde la tendencia de la curva cambie de sentido es decir encontrar los picos. Además se conoce que el módulo de la extensión del paso es 1 m. Se propone este procedimiento matemático.

Aparte de las ecuaciones [3. 3] y [3. 4] para el análisis se considera:

$$\Delta x = \Delta P \cdot \cos(\theta) = 1 \cdot \cos(\theta) = \cos(\theta)$$
 [3. 6]

$$\Delta y = \Delta P \cdot sen(\theta) = 1 \cdot sen(\theta) = sen(\theta)$$
 [3. 7]

De lo cual se tendría la ecuación [3. 8], remplazando en la ecuación [3. 4] la relación obtenida en [3. 6] y [3. 7]:

$$B = (x_0 + \cos(\theta); y_0 + \sin(\theta))$$
 [3. 8]

Donde:

A: punto de inicio del paso

B: punto de final del paso

 ΔP : Longitud del paso de una persona (1m según la norma)

θ: Ángulo de inclinación con referencia al eje X positivo en sentido anti

horario.

Sobre el mismo aspecto del estudio se tomará como referencia 3 puntos

- Una de las cuatro esquinas (-1,-1)

- El centro de la malla (0,0)

- El centro de uno de los cuatro lados (1,0)

El análisis completo se encuentra en el APÉNDICE D. Se observa que el potencial de paso más alto de los tres puntos de referencia se genera en una de las esquinas del electrodo con perímetro cuadrado en dirección a la bisectriz del ángulo mayor, formado por los lados de las caras de la malla que forman el vértice.

La dirección donde se genera el potencial de paso menos peligroso es a partir del primer y tercer punto de referencia en orientación hacia el lugar sobre el conductor que forma parte del perímetro del electrodo, aunque no sea la misma dirección. También en el estudio se muestra que en el segundo punto en mención los potenciales en cualquier dirección son bajos en relación al potencial de paso más alto encontrado, no obstante, estos potenciales no lleguen a ser cero.

3.2.2.2 Manteniendo la dirección de paso

El segundo aspecto del estudio intenta investigar cuál es la ruta más peligrosa al dar una serie de pasos en una misma dirección. En el modelo se modificará la ubicación de los dos pies (punto inicial A y punto final B de la Figura 3. 4). Este cambio de posición del paso se realizará mediante incrementos desde uno de los lados perimetrales del electrodo con una variación de ΔA de 0,1 m de longitud paralela a uno de los lados del electrodo partiendo desde el punto C hasta llegar al punto D, como se observa en la Figura 3. 4. Se propone el siguiente procedimiento matemático (que puede parecer trivial, pero es de gran ayuda al considerar el análisis en un número elevado de puntos).

Tomando en cuenta las ecuaciones [3. 3], [3. 4] y [3. 5], y sabiendo que la variación en el eje Y, entre los puntos no varía, se obtiene la ecuación:

$$\Delta y = 0 ag{3.9}$$

Remplazando el valor de la ecuación [3. 9] en la relación [3. 5] y se obtiene la ecuación [3. 10]:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$\Delta P = \sqrt{\Delta x^2 + 0^2}$$

$$\Delta P = \Delta x = 1m$$

$$\Delta x = 1m$$
 [3. 10]

Sustituyendo la relación [3. 8] y [3. 9] en la ecuación [3. 4] se consigue:

$$B = (x_0 + 1; y_0)$$
 [3. 11]

Donde:

A: punto de inicio del paso

B: punto de final del paso

 ΔP : Longitud del paso de una persona (1 m según la norma)

Las direcciones paralelas a los lados que se seguirá para este estudio se muestran en la Figura 3. 5. En la misma se puede observar que se tendrá nueve direcciones diferentes paralelas a cada eje, sin embargo, por simetría solo se realizará el estudio en cinco de estas porque las otras cuatro son similares a las analizadas en el estudio.

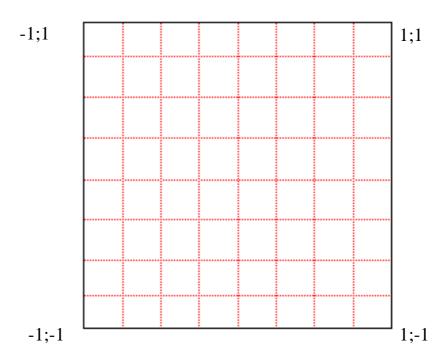


Figura 3. 5. Electrodo con perímetro cuadrado de 2X2 m sin jabalinas en los vértices, muestra (en rojo con línea segmentada) las trayectorias para el análisis del voltaje de paso

Como se dijo, se realizará el análisis en las trayectorias paralelas al eje Y se modificará los valores y_0 de la ecuación [3. 3] y [3. 11] desde -1 hasta el punto 1 con variación de 0,25 m, además en el valor de x_0 de la relación [3. 3] y [3. 11] se cambiará desde el punto -1 hasta el valor 0, con aumentos de 0,05 m.

En la Figura 3. 6 se muestra, gráficamente, los puntos del electrodo en donde se realizó el estudio así como los valores de los potenciales obtenidos en cada trayectoria.

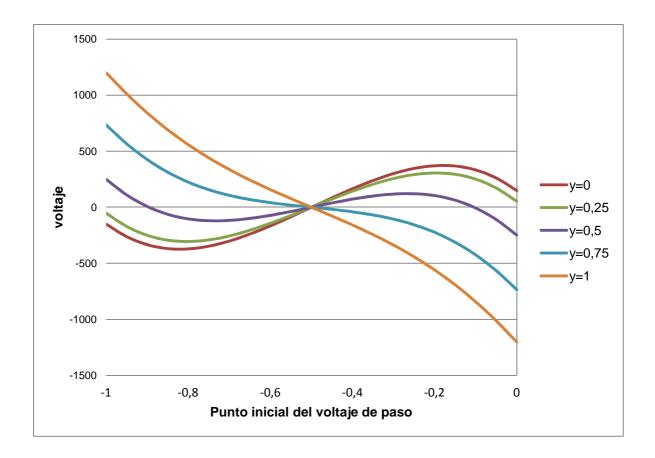


Figura 3. 6. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11 manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro cuadrado de 2x2 m sin jabalinas en los vértices para varios valores en el eje Y

En la Figura 3. 6 se visualiza que el cambio más brusco de potenciales se produce al realizar varios pasos continuos en una trayectoria sobre cualquiera de los lados perimetrales del electrodo, aunque si se mantiene una trayectoria sobre la mediana de cualquiera de los lados en dirección hacia el lado opuesto, el cambio en los potenciales de paso obtenidos son de menor magnitud.

3.2.3 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CAMBIO DE RESISTIVIDAD

Sobre el efecto del cambio de resistividad existen dos tipos de estudio, en suelo homogéneo y en suelo estratificado.

3.2.3.1 Análisis en suelo homogéneo

En los subcapítulos 3.2.1 y 3.2.2 los análisis respectivos se realizaron manteniendo la resistividad del suelo de $100~\Omega$ m en una capa homogénea, pero para explicar el efecto que provoca el cambio de resistividad con relación a la resistencia del electrodo, se varió este factor y se comprobó que los resultados se modifican directamente proporcional al cambio de magnitud en la resistividad del suelo (el estudio completo se encuentra en el APÉNDICE A) mediante el siguiente modelo:

$$R_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} R_o \tag{3. 12}$$

En la relación de cambio del voltaje de malla GPR, de punto, de toque y de paso, la relación entre las resistividades expuestas en la ecuación [3. 12] se mantiene, por lo cual:

$$GPR_f = \frac{\rho_f}{\rho_o}GPR_o$$
 [3. 13]

$$VPt_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} VPt_o$$
 [3. 14]

$$VT_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} VT_o \tag{3. 15}$$

$$VP_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} VP_o$$
 [3. 16]

Donde:

R_f: Resistencia de la malla final.

R_o: Resistencia de la malla inicial.

 ho_0 : Densidad inicial del suelo en una capa homogénea (100 Ω m para el presente estudio).

Densidad final del suelo en una capa homogénea. ρ_f : Voltaje de malla en un suelo homogéneo con densidad ρ_f . GPR_f: GPR_o: Voltaje de malla en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 . Vpt_o: Voltaje de punto en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 . Vpt_f: Voltaje de punto en un suelo homogéneo con densidad ρ_f . VT_o: Voltaje de toque en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 . VT_f: Voltaje de toque en un suelo homogéneo con densidad ρ_f . Voltaje de paso en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 . Vp_o: Voltaje de paso en un suelo homogéneo con densidad ρ_f . Vp_f:

3.2.3.2 Análisis en suelo estratificado

En un suelo estratificado de dos, tres capas o más, se necesita saber la profundidad máxima que tiene cada capa; análisis que abre la posibilidad para un próximo estudio, ya que el presente proyecto toma en cuenta únicamente los suelos homogéneos.

3.2.4 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CAMBIO DE CORRIENTE

En los análisis previos se utilizó la corriente de falla de 1000 A. No obstante, al visualizar el efecto que realiza el cambio de la magnitud de corriente, se realizo el estudio mostrado en el APÉNDICE A y se detectó que la variación de resultados obtenida es directamente proporcional al cambio de magnitud de la variable en mención, y sigue el modelo expuesto desde la ecuación [3. 17] hasta la ecuación [3. 21]:

$$R_f = R_o ag{3. 17}$$

$$GPR_f = \frac{I_f}{I_o}GPR_o$$
 [3. 18]

$$VPt_f = \frac{I_f}{I_o} VPt_o ag{3. 19}$$

$$VT_f = \frac{I_f}{I_o}VT_o$$
 [3. 20]
$$VP_f = \frac{I_f}{I_o}VP_o$$
 [3. 21]

$$VP_f = \frac{I_f}{I_o} VP_o ag{3. 21}$$

Donde:

 R_f : Resistencia de la malla final.

R_o: Resistencia de la malla inicial.

Corriente de falla inicial del (1000A para el presente estudio). I_o :

Corriente de falla final. I_f :

GPR_f: Voltaje de malla en un suelo homogéneo con densidad ρ_f .

GPR_o: Voltaje de malla en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 .

Vpt_o: Voltaje de punto en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 .

Voltaje de punto en un suelo homogéneo con densidad ρ_f . Vpt_f:

Voltaje de toque en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 . VT_o:

 VT_f : Voltaje de toque en un suelo homogéneo con densidad ρ_f .

Voltaje de paso en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 . Vp_o :

Voltaje de paso en un suelo homogéneo con densidad ρ_f . Vp_f :

3.3 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Generalmente, en la vida práctica, se usan dos tipos de varillas o jabalinas que corresponde a este tipo de configuración. Las longitudes de las varillas utilizadas son las siguientes:

- Varilla de 1,80m de longitud
- Varilla de 2,40m de longitud.

Por lo expuesto anteriormente, existen dos tipos de estudio, basándose en la longitud de las jabalinas a utilizarse.

3.2.3 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE TOQUE

Para el análisis del potencial de toque se utilizó el procedimiento que se encuentra en el APÉNDICE C. Las coordenadas de malla se encuentran en la Figura 3. 1, coincidiendo el centro del electrodo con el eje de coordenadas XY, y los potenciales generados sobre la superficie de esta configuración son similares a los expuestos en la Figura 3. 7.

Se observa que a partir de un electrodo de 2 x 2 m hasta antes de un electrodo de 4 x 4 m, la tendencia del voltaje de toque máximo se encuentra en las esquinas, y a partir de un electrodo de 4 x 4 m en adelante el voltaje de toque máximo se encuentra en el centro del electrodo.

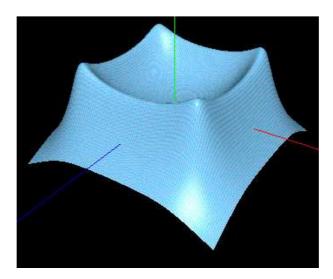


Figura 3. 7. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado un electrodo de puesta a tierra con perímetro cuadrado con jabalinas en los vértices

El análisis en los dos casos demuestra que, el potencial de punto más alto se encuentra en el centro del electrodo, iniciando en un electrodo de 2 x 2 m hasta antes de un electrodo de 4 x 4 m. Pero si se parte de un electrodo de 4 x 4 m

hasta antes de un electrodo de 6 x 6 m, el potencial de punto máximo se encontró en la parte central del lado del electrodo. Desde un electrodo de 6 x 6 m en adelante el máximo potencial en estudio se encontró en las esquinas del perímetro del electrodo y en consecuencia los menos peligrosos se ubican en el vértice del electrodo para configuraciones menores a 4 m de lado o caso contrario se localiza en el centro del electrodo.

Gráficamente la relación de los potenciales máximos y mínimos para varias magnitudes de lado, se muestra en la Figura 3. 8 para jabalinas de 180 cm y en la Figura 3. 9, para jabalinas de 240 cm de longitud.

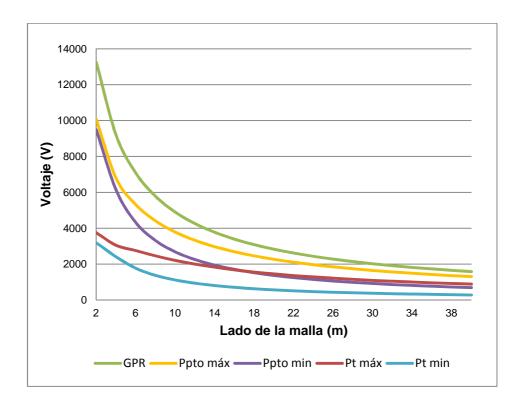


Figura 3. 8. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con perímetro cuadrado con jabalinas de 1,80 m en los vértices

Se deduce que es necesario aplicar el siguiente modelo matemático para encontrar el lugar donde se genera el voltaje de toque más peligroso en la superficie del electrodo que coincide su centro con el origen del plano cartesiano, mantiene la tendencia de la ecuación [3. 22] para potenciales máximos y la ecuación [3. 23] para potenciales mínimos.

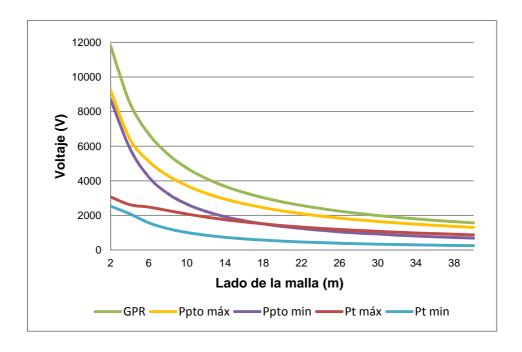


Figura 3. 9. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con perímetro cuadrado con jabalinas de 2,40 m en los vértices

$$Vt_{m\acute{a}x} = \begin{cases} \left(\pm \frac{a}{2} \; ; \; \pm \frac{a}{2}\right) & \text{Si } a < 4\\ \left(\pm \frac{a}{2} \; ; \; 0\right) \cup \left(0 \; ; \; \pm \frac{a}{2}\right) & \text{Si } 4 \le a < 6\\ (0 \; ; \; 0) & \text{Si } a \ge 6 \end{cases}$$
[3. 22]

$$Vt_{min} = \begin{cases} (0; 0) & \text{Si } a \ge 4\\ \left(\pm \frac{a}{2}; \pm \frac{a}{2}\right) & \text{Si } a < 4 \end{cases}$$
 [3. 23]

Donde:

Vtmáx: Voltaje de toque máximo. Vtmin: Voltaje de toque mínimo.

(0;0): centro de coordenadas de un plano cartesiano.

a: lado de un electrodo con perímetro cuadrado.

Los dos gráficos anteriores (Figura 3. 8 y Figura 3. 9) verifican que la longitud del electrodo para esta configuración no varía la ubicación de los potenciales sino que modifica inversamente la magnitud de los voltajes generados en la superficie del

suelo sobre el electrodo; además, la variación del voltaje de toque entre sus valores máximo y mínimo va disminuyendo. Esto tiene similar interpretación a la expuesta en el subcapítulo 3.2.1, con la diferencia que la variación de este tipo de configuración de malla es menor a la del subcapítulo mencionado.

3.4 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO CON RETICULADO INTERNO DE 2X 2 METROS Y SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

El esquema del aterrizaje de este tipo de configuración y los potenciales de punto que se dan sobre la superficie del suelo de la misma se observan en la Figura 3. 10.

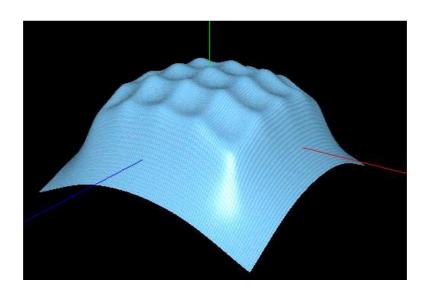


Figura 3. 10. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 8X8 m con reticulado interno de 2X2 m sin jabalinas en los vértices

El programa permite visualizar que los potenciales de puntos críticos fueron $(2w+1)^2$ puntos (ver más adelante el significado de w), y son lugares en los que se tuvo los potenciales de punto críticos, en estos sitios cambia la tendencia del potencial, pero varios de estos puntos se encuentran uniformemente distribuidos en cuadrículas internas, las cuales varían según la ecuación [3. 24]. El

procedimiento para encontrar esta relación se encuentra en el APÉNDICE E, por esta razón se toma como referencia la cantidad de coordenadas para encontrar la tendencia del lugar en donde se localizan los máximos potenciales de punto y toque.

Donde

a: lado de un electrodo con perímetro cuadrado.

w: relación entre la longitud del lado del perímetro del electrodo y la longitud del lado de la cuadrícula interna.

Se detectó que el voltaje de toque más peligroso se encuentra en la esquina del electrodo y el más seguro varía según la relación entre la longitud del lado del cuadrado perimetral y la cuadrícula. Si la relación es par existe un solo punto donde el voltaje de toque es menor el cual se encuentra en el centro del electrodo; pero, si la relación es impar existen cuatro lugares en los que el voltaje de toque es seguro los cuales se encuentran en los vértices de la cuadrícula central porque la misma tiene un centro que coincide con el del electrodo.

Matemáticamente se puede expresar el/los punto/s seguro/s como la siguiente ecuación:

$$Vt \ m\acute{a}x = \left(\pm \frac{a}{2}; \pm \frac{a}{2}\right)$$
 [3. 25]

$$Vt \ min = \begin{cases} (0,0) & si \ w \ es \ par \\ \left(\pm \frac{c}{2}; \pm \frac{c}{2}\right) & si \ w \ es \ impar \end{cases}$$
 [3. 26]

$$w = \frac{a}{c}$$
 [3. 27]

Donde:

a: es la longitud de la malla.

c: es la longitud del retículo interno de la malla.

w: es la relación exacta entre a y c

Tabulados los datos de los potenciales máximos y mínimos para varias longitudes de lados, se graficó y se obtuvo la Figura 3. 11.

En la Figura 3. 11, se observa similar tendencia que los modelos anteriores, con la diferencia que los potenciales obtenidos son de menor magnitud que los anteriores, además que, para este esquema la valor del potencial de punto máximo es muy cercano al potencial del electrodo (Ground Potencial Rise GPR), incluso a medida que la longitud de los lados aumente la diferencia entre el potencial de punto máximo y el GPR tiende a cero.

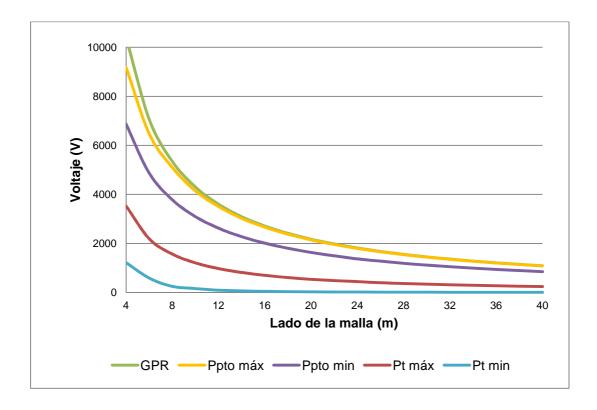


Figura 3. 11. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m sin jabalinas

3.5 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO CON RETICULADO INTERNO DE 2 X 2 CON ELECTRODOS EN LOS VÉRTICES

Se realizó este análisis en base a dos tipos de jabalinas tal como se explicó en el sub Capítulo 3.3, las cuales son de una longitud de 180 cm y 240 cm.

3.5.1 ANÁLISIS DEL VOLTAJE DE TOQUE CON ELECTRODOS DE 180 CENTÍMETROS

Los potenciales de punto generados sobre el suelo de la superficie son análogos al comportamiento de potenciales de punto que observan en la Figura 3. 12, mientras el esquema de esta configuración se encuentra en el APÉNDICE B.

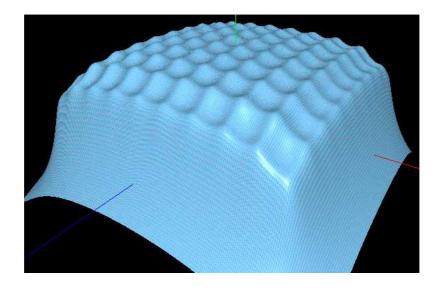


Figura 3. 12. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 18 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 180 centímetros en los vértices

Se encontró que el voltaje de toque más peligroso se dio en lugares muy similares a la configuración de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2 x 2 m sin jabalinas en los vértices, los cuales siguen el modelo matemático de

las ecuación [3. 25] para la ubicación de los potenciales de toque máximos, mientras que la ecuación [3. 26] muestra una relación para encontrar los potenciales de toque mínimos generados.

Se obtuvieron los resultados del comportamiento sobre la superficie del suelo en donde se instala esta configuración de SPT, encontrando los potenciales máximos y mínimos que se dan en esta configuración, con estas deducciones tabuladas alcanzó la gráfica de la Figura 3. 13.

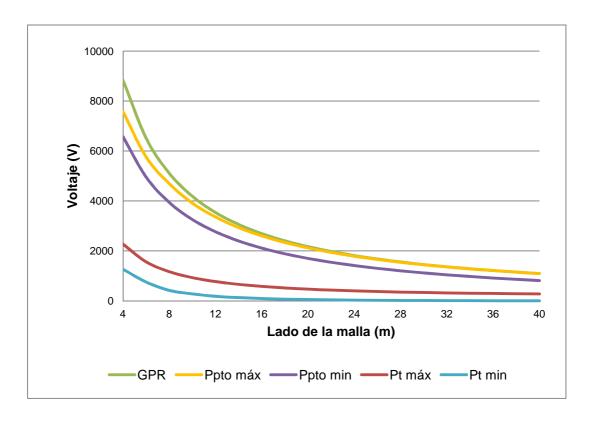


Figura 3. 13. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 180 centímetros en los vértices

La Figura 3. 13 muestra la tendencia de los potenciales a medida que aumenta el lado del perímetro externo de esta configuración, los mismos que mantienen similar concepto que los potenciales máximos y mínimos generados en configuraciones de similar perímetro externo, con la diferencia en que las magnitudes de estos potenciales son menores que las anteriores configuraciones.

3.5.2 ANÁLISIS DEL VOLTAJE DE TOQUE CON ELECTRODOS DE 240 METROS

La Figura 3. 14, muestra el comportamiento de los potenciales de punto sobre el suelo de la configuración en estudio, la cual es similar al comportamiento anterior.

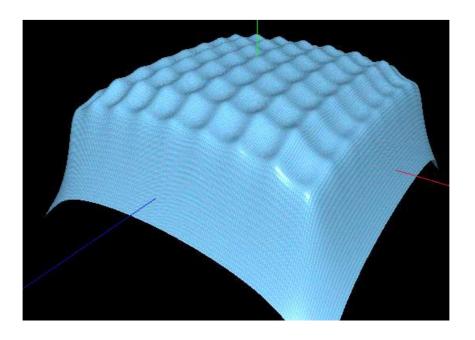


Figura 3. 14. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 16 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 240 centímetros en los vértices

La ubicación de los potenciales máximos y mínimos tanto de toque como de punto de esta configuración de electrodo es análoga a la expuesta anteriormente, por lo cual la ubicación de los potenciales máximos y mínimos no varían, solo disminuyen su magnitud. Para encontrar el lugar donde se obtiene el máximo y mínimo potencial de toque sobre la superficie del suelo donde se instala este esquema de SPT obedece al modelo matemático de las ecuación [3. 25] para la ubicación de los potenciales de toque máximos, mientras que la ecuación [3. 26] muestra una relación para encontrar los potenciales de toque mínimos generados.

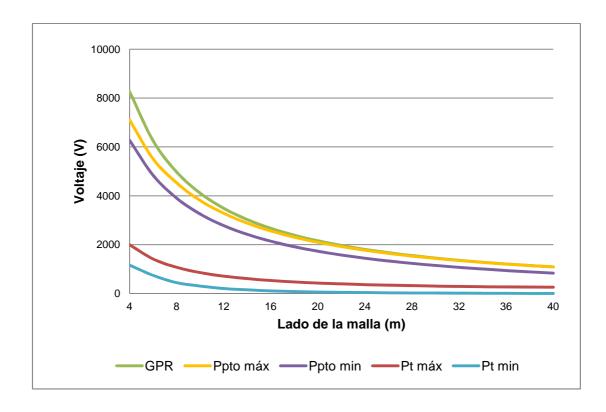


Figura 3. 15. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 240 centímetros en los vértices

3.6 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO CON RETICULADO INTERNO DE 2 X 2 CON JABALINAS EN LAS UNIONES PERIMETRALES

Como se explicó en el subcapítulo 3.3, por cuestiones prácticas se usarán como base dos tipos de jabalinas que comercialmente son fáciles de adquirir y las cuales tienen una longitud de 180 cm y 240 cm.

3.6.1 ANÁLISIS DEL VOLTAJE DE TOQUE CON ELECTRODOS DE 180 CENTÍMETROS

Los potenciales de punto que se generan en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2 x 2 m y con

jabalinas de 180 cm en las uniones perimetrales se asemejan a la Figura 3. 16.

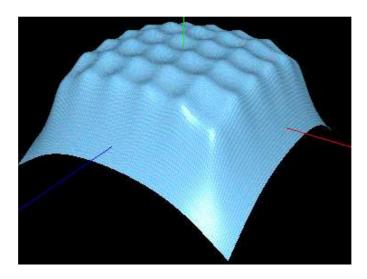


Figura 3. 16. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 10 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales

La ubicación de los potenciales máximos y mínimos tanto de toque como de punto de esta configuración de electrodo es similar a los casos anteriores, solo disminuyen su magnitud. Las ecuaciones para encontrar la ubicación de los máximos potenciales de toque sobre la superficie del electrodo se obedece al modelo matemático de las ecuación [3. 25], mientras que la ecuación [3. 26] muestra una relación para encontrar los potenciales de toque mínimos generados.

En la Figura 3. 17 se muestran los potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de esta configuración para varias longitudes de sus lados.

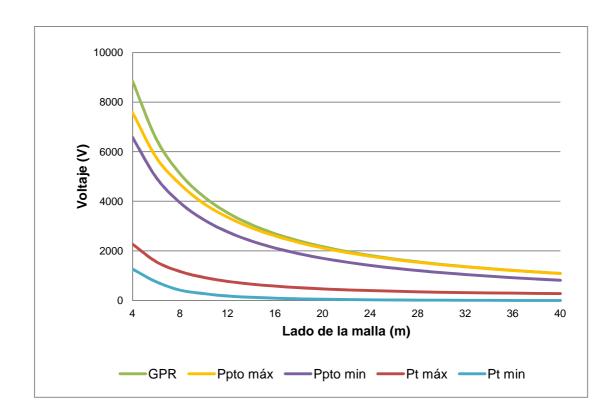


Figura 3. 17. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales

3.6.2 ANÁLISIS DEL VOLTAJE DE TOQUE CON ELECTRODOS DE 240 METROS

Los potenciales generados en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2 x 2 m y con jabalinas de 240 cm en las uniones perimetrales se asemejan a la Figura 3. 18.

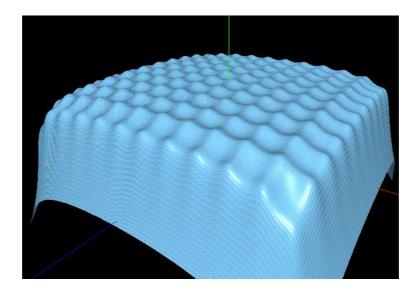


Figura 3. 18. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 22 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 240 centímetros en las uniones perimetrales

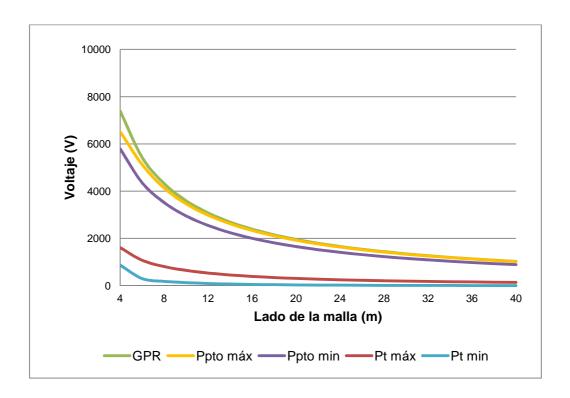


Figura 3. 19. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 240 centímetros en las uniones perimetrales

Mantiene el mismo criterio que la configuración anterior con relación a la ubicación de los potenciales de te punto, toque y el GPR, a diferencia que estos disminuyen el valor de su magnitud y se los puede ver los potenciales para varias longitudes de lado en la Figura 3. 19.

3.7 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO CON RETICULADO INTERNO DE 8 X 8 METROS SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

El análisis para esta configuración permite observar que los potenciales que se generan sobre la superficie del suelo se encuentran en la Figura 3. 20; donde se muestra los potenciales generados para un electrodo con perímetro cuadrado de 24 m de lado con reticulado interno de 8 x 8 m sin jabalinas en los vértices.

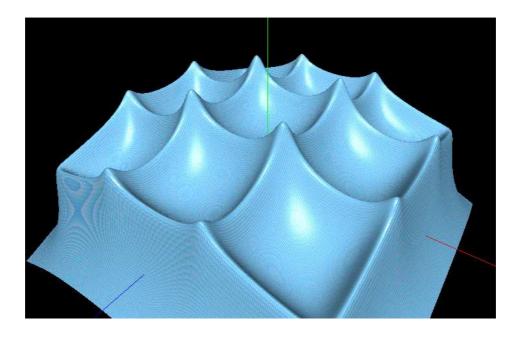


Figura 3. 20. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 24 m de lado, con reticulado interno de 8x8 m sin jabalinas en los vértices

Similar al caso con reticulado interno de 2 x 2 m, el voltaje de toque más peligroso

se encuentra en la esquina del electrodo y el más seguro varía según la relación entre la longitud del lado del cuadrado perimetral y la cuadrícula. Si la relación es par existe un solo punto donde el voltaje de toque es menor el cual se encuentra en el centro del electrodo; pero, si la relación es impar existen cuatro lugares en los que el voltaje de toque es seguro los cuales se encuentran en los vértices de la cuadrícula central porque la misma tiene un centro que coincide con el del electrodo. El modelo matemático que muestra la ubicación de los potenciales según la longitud del lado perimetral del electrodo se encuentra en la ecuación [3. 25] para la ubicación de los potenciales de toque máximos, mientras que la ecuación [3. 26] muestra una relación para encontrar los potenciales de toque mínimos generados.

Los potenciales máximos y mínimos que se obtienen para esta configuración según la longitud de lado perimetral de la malla se observa en Figura 3. 21

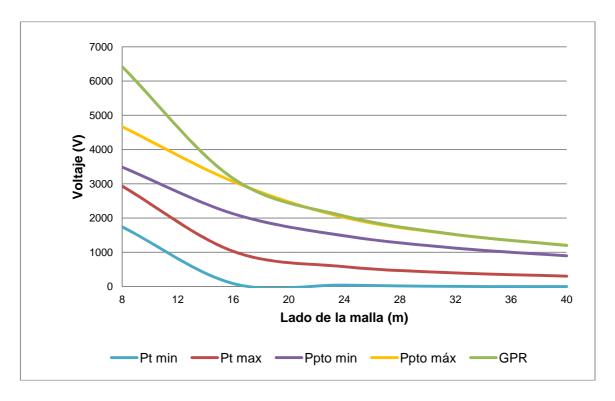


Figura 3. 21. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m sin jabalinas en los vértices

3.8 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO CON RETICULADO INTERNO DE 8 X 8 CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Los potenciales de punto generados sobre el suelo de la superficie son análogos al comportamiento de potenciales de punto que observan en la Figura 3. 22, mientras el esquema de esta configuración se encuentra en el APÉNDICE B.

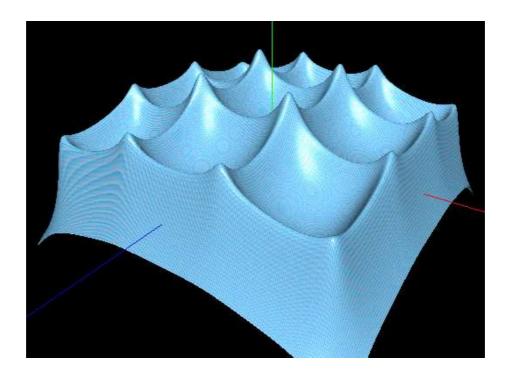


Figura 3. 22. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 24 m de lado, con reticulado interno de 8x8 m con jabalinas de 240 centímetros en los vértices

En la configuración se encontró que la longitud de las jabalinas ubicadas en el vértice no afectan la ubicación del punto donde se genera el potencial de toque más alto o más bajo. Además, la ubicación de estos potenciales máximos y mínimos (de toque y de punto) que se genera sobre la superficie de la malla nuevamente coincide con el caso anterior. Los máximos y mínimos potenciales que se generan sobre la superficie de la malla se muestran en las Figura 3. 23 y Figura 3. 24; para las jabalinas de 180 cm y 240 cm respectivamente.

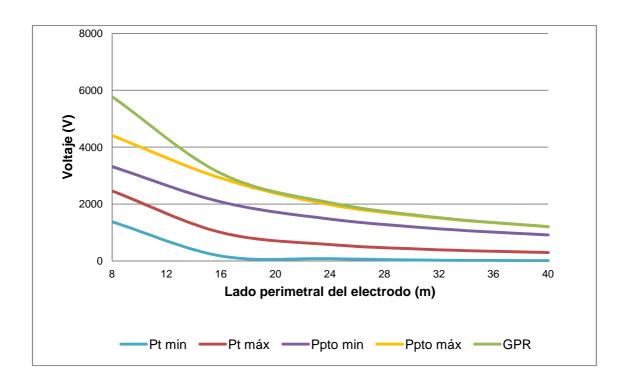


Figura 3. 23. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con jabalinas de 180 en los vértices

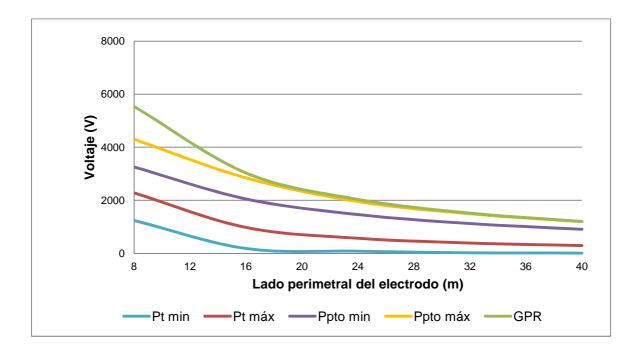


Figura 3. 24. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con jabalinas de 240 en los vértices

Los potenciales máximos y mínimos mantienen un modelo matemático similar al expuesto en la ecuación [3.21] para potenciales máximos y la ecuación [3.22] para potenciales mínimos.

3.9 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO CUADRADO CON RETICULADO INTERNO DE 8 X 8 CON JABALINAS EN LAS UNIONES PERIMETRALES

Los potenciales de punto que se obtienen sobre la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8 X 8 metros con jabalinas en la uniones perimetrales, se muestran en la Figura 3.25, además el comportamiento de las ubicaciones de los potenciales de toque máximo y mínimo mantienen el mismo criterio que la configuración anterior, lo que se puede apreciar es que existe una disminución de la magnitud de los potenciales, como se muestra en la Figuras 3.26 y en la Figura 3.27 para jabalinas de 180 cm y 240 cm respectivamente.

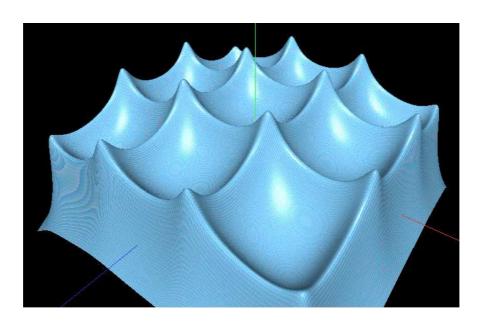


Figura 3. 25. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro cuadrado de 24 m de lado, con reticulado interno de 2x2 m con jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales

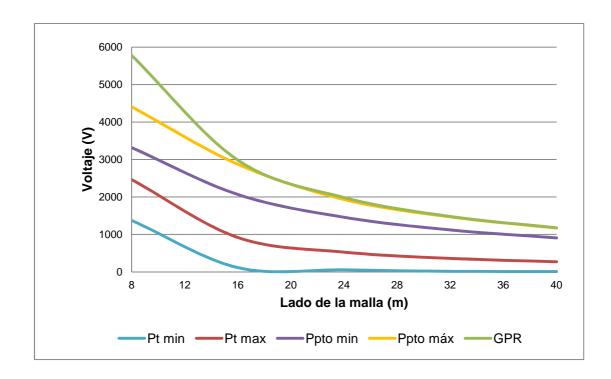


Figura 3. 26. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con jabalinas de 180 centímetros en las uniones perimetrales

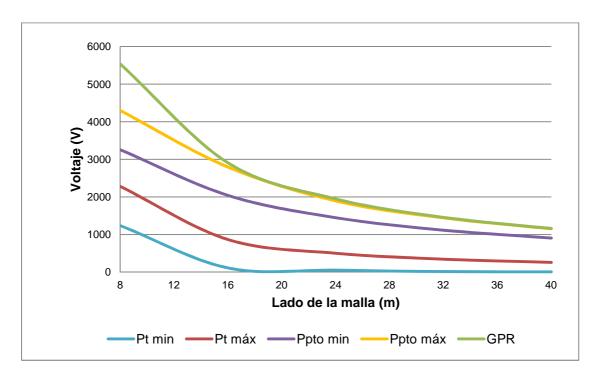


Figura 3. 27. Relación de voltajes máximos y mínimos a medida que aumenta el lado de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno de 8x8 m con jabalinas de 240 centímetros en las uniones perimetrales

De estos modelos de configuración de malla, lo que se apreció es que la ubicación de los potenciales de toque y de punto tanto máximos como mínimos no se ve afectado por el área de la cuadricula que se emplee para realizar el reticulado interno de un electrodo con perímetro cuadrado por lo que para los siguientes capítulos se estudiara únicamente las configuraciones con reticulado de dos metros de lado. También si se emplea un reticulado con perímetro rectangular (Apéndice J) se observa que mantiene un criterio muy similar al que se logra con los reticulados con perímetro cuadrado por lo que este estudio no se repetirá para otras configuraciones.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE ELECTRODOS CON PERÍMETRO RECTANGULAR

4.1 RESUMEN DEL ESTUDIO

El análisis del tipo de configuración de electrodos con perímetro rectangular exige mantener el esquema expuesto en el estudio realizado en el capítulo 3. Este análisis se basará en la relación entre el ancho o lado corto y la base o lado largo del rectángulo, tal como muestra la Figura 4. 1.

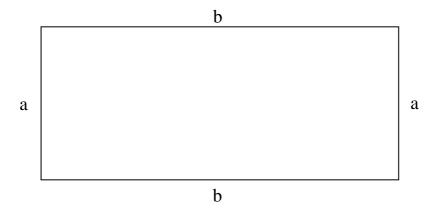


Figura 4. 1. Modelo básico de un rectángulo

Donde:

a: ancho del rectángulo (lado corto)

b: base del rectángulo (lado largo)

Esta configuración se basará en el lado "a" para encontrar el lado "b" con una relación r entre a y b que responde a la ecuación [4.1]

$$b = r \times a \tag{4.1}$$

Donde:

r: relación(mayor que la unidad) a dimensional, que se variará entre los

valores 1,4; 1,5; 2 en el presente estudio.

a: ancho del rectángulo (lado corto)

b: base del rectángulo (lado largo)

Esta restricción de r es debido a que en la práctica el lado b es del orden de dos veces el lado a, y además si esta relación tiende a la unidad el estudio se asemeja al del capítulo 3.

El análisis se realizará en electrodos con perímetro rectangular, entre los cuales se tiene:

- Electrodos con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro rectangular con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro rectangular con reticulado interno sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro rectangular con reticulado interno con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro rectangular con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales.

4.2 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO RECTANGULAR SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Como se explicó anteriormente, el programa de ordenador GNDSTUDIO 1.0 realiza dos tipos de análisis, uno para encontrar el mayor potencial de toque; y otro que permite visualizar el mayor potencial de paso sobre la superficie del electrodo.

4.2.1 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE TOQUE O CONTACTO

Para este análisis se aplicaron los pasos descritos en el APÉNDICE C. El modelo de un electrodo con perímetro rectangular en el que coinciden los dos ejes se muestra en la Figura 4. 2.

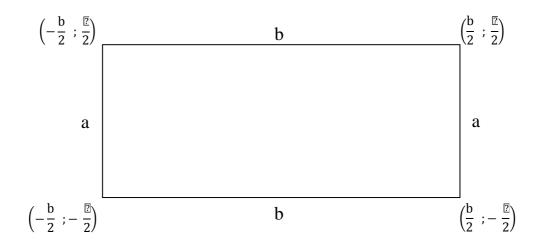


Figura 4. 2. Esquema con coordenadas de un electrodo con perímetro rectangular de área axb

El estudio es similar al de los electrodos con perímetro cuadrado, pero con la diferencia que se dividió el análisis en tres partes, la primera para cuando la relación es igual a 1,4, la segunda para relaciones equivalentes a 1,5 y la última para un valor de 2 de "r". En los tres casos se obtuvieron comportamientos análogos, teniendo como resultado la Figura 4. 3, en la cual se esquematiza los casos: la sección a) simboliza la primera relación; la b) demuestra el segundo valor de r y las secciones c) y d) permiten visualizar un esquema con relación de 2.

Para los tres casos establecidos por el parámetro de r (r igual a 1,4, 1,5 y 2) se pudo observar que los valores de potencial de toque más peligrosos varían a medida que el electrodo aumenta sus dimensiones; por esta razón, mientras "a" sea menor o igual que dos, el potencial más peligroso se encontrará en las esquinas del electrodo perimetral, y en caso contrario, el potencial de contacto más elevado se encontrará en el centro del electrodo, mientras que los menos peligrosos se ubican en el centro de los lados mayores (lado b) del electrodo.

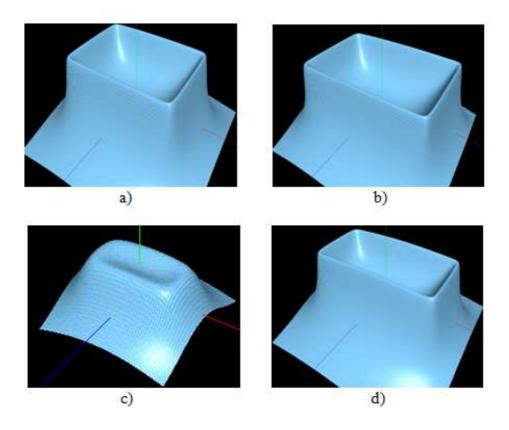


Figura 4. 3. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices a) de 10x14 b) de 12x18 c) de 2x4 m d) de 8x16

Se deduce que el modelo matemático para encontrar los puntos donde se genera el voltaje de toque más peligroso en la superficie del electrodo, sigue el modelo de la ecuación [4.2].

$$Vt_{m\acute{a}x} = \begin{cases} \left(\begin{array}{c} \pm \frac{b}{2} \; ; \; \pm \frac{a}{2} \\ (0 \; ; \; 0) \end{array} \right) & si \; 0 < a \le 2 \\ si \; a > 2 \end{cases}$$
 [4.2]

Además el voltaje de toque mínimo se ubica en el centro del lado más pequeño, que se describe en la ecuación [4.3].

$$Vtmin = \left(\pm \frac{b}{2}; 0\right)$$
 [4.3]

Donde:

a: medida que tiene el ancho del electrodo visto según la configuración que muestra la Figura 4. 2.

b: medida que tiene el largo del electrodo visto según la configuración que muestra la Figura 4. 2.

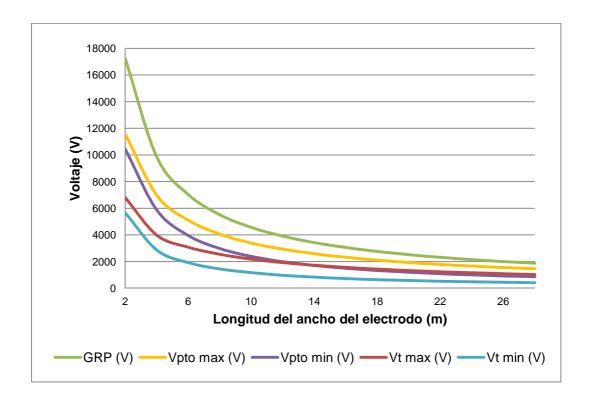


Figura 4. 4. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de varias dimensiones con r=1,4

Adicionalmente, la variación del voltaje de toque entre sus valores máximo y mínimo va disminuyendo en las tres opciones de "r". Esto se puede interpretar porque, a medida que aumentan los lados de un electrodo con perímetro rectangular, el voltaje de toque va disminuyendo, es decir, el voltaje de toque es inversamente proporcional a la magnitud de la longitud de los lados y tiende a ser cero. Se concluye que disminuirían los voltajes de toque peligrosos si el lado de referencia del electrodo fuese extenso, lo que se visualiza en la Figura 4. 4; Figura 4. 5 y Figura 4. 6.

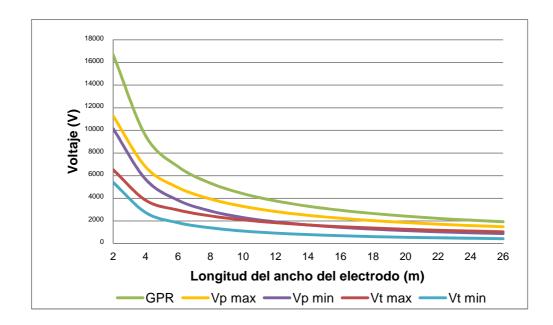


Figura 4. 5. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de varias dimensiones con r=1,5

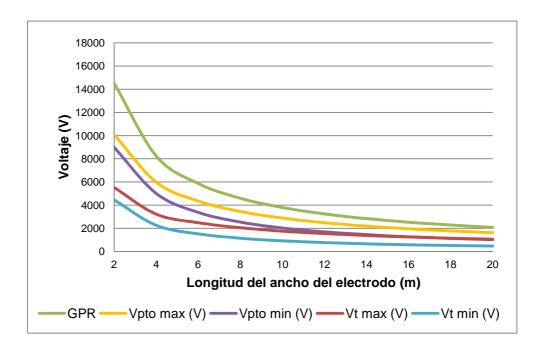


Figura 4. 6. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de varias dimensiones con r=2

Los resultados permiten concluir que, a medida que la relación entre el largo y el ancho sea mayor, el valor del potencial de toque va disminuyendo porque es inversamente proporcional al de r, anotándose que el potencial de toque es una

diferencia de potencial entre el potencial de punto y el potencial de la malla que tiene una magnitud diferente en cada caso.

4.2.2 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE PASO

En este estudio se consideraron las aclaraciones expuestas en el capítulo 3 en el ítem 3.2.2. Para el análisis del voltaje de paso se tomó como referencia un electrodo con perímetro rectangular de 2 X 4 m sin jabalinas en los vértices, el mismo que se ubicó en un suelo homogéneo de 100 Ω m y al cual se le insertó una corriente de falla de 1 000 A.

Como se describió en el subcapítulo 3.2.2.1, se ha considerado como referencia un paso (distancia entre el pie derecho y el izquierdo) de 1 m de longitud¹⁹; además las variables que determinan el análisis en dos partes; una referida a mantener el origen del paso y otra, a la dirección del paso.

4.2.2.1 Manteniendo el origen del paso

Para este primer aspecto del estudio se toma como referencia cuatro puntos:

- En una de las cuatro esquinas (-2,-1),
- En el centro de la malla (0,0)
- En el centro de uno de los lados más largos (0,1)
- En el centro de uno de los lados más cortos (2,0)

En la Figura 4.7 se muestran gráficamente los puntos de la malla en los cuales se realizará el estudio.

¹⁹ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, párrafo 9, pág. 23

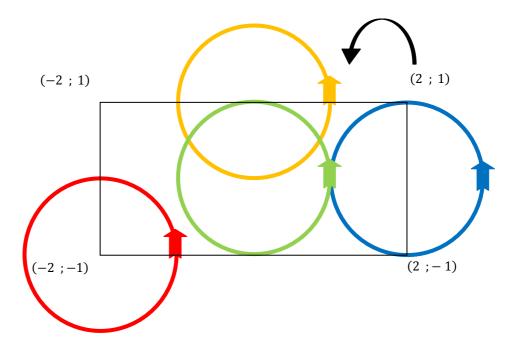


Figura 4.7. Electrodo con perímetro rectangular de 2X4 m sin jabalinas en los vértices con coordenadas y direcciones de los puntos para el cálculo del potencial del paso

El análisis completo se encuentra en el Apéndice F. Se observa que el potencial de paso más alto de los cuatro puntos de referencia se genera al dar un paso desde el centro del lado largo del electrodo con perímetro rectangular (trayectoria en amarillo en la Figura 4.7) en dirección a la mediana generada en este lado hacia afuera del perímetro del electrodo. Mientras que el potencial de paso menos peligroso en los cuatro puntos de referencia se obtiene al dar un paso (desde cualquiera de los puntos en referencia) hasta llegar a un punto sobre el conductor que forma parte del perímetro del electrodo. En el caso de encontrarse en el centro del electrodo como punto de inicio no se encontrarán potenciales seguros, pero en toda dirección se encontrarán potenciales más bajos que los potenciales que se generen en otros puntos de referencia, así, si comparamos el potencial más alto generado en el centro del electrodo con el potencial más alto generado en otro de los tres puntos restantes, se muestra que el primero es alrededor del 18% del otro potencial generado en cualquiera de los tres puntos restantes.

4.2.2.2 Manteniendo la dirección de paso

En este segundo aspecto del estudio, se realiza un proceso similar al del subcapítulo 3.2.2.2. La diferencia está en que no coinciden los cuatro lados porque el rectángulo tiene lados iguales de dos en dos, por lo que el estudio se realizará para el caso en que la trayectoria sea paralela al eje X; y otro estudio para el caso en que la ruta a elegirse sea paralela al eje Y.

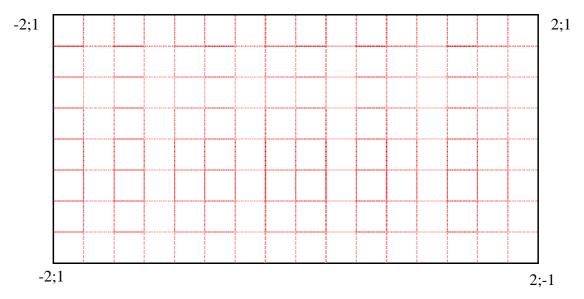


Figura 4. 8. Electrodo con perímetro rectangular de 2X4 m, sin jabalinas en los vértices muestra (en rojo con línea segmentada) las trayectorias para el análisis del voltaje de paso

En la Figura 4. 8 se muestran las coordenadas de electrodo que se tomará como referencia, así como también las diecisiete rutas posibles paralelas al lado corto, eje Y; y las nueve rutas paralelas al lado largo, eje X.

Una vez tabulados todos los resultados, se graficaron y se obtuvo la Figura 4. 9 y la Figura 4. 10 en las que se muestran las variaciones de los potenciales de paso a medida que se sigue por cada una de las trayectorias, ya sea paralela al eje X, Figura 4. 9; o paralela al eje Y que se observa en la Figura 4. 10.

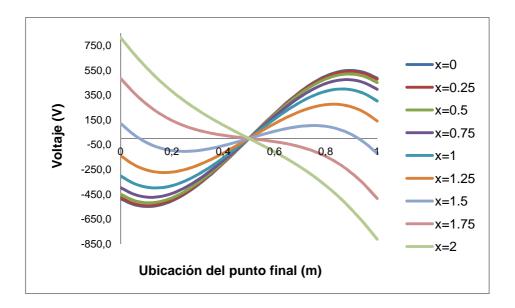


Figura 4. 9. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11 manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del Electrodo de 4x2 m con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices para varios valores en el eje X

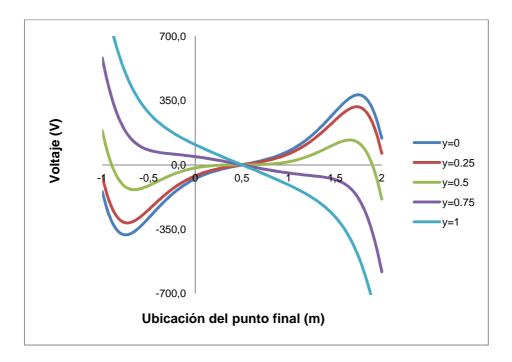


Figura 4. 10. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11 manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices de 4x2 m para varios valores en el eje Y

De los resultados se infiere que la trayectoria más estable es aquella paralela al lado más corto o eje Y que se observa en la Figura 4. 2, ubicada en el punto a un cuarto desde la esquina de la malla, que puede ser expresada como la ecuación [4.4] y en la dirección al eje X.

$$x = \pm \frac{b}{4} \tag{4.4}$$

La trayectoria más inestable es aquella sobre la base y paralela al lado largo. El modelo matemático obedece a la relación de la ecuación [4.5] si se toma como referencia la Figura 4. 2.

$$y = \pm \frac{a}{2} \tag{4.5}$$

4.3 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO RECTANGULAR CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Se relaciona con el tema expuesto en el subcapítulo 3.3; no obstante el análisis toma como referencia las jabalinas o varillas que normalmente se usan para colocarse en forma perpendicular a la superficie de la malla, los cuales tiene una longitud de 180 cm y 240 cm.

Esta división del análisis seguirá con los valores de la relación entre el lado corto y la base o lado largo (r=1.40, r=1.5 y r=2).

4.3.1 ANÁLISIS CON ELECTRODOS DE 180 CENTÍMETROS

El análisis sigue el procedimiento expuesto en el ítem 4.1.2 Se observa que si el lado es menor o igual a dos metros de longitud, el voltaje de toque mínimo se encuentra en el centro del lado corto y el voltaje máximo en la esquina; mientras

que si el lado corto es mayor a dos metros de longitud, el voltaje de toque máximo se traslada al centro de la malla y el voltaje de toque mínimo se ubica en la esquina.

Este comportamiento se expresa en las ecuaciones [4.6] y [4.7] y para la Figura 4. 2.

$$Vt min = \begin{cases} (0; \pm a) & si \ a \le 2m \\ (\pm \frac{b}{2}; \pm \frac{a}{2}) & si \ a > 2m \end{cases}$$
 [4.6]

$$Vt \, m\acute{a}x = \begin{cases} \left(\pm \frac{b}{2}; \pm \frac{a}{2}\right) & si \, a \leq 2m \\ (0; 0) & si \, a > 2m \end{cases}$$
 [4.7]

Una vez tabulados los datos se realizó el análisis de los distintos comportamientos de los electrodos según la relación "r" que se toma como referencia para todo el Capítulo, y se obtienen los gráficos de Figura 4. 11, Figura 4. 12 y la Figura 4. 13.

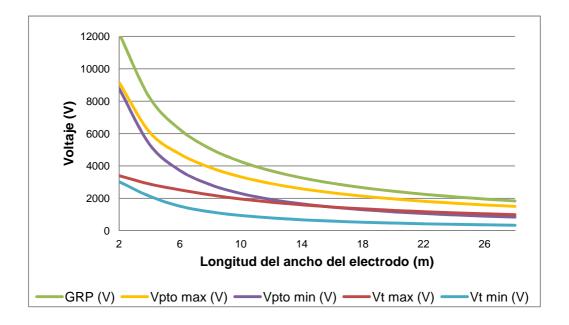


Figura 4. 11. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.4 y con electrodos de 180 cm en los vértices

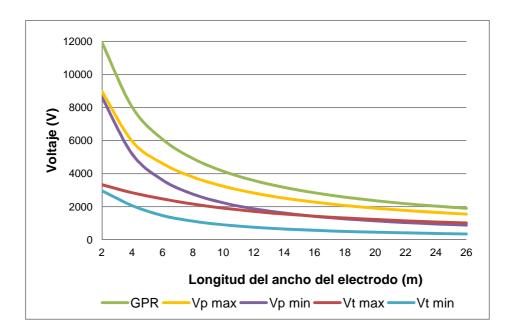


Figura 4. 12. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.5 y con electrodos de 180 cm en los vértices

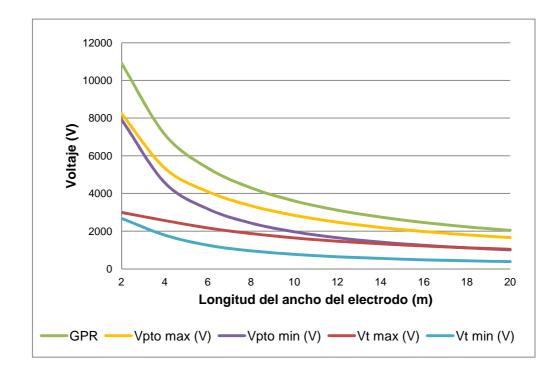


Figura 4. 13. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 2 y con electrodos de 180 cm en los vértices

De la observación de las tres últimas figuras se puede entender que a mayor relación "r", es menor el potencial de toque, con lo que se concluye que la relación "r" es inversamente proporcional al potencial de toque que genera la malla.

4.3.2 ANÁLISIS CON ELECTRODOS DE 240 CENTÍMETROS

Se realiza un análisis similar al ítem 4.1.2 con jabalinas de 240 cm, y se visualiza que la relación encontrada en las ecuaciones se mantiene, con la diferencia que la magnitud de potencial disminuye. Verificada la relación se procedió a graficar los valores máximos y mínimos para cada una de las relaciones de "r", las que se encuentran en la Figura 4. 14, Figura 4. 15 y Figura 4. 16.

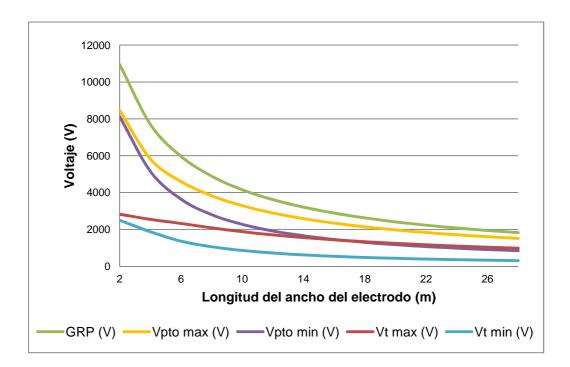


Figura 4. 14. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.4 y con jabalinas de 240 cm en los vértices

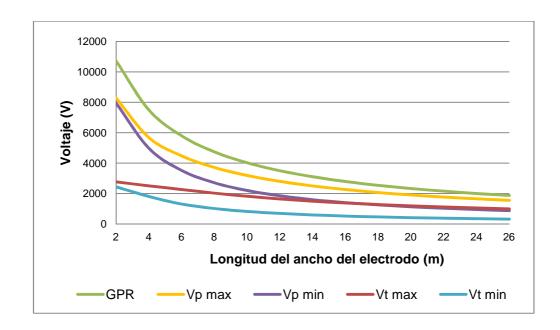


Figura 4. 15. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 1.5 y con jabalinas de 240 cm en los vértices

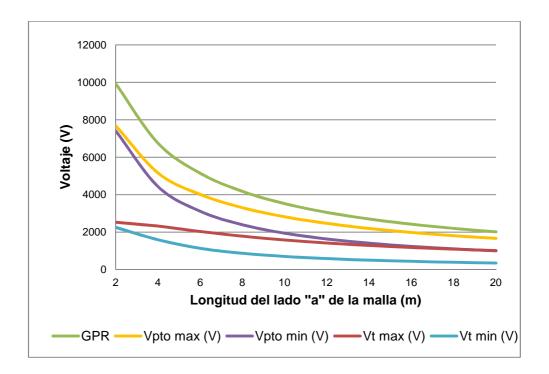


Figura 4. 16. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de un electrodo con perímetro rectangular con una relación de 2 y con electrodos de 240 cm en los vértices

El estudio basado en las tres últimas Figuras demuestra la relación encontrada para jabalinas de 240 cm; en la que la relación "r" es inversamente proporcional al potencial de toque que genera la malla, además, la longitud de la jabalina no tiene influencia en el lugar donde se generen los mayores y menores potenciales.

4.4 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO RECTANGULAR CON RETICULADO INTERNO SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Para este tipo de configuración se tomó en cuenta que el valor tanto del lado "a" como del lado "b" del rectángulo era un múltiplo de 2 y se realizó solo en mallas que tengan una relación de r=2, y el reticulado interno tiene cuadrículas de 2 x 2m. Al igual que en Capítulo 3, se tomó como referencia w (ec. [4.8]) que se había definido como la relación entre el lado del cuadrado y el lado de la cuadrícula del reticulado, el procedimiento para mallas rectangulares determina que el lado de la malla en referencia será el lado corto (ancho) de la malla, y la relación matemática de w será la q se expresa en la ecuación [4.8].

$$w = \frac{a}{c} \tag{4.8}$$

Donde:

a: ancho del rectángulo (lado corto).

w: número de cuadrículas que estarán en el lado corto.

c: es el valor del lado del cuadrado que será la referencia para la

cuadrícula interna.

Para este caso el valor de "c" será 2 y los valores de "a" irán aumentando en unidades de 2 metros de longitud.

Se realizó el procedimiento expuesto en el ítem 4.1.3. Se observa que si el número de cuadrículas en el lado corto de un rectángulo es impar pero diferente

de uno, el voltaje de toque mínimo se ubicará en el centro de la malla. Si el valor es par o igual a uno, el voltaje de toque mínimo se encontrará en los vértices de las uniones de las dos cuadrículas centrales; además, el voltaje de contacto máximo se establecerá en las esquinas de la malla. La relación matemática encontrada se detalla en las ecuaciones [4.9] y [4.10].

$$Vtmin = \begin{cases} (0,0) & si \ w = 1 \ \cup w \ es \ par \\ \left(\pm \frac{c}{2} \ ; \ 0 \ \right) & si \ w \ es \ impar \end{cases}$$
 [4.9]

$$Vtm\acute{a}x = \left(\pm \frac{b}{2}; \pm \frac{a}{2}\right)$$
 [4.10]

Establecida la relación para encontrar los voltajes de toque máximos y mínimos en la superficie del suelo sobre el electrodo se tabularon los datos para encontrar la gráfica expuesta en la Figura 4. 17, donde se visualiza que a medida que el lado a aumente el voltaje de toque mínimo, tiende a cero mientras que el voltaje de toque máximo disminuye pero hasta ser 30 % del GPR.

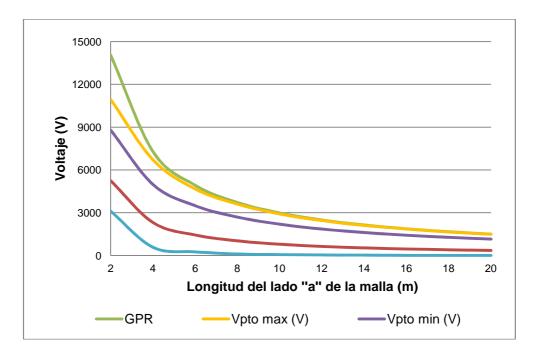


Figura 4. 17. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de malla rectangular con reticulado interno de 2 x 2 m, con relación 2 y sin electrodos

4.5 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO RECTANGULAR CON RETICULADO INTERNO CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Para esta configuración los potenciales que se generan en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro rectangular con reticulado interno de 2x2 se observa en la Figura 4.18, además, el análisis fue similar al ítem anterior, en el cual se observó que los puntos de toque máximos y mínimos sobre la superficie del suelo del electrodo se ubicaran en los mismos puntos que establece las ecuaciones [4.9] y [4.10], con la diferencia que la magnitud estos potenciales disminuye.

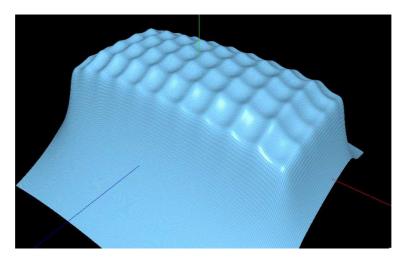


Figura 4. 18. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado por un electrodo de puesta a tierra con perímetro rectangular de 10 x 20 m con reticulado interno de 2 x 2 m, con relación 2 y con electrodos en los vértices de 180 cm

La figura 4.19 y en la figura 4.20, muestra los potenciales máximos y mínimos generados para esta configuración de malla para varias longitudes de lado, la primera para jabalinas de 180 cm y la siguiente figura para jabalinas de 240 cm.

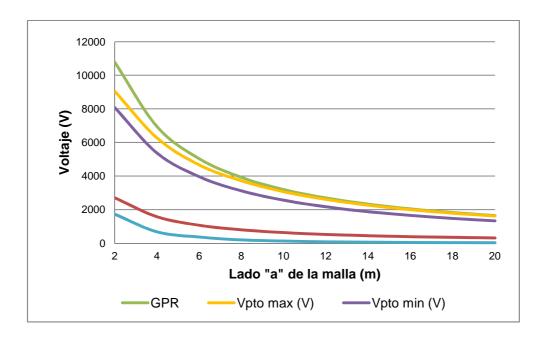


Figura 4. 19. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de malla rectangular con reticulado interno de 2 x 2 m, con relación 2 y con electrodos en los vértices de 180 cm

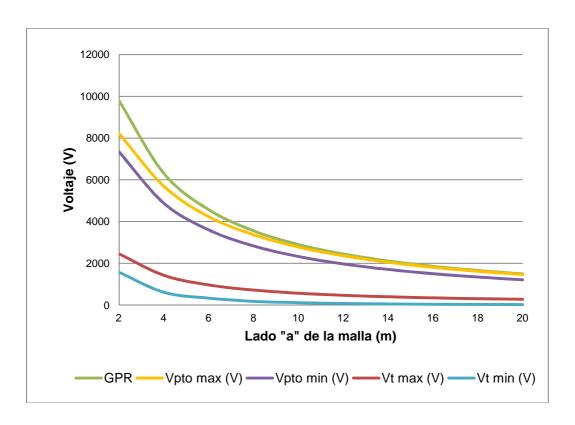


Figura 4. 20. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de malla rectangular con reticulado interno de 2 x 2 m, con relación 2 y con electrodos en los vértices de 240 cm

4.6 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO RECTANGULAR CON RETICULADO INTERNO CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES EN LAS UNIONES PERIMETRALES

Los potenciales de punto generados sobre el suelo de la superficie son análogos al comportamiento de potenciales de punto que observan en la Figura 4.21, mientras el esquema de esta configuración se encuentra en el APÉNDICE B.

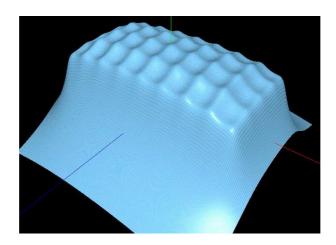


Figura 4. 21. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado por un electrodo de puesta a tierra con perímetro rectangular de 8 x 16 m con reticulado interno de 2 x 2 m, con relación 2 y con electrodos de 180 cm en las uniones perimetrales

Los potenciales máximos y mínimos generados para esta configuración de malla para varias longitudes de lado se observa en la figura 4.22 y en la figura 4.23, para jabalinas de 180 cm y jabalinas de 240 cm respectivamente.

El potencial de toque máximo se ubicará en las esquinas del electrodo mientras que el potencial de toque mínimo dependerá de la relación de w manteniendo similar criterio a las dos configuraciones anteriores. Matemáticamente esta relación encontrada se detalla en las ecuaciones [4.9] y [4.10],

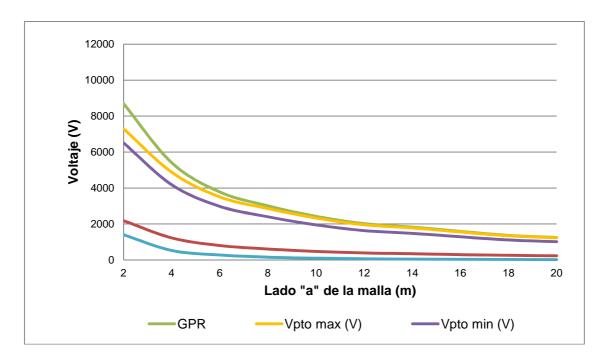


Figura 4. 22. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de malla rectangular con reticulado interno de 2 x 2 m, y con electrodos de 180 cm en las uniones perimetrales

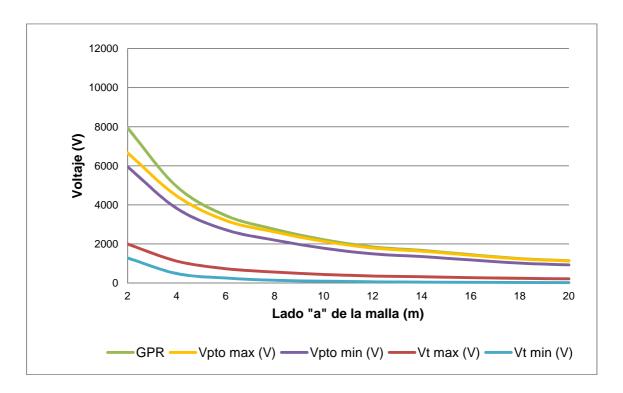


Figura 4. 23. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas del lado "a" de malla rectangular con reticulado interno de 2 x 2 m, con relación y con electrodos de 240 cm en las uniones perimetrales

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE ELECTRODO CON PERÍMETRO EN FORMA DE "L"

5.1 RESUMEN DEL ESTUDIO

Para este tipo de configuración de mallas, el estudio mantiene el esquema expuesto en el análisis realizado en el capítulo 3.

Se toma como referencia una configuración tipo "L", en la cual cada uno de los lados es perpendicular a los otros dos lados adyacentes. Este esquema presenta básicamente el lado mayor, lado menor, ancho uno y ancho dos, tal como muestra la Figura 5.1.

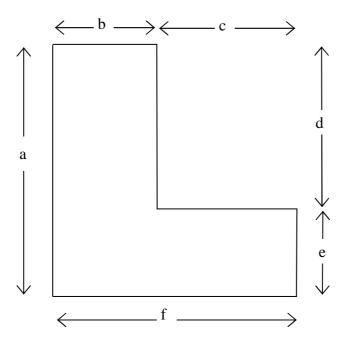


Figura 5.1. Modelo básico de un esquema tipo L

Donde:

a: lado mayor.

f: lado menor.

b: ancho uno, perpendicular al lado mayor (a) y paralelo al lado menor

(f).

c: diferencia entre el lado menor (f) y el ancho uno (b).

d: diferencia entre el lado mayor (a) y el ancho dos (e).

e: ancho dos, perpendicular a el lado menor (f) y paralelo al lado mayor

(a).

Debido a la existencia de varias combinaciones entre a, b, c, d, e y f, el análisis se lo realizará para 4 casos puntuales en que todos los lados serán función del lado b.

- **Caso 1.** En el primer caso los anchos serán iguales (b=e); los lados mayor y menor son equivalentes y miden el doble que el ancho uno (a=f=2b) por eso, las diferencias de los valores de C y d también coinciden en su medida.
- Caso 2. En el segundo caso los anchos se mantienen iguales (b=e); mientras que el lado menor es el doble que el ancho (f=2b) y el lado mayor es el doble que el lado menor (a=4b), además, las diferencias no son iguales y la diferencia "c" equivale al valor del ancho menor (c=b). También se observa que la diferencia "d" medirá tres veces el ancho menor (d=3b).
- Caso 3. Los anchos tienen una relación de uno a dos, es decir, el ancho dos valdrá el doble que el ancho uno (e=2b); mientras que el lado menor es el doble que el ancho uno (f=2b) y el lado mayor equivale al doble del lado menor (a=4b). Al mismo tiempo que las diferencias no asemejan y la diferencia "c" se asemeja al valor del ancho menor (c=b). La diferencia "d" mide el doble que la diferencia "c" (d=2b). Todo esto se visualiza en la Figura 5. 2.

Para evitar la escritura de las dimensiones del electrodo y diferenciar los casos, se establece una nomenclatura típica para esta configuración que muestra en forma clara las dimensiones de la malla, la cual se basa en el tipo de caso que

sigue la configuración, el valor del lado uno "b" y el valor del lado mayor "a" de cada caso se escribirá de la siguiente manera:

PXQXR

Donde

P: identificará el caso, los cuales podrán ser A, B, C para los casos

uno, dos y tres respectivamente

Q: valor del ancho uno (valor de "b") en metros

R: valor del lado mayor (valor de "a") en metros

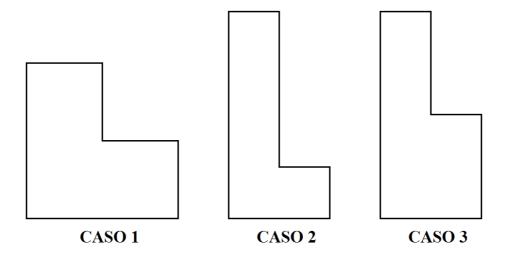


Figura 5. 2. Esquemas de los diferentes casos de estudio para mallas tipo "L"

Para el análisis de cada caso de electrodos con perímetro tipo L, se subdividirá en estudio en:

- Electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en L con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en L con reticulado interno y sin jabalinas.
- Electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas en las uniones perimetrales.

En cada uno de estos se encontrará los potenciales que se ha venido obteniendo en la superficie del suelo generado por este tipo de configuración, los cuales son:

- El potencial de punto
- El potencial de toque
- El potencial de paso

Al igual que en capítulos anteriores se buscará siempre la ubicación sobre el suelo del valor de cada potencial máximo y mínimo que el electrodo genere. En forma similar a los capítulos tres y cuatro se emplearán parámetros fijos durante el estudio, los parámetros técnicos que no sufrirán modificación serán:

- Tipo de suelo, el estudio se basará para un suelo homogéneo (100Ωm)
- Corriente de cortocircuito (Icc=1000A)
- Diámetro de los conductores (D=14mm)

5.2 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN L SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Mediante el programa informático GNDSTUDIO se realizaron dos tipos de análisis: uno para encontrar el mayor potencial de toque; y, otro que permita visualizar el mayor potencial de paso sobre la superficie del suelo en el que se ubica el electrodo.

5.2.1 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE TOQUE

Este análisis corresponde a tres casos en estudio.

Para el análisis del potencial de toque se utilizó el procedimiento descrito en el APÉNDICE C. Las coordenadas de los puntos de los vértices en el plano XY en función de b de esta configuración se muestran para los tres casos en estudio, en

la Figura 5. 3, Figura 5. 4 y Figura 5. 5, respectivamente.

Ese estudio es similar al ejecutado en los capítulos 3 y 4, porque los potenciales generados por el comportamiento de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices sobre la superficie del suelo para cada caso, se puede visualizar en la Figura 5. 6.

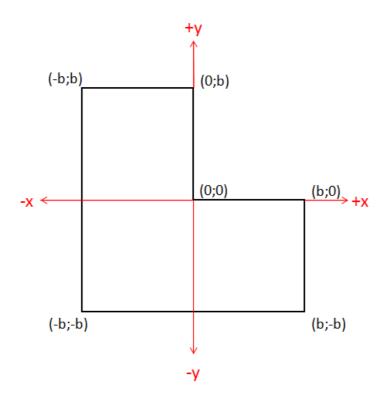


Figura 5. 3. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices para el caso 1

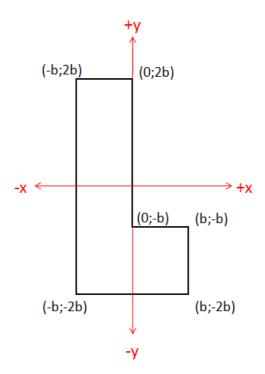


Figura 5. 4. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices para el caso 2

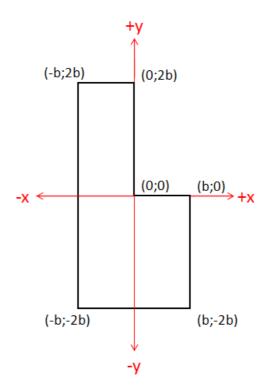


Figura 5. 5. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices para el caso 3

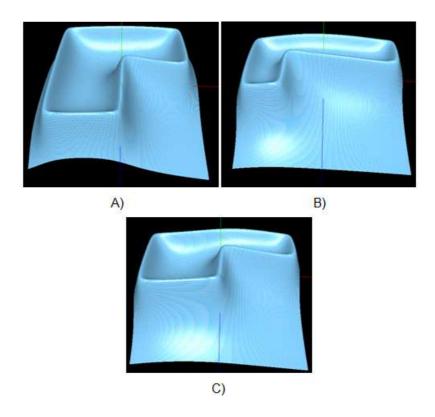


Figura 5. 6. Potenciales de punto en la superficie del terreno originado por un electrodo de puesta a tierra con perímetro en L sin jabalinas en los vértices A) AX7X14 B) BX4X16 C) CX4X16

Se observó que los valores de potencial de toque más peligrosos varían a medida que las dimensiones de los lados del electrodo aumentan. Por esta razón, mientras "b" sea menor o igual que tres, el potencial de contacto más peligroso se encontrará en las esquina formada entre el lado menor y el ancho dos del electrodo. Cabe indicar que para el primer caso al existir uniformidad, este valor es similar al vértice del lado mayor y el ancho uno. Si "b" aumenta del valor establecido, el potencial de contacto más elevado se encontrará en el punto de ordenada del valor medio de "e" en dirección de "b" y el valor de abscisa será igual a la mitad de la diferencia entre "b" y "a". Pese a no tener la misma ubicación física, pero matemáticamente sigue el modelo expuesto en la ecuación [5. 1].

$$Vt_{m\acute{a}x} = \begin{cases} \left(-b ; \frac{a}{2} \right) & \text{si } 0 < b \leq 3 \\ \left(b - e ; -\frac{a - b}{2} \right) & \text{si } b > 3 \end{cases}$$
 [5. 1]

Se pudo observar también que los valores de potencial de toque menos peligrosos se encuentran en el vértice formado entre "c" y "d". Para seguir este comportamiento se encontró el modelo matemático descrito en la ecuación [5. 2].

$$Vt_{min} = \left(0; e - \frac{a}{2}\right)$$
 [5. 2]

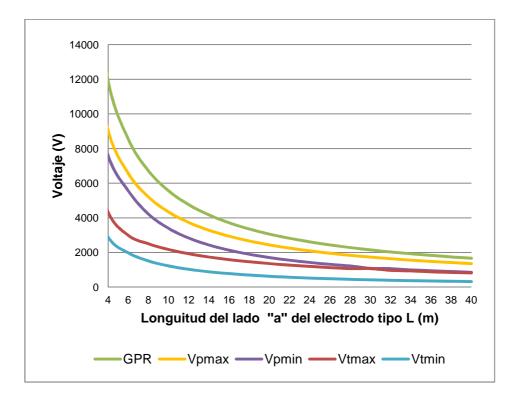


Figura 5. 7. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices para el caso 1

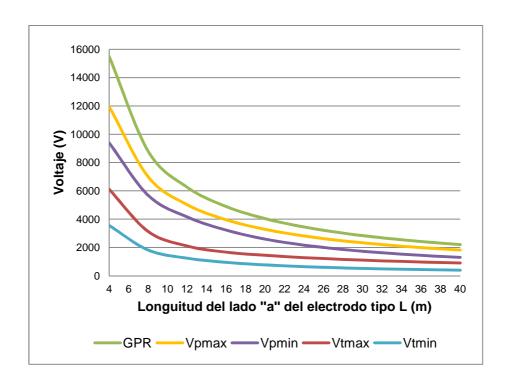


Figura 5. 8. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices para el caso 2

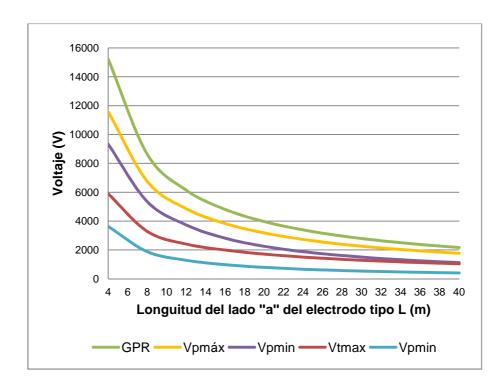


Figura 5. 9. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices para el caso 3

La variación del voltaje de toque entre sus valores máximo y mínimo va disminuyendo para los tres casos. La interpretación es que a medida que

aumente el valor del lado "b", el voltaje de toque se estabiliza en toda la superficie del suelo, y va disminuyendo. Es decir, a medida que la longitud del ancho uno aumente el voltaje de toque tiende a ser cero, por lo que se interpreta que no habría voltajes de toque peligrosos en una malla muy grande. Esto se puede visualizar en la Figura 5. 7, Figura 5. 8 y Figura 5. 9, para los casos uno, dos y tres respectivamente.

5.2.2 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE PASO

En este estudio se consideraron las aclaraciones expuestas en el ítem 3.2.2. del Capítulo 3. Para el análisis del voltaje de paso se tomó como referencia tres electrodos, uno por cada caso y considerando como referencia el lado b=2, es decir, se tomó en cuenta los electrodos AX2X4, BX2X8 y CX2X8, los mismos que se ubicaron en un suelo homogéneo de 100 Ωm y a cado uno, por separado, se le insertó una corriente de falla de 1000 A. También se consideró como referencia un paso (distancia entre el pie derecho y el pie izquierdo) de 1m de longitud²⁰.

Como se explicó en el Capítulo 3, en el estudio del potencial de paso existen dos variables extras que son la dirección y el origen de paso, por lo que el análisis tiene dos partes.

5.2.2.1 Manteniendo el origen del paso

Se aplicó el procedimiento del subcapítulo 3.2.2.1. Los cambios corresponden a la cantidad de puntos en estudio. Para este caso se establecieron doce puntos de referencia como se observa en la Figura g.1. Se observa el estudio completo en el Apéndice G, del mismo que se extrae que el potencial más peligroso se encuentra al dar un paso desde el punto siete en dirección perpendicular al lado denominado altura, hacia el exterior del perímetro de malla, en tanto, que el potencial más

²⁰ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, párrafo 9, pág. 23.

seguro se encuentra en varios de estos puntos, pero siempre de acuerdo con la dirección del otro pie llega a un parte sobre el perímetro del electrodo. Los potenciales menores están alrededor del punto 13.

5.2.2.2 Manteniendo la dirección de paso

Se empleó el procedimiento del subcapítulo 3.2.2.2. Una vez realizado el análisis en cada uno de los tres casos, se tabularon los datos y a continuación se explica los resultados de cada uno.

5.2.2.2.1 Caso uno

La configuración de este estudio se encuentra en la Figura 5. 10. Se visualiza en líneas segmentadas de color rojo las trayectorias paralelas a los ejes X y Y.

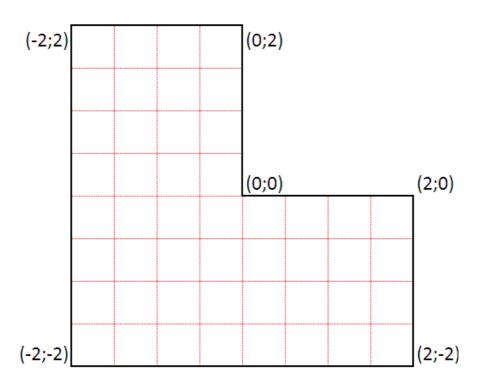


Figura 5. 10. Electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de AX2X4 con coordenadas, con las trayectorias en el eje (en rojo con línea segmentada) y para el análisis del voltaje de paso en estudio

Se observa que por cuestión de simetría, las trayectorias paralelas al eje X son similares a las trayectorias del eje Y, por lo que se encontrará los potenciales generados solo en la trayectoria paralela al eje Y, para nueve valores de x de (-2;-1,5;-1;-0,5;0;0,5;1;1,5;2). Los valores constan en la Figura 5. 11. Se observa que la trayectoria que genera menos variaciones de potencial de paso es la que sigue sobre el lado mayor o el lado menor, mientras que la trayectoria que genera más variaciones es la que sigue sobre la mediatriz de cualquiera de los anchos. Las trayectorias que generan al final o al inicio menores potenciales son la que siguen sobre la mediatriz de cualquiera de las diferencias.

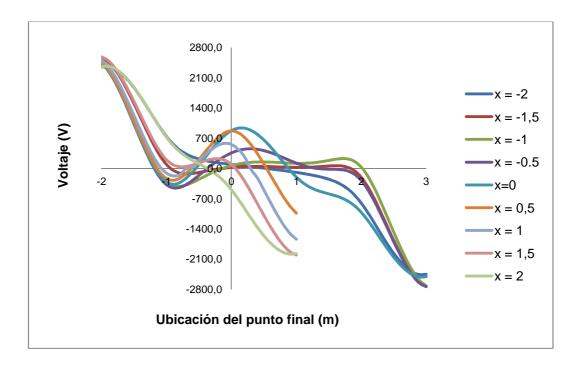


Figura 5. 11. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.2 y 3.10 manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de AX2X4 m para varios valores en el eje X

5.2.2.2.2 Caso dos

Las trayectorias mas criticas posibles para este caso se muestran en la Figura 5.

12, de línea segmentada y de color rojo tanto para trayectorias paralelas a los ejes X y Y. El estudio presenta dos casos, cada uno paralelo a su respectivo eje.

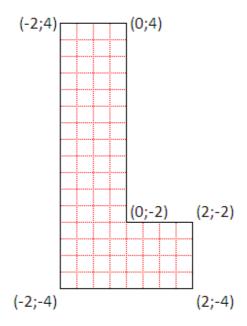


Figura 5. 12. Electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de BX2X8 con coordenadas, con las trayectorias paralelas a los ejes (en rojo con línea segmentada) para el análisis del voltaje de paso en estudio

5.2.2.2.2.1 Trayectoria paralela al eje Y en el caso dos

Se observa que, mientras se camine dentro del rectángulo que se encuentra formado por el lado mayor y el ancho uno, los potenciales de paso no varían en gran magnitud. Si se sale del rectángulo hacia afuera, en dirección al ancho dos del esquema en L, a medida que la trayectoria paralela se aleje del lado mayor hasta encontrarse sobre la diferencia "d" el máximo potencial que se genere en la trayectoria aumenta, pero se dan los mayores cambios de potenciales especialmente en la trayectoria de la mediatriz del lado mayor. Este detalle está en la Figura 5. 13.

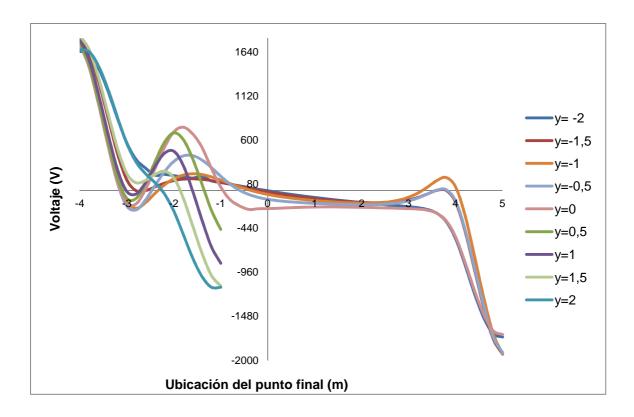


Figura 5. 13. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.2 y 3.10 manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de BX2X8 m para varios valores en el eje X

5.2.2.2.2.2 Trayectoria paralela al eje X en el caso dos

Se visualiza en la Figura 5. 14, en la que existen mayores variaciones de potenciales pero en menor magnitud que en el caso con relación al eje Y. En el presente caso de la paralela al eje X, la trayectoria crítica se encuentra a medida que se va alejando del lado menor hasta llegar a la trayectoria sobre la diferencia "c" sobre la recta y= -4 en la que se generan los mayores potenciales, además el mayor valor que se genera dentro de la malla es el que se ubica en la trayectoria sobre la diferencia "d".

Si relacionamos la trayectoria paralela al eje X con la paralela al eje Y, en el caso dos, se encuentran que es mejor caminar siguiendo una trayectoria sobre el eje Y especialmente sobre el lado mayor.

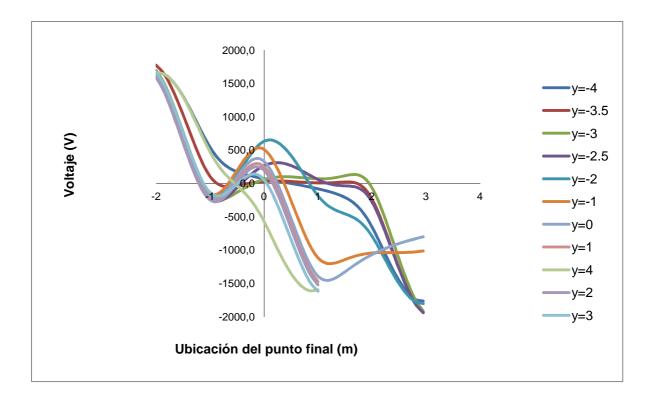


Figura 5. 14. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.2 y 3.10 manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de BX2X8 m para varios valores en el eje Y

5.2.2.2.3 Caso tres

Al no tener una simetría entre los lados se realizará dos estudios, el uno para la trayectoria paralela al eje X y otro paralelo al eje Y.

En la Figura 5. 15 se muestran en color rojo cada una de las trayectorias a realizarse el estudio en una malla de referencia de CX2X8.

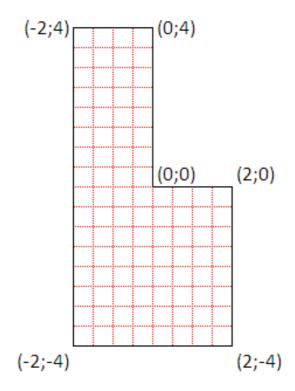


Figura 5. 15. Electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de CX2X8 con coordenadas, con las trayectorias paralelas a los ejes (en rojo con línea segmentada) para el análisis del voltaje de paso en estudio

5.2.2.2.3.1 Trayectoria paralela al eje X en el caso tres

En este caso los resultados se encuentran en la

Figura 5. 16, la cual muestra que en su mayoría los cambios de potencial de paso por la trayectoria tienden a ser una línea recta con una pendiente de tres, aproximadamente 71,5°. Se observa que la trayectoria que no tiene mucha variación rotunda es la que se encuentra sobre la mediatriz del ancho dos.

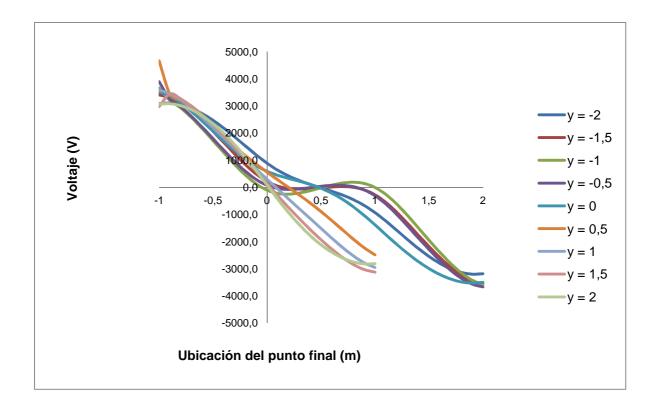


Figura 5. 16. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.2 y 3.10 manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de CX2X8 m para varios valores en el eje Y

5.2.2.3.2 Trayectoria paralela al eje Y en el caso tres

Las magnitudes de los potenciales generados por trayectoria se muestran en la Figura 5. 17, en donde se indica que las variaciones mayores se dan cuando se camina cobre cualquier punto perpendicular a la diferencia "d", mientras que el más seguro se encuentra sobre la mediatriz del ancho uno.

De lo que se concluye que para el caso tres es más conveniente caminar por una trayectoria paralela al lado mayor pero sobre la mediatriz del ancho uno.

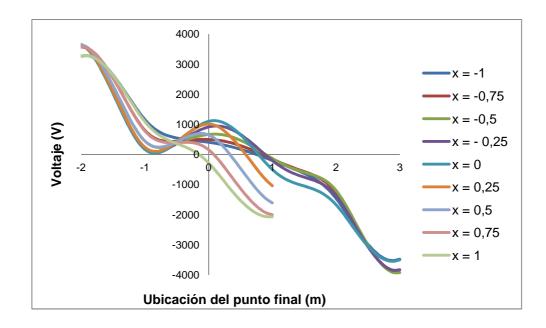


Figura 5. 17 Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.2 y 3.10 manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices de CX2X8 m para varios valores en el eje X

5.3 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN L CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

En este análisis, coinciden las coordenadas de los puntos de los vértices en el plano XY en función de b de la configuración. Se muestran para los tres casos en estudio en la Figura 5. 3, Figura 5. 4 y Figura 5. 5. Se debe aclarar que el procedimiento para encontrar los valores máximos y mínimos se encuentran en el Anexo c.

El estudio se realizó con jabalinas de 1,80 y 2,40 m de longitud debido a que estas características en jabalinas son las que se encuentran en el mercado y los potenciales generados sobre la superficie del suelo. El comportamiento de esta configuración se muestra en la Figura 5. 18.

Los potenciales mínimos en las tres configuraciones se ubican en el punto nueve de la Figura g. 1 que matemáticamente mantienen la relación expuesta en la ecuación independientemente de la magnitud del electrodo ubicado en el vértice, en tanto que los potenciales máximos para las tres configuraciones no siguen un patrón. En el caso uno, si el valor del ancho uno es menor que tres, el potencial máximo se ubica en el punto 17 de la Figura g. 1; pero si el valor de b es mayor o igual a tres el potencial se ubica en el punto trece de la misma y matemáticamente siguen una relación mostrada en la ecuación [5. 3]

Para el caso dos se mantienen los mismos intervalos, con la diferencia de que para el primer intervalo el potencial máximo se ubica en el punto 3 y el segundo en el punto 5. La relación matemática se encuentra en la ecuación [5. 4].

Para el caso tres no afecta la ubicación de electrodos y el punto máximo se encuentra en el vértice del ancho uno y del lado mayor, como se muestra en la ecuación [5. 4].

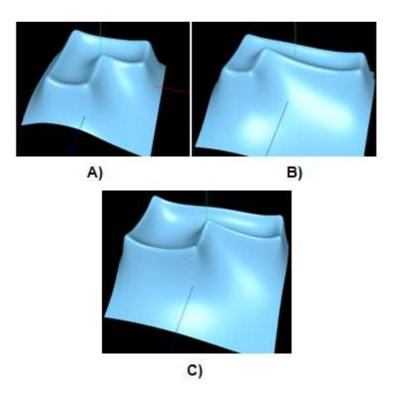


Figura 5. 18. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con jabalinas 1,80m en los vértices A) AX4X8 B) BX3X12 C) CX4X16

Además los potenciales más seguros en los tres casos se ubican en sobre el vértice formado entre el lado "c" y el lado "d" y que gráficamente se visualiza en el punto 9 de la Figura g. 1. El modelo matemático se representa con la ecuación [5. 4].

$$Vt_{m\acute{a}x} = \begin{cases} \left(-\frac{b}{2} ; -b \right) & \text{si } 0 < b < 3 \\ \left(-b ; -\frac{a}{2} \right) & \text{si } b \ge 3 \end{cases}$$

[5. 3]

$$Vt_{min} = \begin{cases} \left(-\frac{b}{2} ; \frac{e-a}{2}\right) & \text{si } 0 < b < 3\\ \left(-b ; -\frac{a}{2}\right) & \text{si } b \ge 3 \end{cases}$$

$$[5. 4]$$

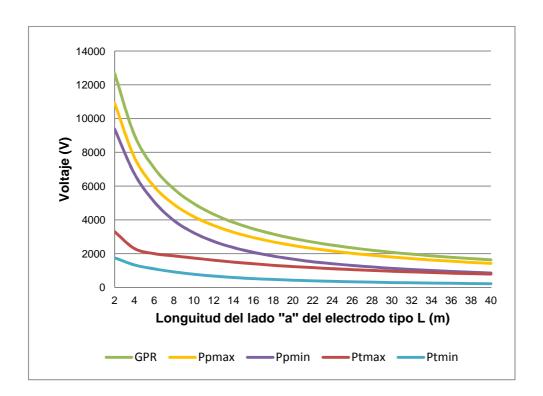


Figura 5. 19. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con jabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 1

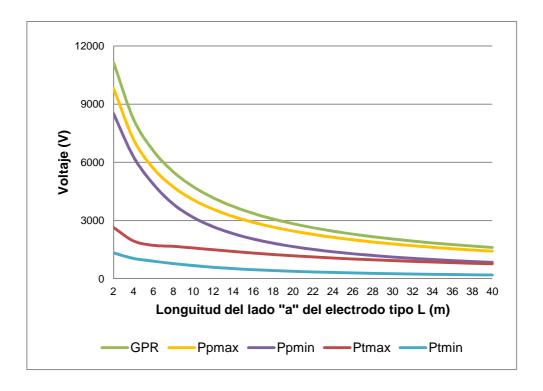


Figura 5. 20. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con jabalinas de 240 cm en los vértices para el caso 1

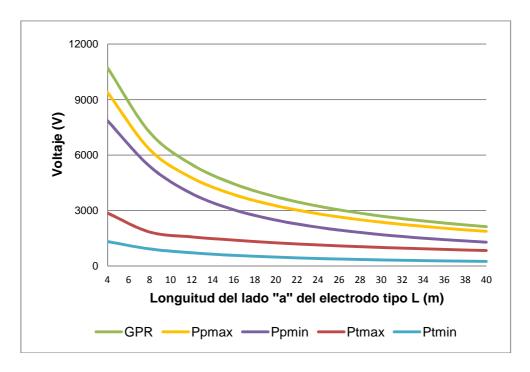


Figura 5. 21. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con jabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 2

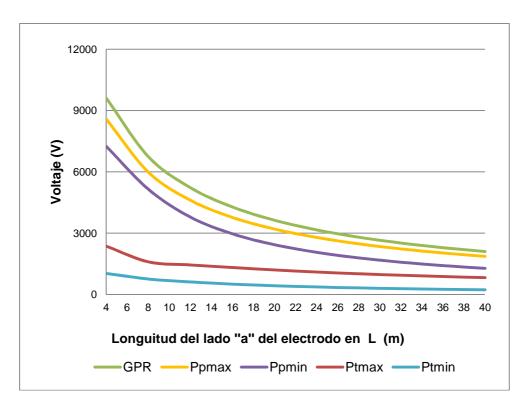


Figura 5. 22. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con jabalinas de 240 cm en los vértices para el caso 2

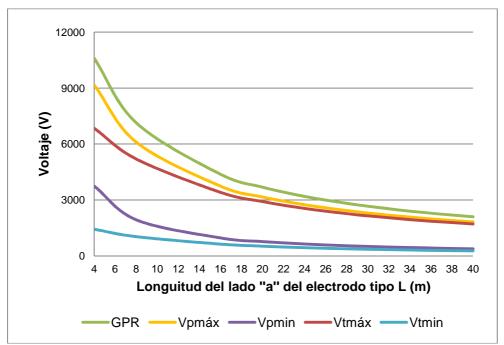


Figura 5. 23. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con jabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 3

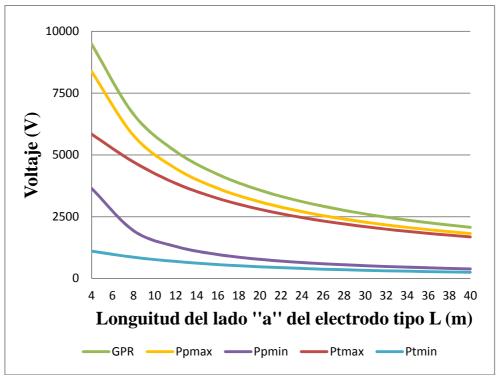


Figura 5. 24. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con jabalinas de 180 cm en los vértices para el caso 3

Se aclara que el tamaño de las jabalinas ubicadas en los vértices no influencian en la posición de los potenciales porque, a mayor magnitud de la jabalina, se disminuye el valor de los potenciales generados.

Generados los potenciales y encontrados los más altos y más bajos para cada una de las dimensiones de los electrodos se obtuvo las gráficas desde la Figura 5. 19 hasta la Figura 5. 24 en las que se muestran los datos de cada caso de dos en dos, el primero con jabalinas perpendiculares al suelo y unidas en las esquinas del electrodo de 180 cm de longitud y las segundas, similares a las primeras pero con una longitud de 240 cm.

Se observó que en las seis gráficas anteriores, a medida que las dimensiones de los lados del electrodo aumentan, los valores de potencial de toque y de punto más peligrosos varían de ubicación solo en los dos primeros casos de estudio, mientras que en los tres casos la magnitud de los potenciales máximos y mínimos decrecen a medida que las longitudes de los lados aumentan, es decir

que el valor de potencial de toque es inversamente proporcional al valor de "b" (debido a que todos los lados se encuentran en función de b).

Además, la variación del voltaje de toque entre sus valores máximo y mínimo va disminuyendo para los tres casos, esto se puede interpretar que a medida que aumente el valor del lado "b", el voltaje de toque se estabiliza en toda la superficie del suelo, también el voltaje de toque va disminuyendo lo que quiere decir que a medida que la longitud del ancho uno aumente el voltaje de toque tiende a ser cero, con lo que se interpreta que no habría voltajes de toque peligrosos en una malla muy grande.

5.4 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN L CON RETICULADO INTERNO Y SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES.

Similar al caso anterior, los potenciales generados por el comportamiento de electrodos con perímetro en L sin jabalinas en los vértices sobre la superficie del suelo para cada caso se observa en la Figura 5. 25.

Para esta configuración se encontró que el mayor potencial que se genera sobre la superficie de la malla el punto donde se genera el potencial de punto máximo Es único y para el caso uno y el caso tres se ubica en la esquina entre el ancho uno y el lado mayor, mientras que para el segundo caso se ubica en la esquina entre el ancho uno y el lado "d". El potencial más seguro se genera en el vértice entre las dos diferencias "c" y "d" que se expresa en la ecuación [5. 2].

Las ubicaciones de los puntos donde se generan los potenciales más peligrosos varían según el caso, así, para el caso uno y el caso tres siguen la misma tendencia del la ecuación [5. 1] y físicamente se encuentra en el punto uno de la Figura g. 1, mientras que para el caso dos sigue el modelo de la ecuación [5. 5] y se ubica en el punto tres de la Figura g. 1.

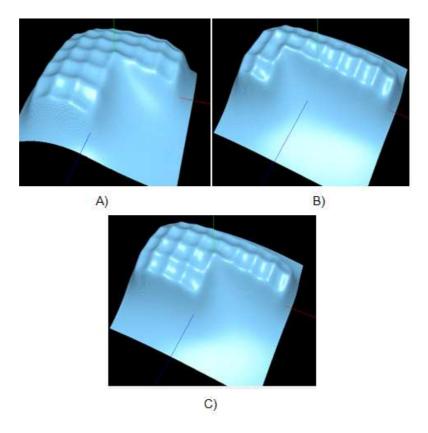


Figura 5. 25. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con reticulado interno sin jabalinas en los vértices A) AX8X16 B) BX4X16 C) CX4X16

$$Vt_{m\acute{a}x} = \left(-\frac{b}{2} ; \frac{e-a}{2}\right)$$
 [5. 5]

De los potenciales máximos y mínimos se realizo una tabulación de valores obteniéndose las tres graficas siguientes, una por cada caso.

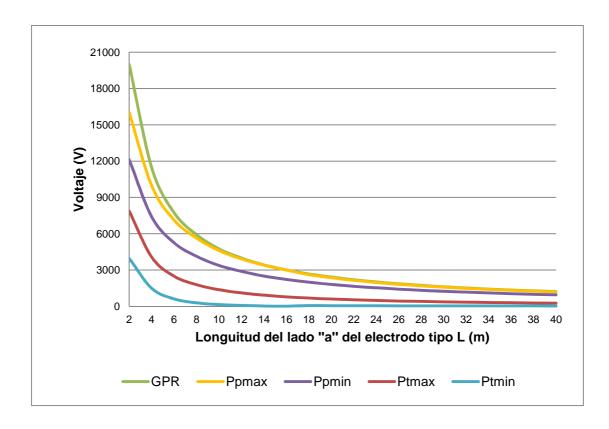


Figura 5. 26. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y sin jabalinas en los vértices para el caso 1

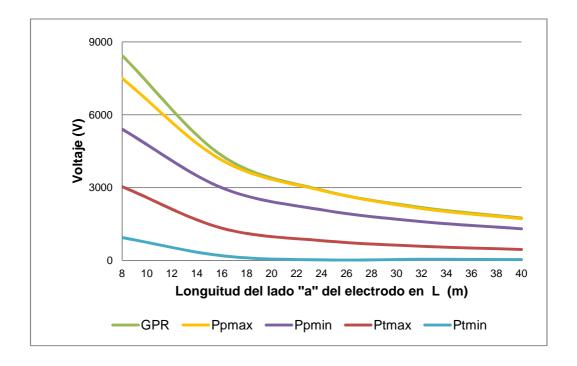


Figura 5. 27. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y sin jabalinas en los vértices para el caso 2

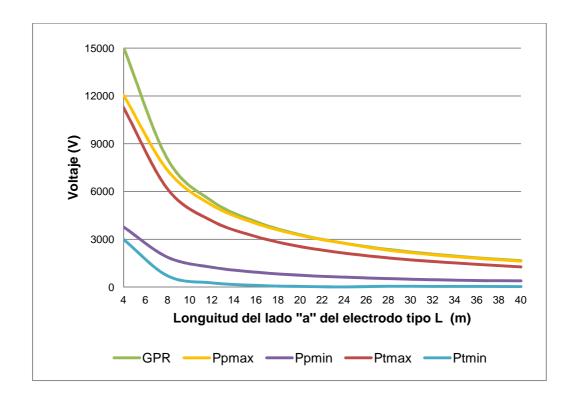


Figura 5. 28. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y sin jabalinas en los vértices para el caso 3

Como se observa los potenciales son inversamente proporcionales a la longitud del lado b (todos los lado en función del lado b), y se mantienen la tendencias de los estudios anteriores. Además un detalle extra es que el potencial de punto en las tres configuraciones es alto por lo que el potencial de toque es bajo con relación a los dos esquemas anteriores.

5.5 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN L CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES.

El comportamiento de este tipo de configuración y los potenciales generados, se muestran en la Figura 5. 29.

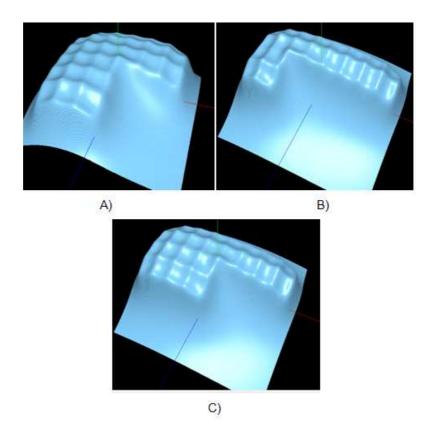


Figura 5. 29. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con reticulado interno con jabalinas de 1.80 m en los vértices A) AX8X16 B) BX4X16 C) CX4X16

Para este tipo de configuración se detectaron que los puntos donde se generan los potenciales máximos y mínimos son únicos para los tres casos independientemente de la longitud de los electrodos que se ubique en los vértices, es así que el potencial máximo se genera en el punto uno y el potencial mínimo se genera en el punto nueve, matemáticamente sigue el modelo de la ecuación [5. 1] la ecuación [5. 2] respectivamente.

Una vez obtenido los resultados del programa se tabularon los mismos encontrando las graficas para electrodos de 180 cm y de 240 cm, los mismos que se muestran en las figuras respectivamente

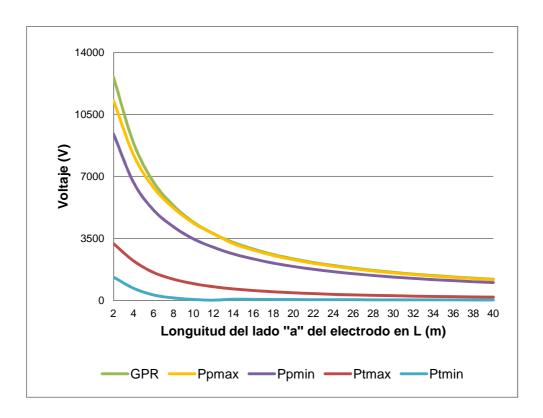


Figura 5. 30. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 1.80 en los vértices para el caso 1

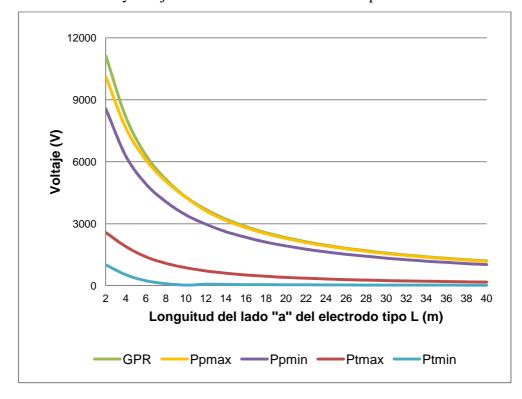


Figura 5. 31. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices para el caso 1

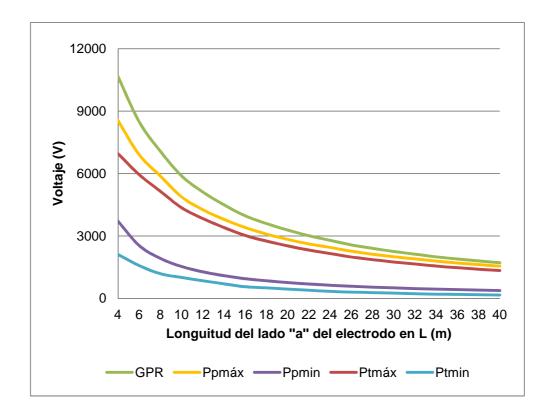


Figura 5. 32. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 1.80 en los vértices para el caso 2

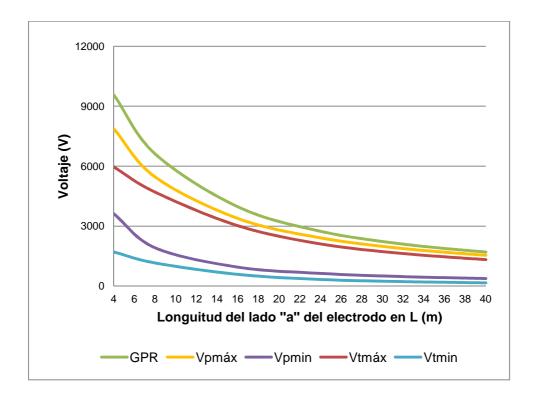


Figura 5. 33. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices para el caso 2

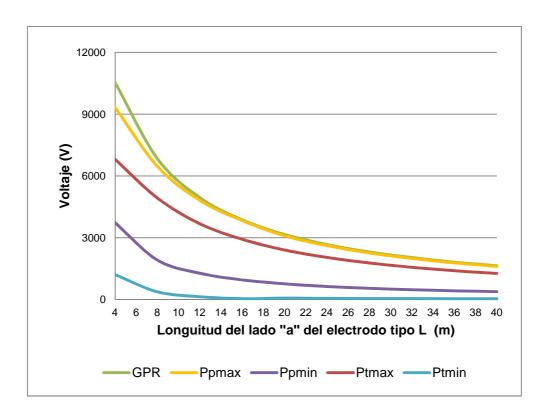


Figura 5. 34. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 1.80 en los vértices para el caso 3

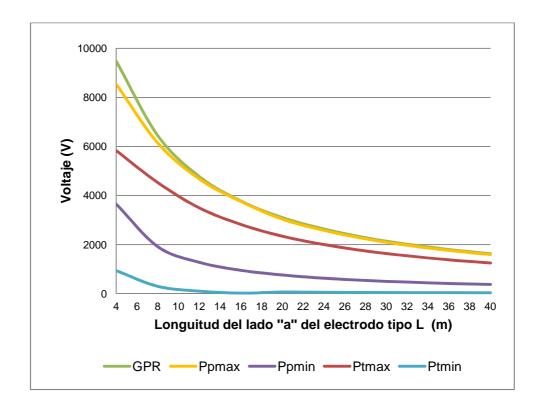


Figura 5. 35. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices para el caso 3

A diferencia de la configuración anterior lo que se muestra es que los potenciales disminuyen de magnitud, en si lo restante permanece constante en es la configuración en relación a la anterior.

La consecuencia, como se dijo anteriormente, es la variación del voltaje de toque entre sus valores máximo y mínimo va disminuyendo en las tres opciones de "r". Esto se puede interpretar porque, a medida que aumenta el lado de un electrodo con perímetro rectangular, el voltaje de toque va disminuyendo, es decir, la magnitud de la longitud de los lados es inversamente proporcional al valor del voltaje de toque y éste tiende a ser cero. Se concluye que disminuirían los voltajes de toque peligrosos si el lado de referencia del electrodo fuese extenso.

5.6 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN L CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LAS UNIONES PERIMETRALES

Los potenciales generados en la superficie del suelo para esta configuración se muestran en la Figura 5. 36.

El análisis es el siguiente: se encontró que los potenciales máximos y mínimos son únicos y no varían de ubicación, el cambio que se produjo solo fue en la disminución de la magnitud de los potenciales. De los máximos y mínimos se obtuvo gráficas desde la Figura 5. 37 hasta la Figura 5. 42.

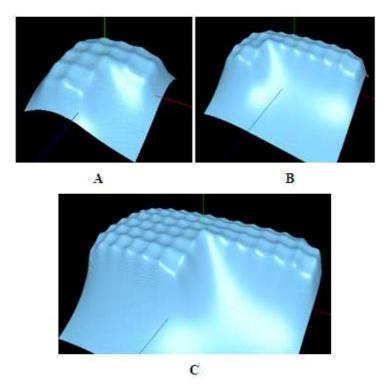


Figura 5. 36. Comportamiento de electrodos con perímetro en L con reticulado interno sin jabalinas en los vértices A) AX8X16 B) BX4X16 C) CX6X24

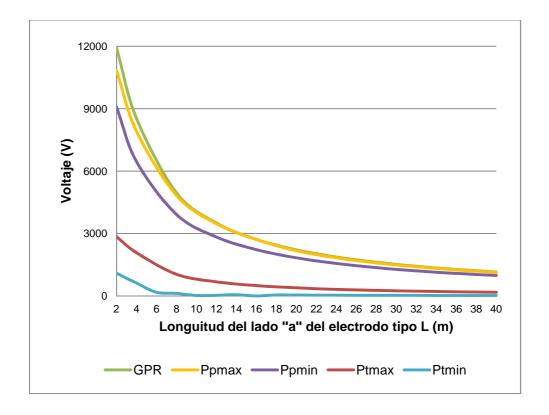


Figura 5. 37. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones perimetrales para el caso 1

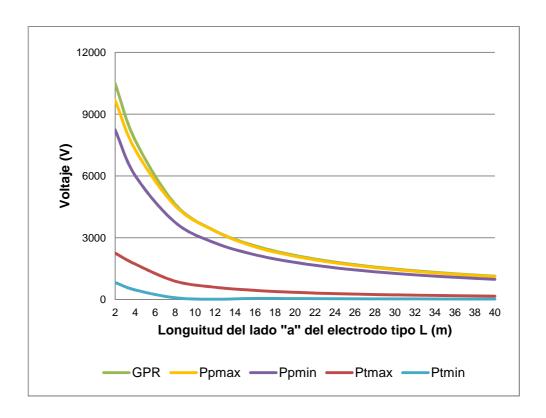


Figura 5. 38. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones perimetrales para el caso 1

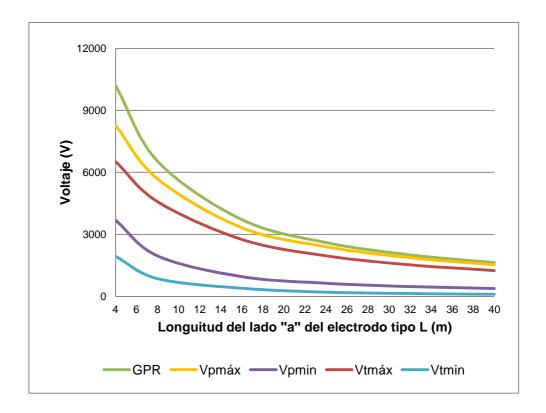


Figura 5. 39. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 1.80m en las uniones perimetrales para el caso 2

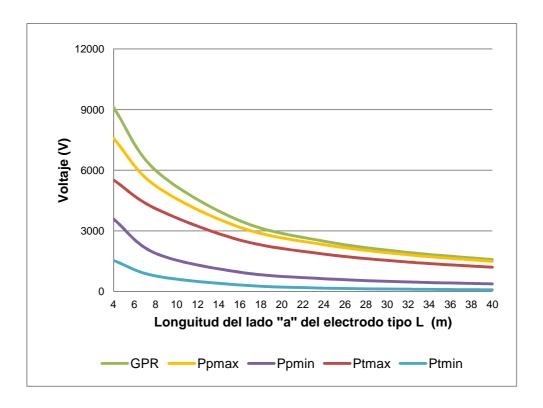


Figura 5. 40. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 2.40m en las uniones perimetrales para el caso 2

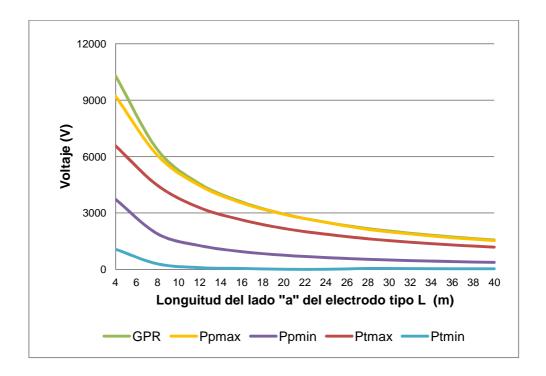


Figura 5. 41. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 1.80m en las uniones perimetrales para el caso 3

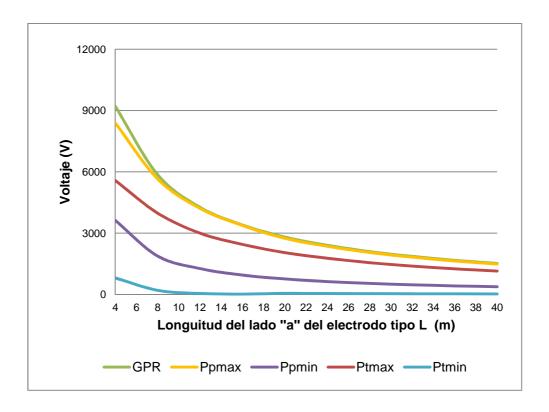


Figura 5. 42. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en L con reticulado interno y con jabalinas de 2.40m en las uniones perimetrales para el caso 3

De lo anterior se infiere que los potenciales máximos y mínimos son inversamente proporcionales a la longitud de los lados de la configuración.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN "T"

6.1 RESUMEN DEL ESTUDIO

Esta configuración de puesta a tierra corresponde a un estudio similar a los capítulos 3, 4 y 5. No obstante, se toma como referencia una configuración tipo "T", en la que cada uno de los lados es perpendicular a los otros dos lados adyacentes, formando un esquema similar al de la Figura 6.1. Además, la superficie formada por todos los lados de esta configuración es un plano. El esquema cuenta con lados que forman el perímetro, diferenciados uno a uno.

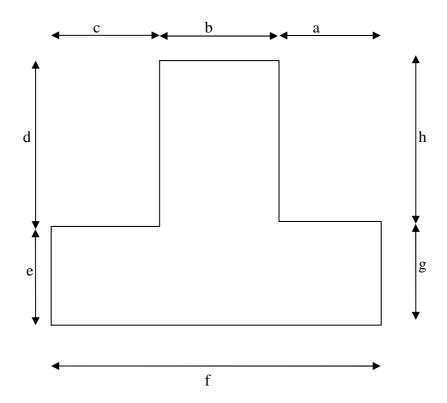


Figura 6.1. Modelo básico de un esquema tipo T

Donde:

a: ala uno

b: ancho uno

c: ala dos

d: altura uno

e: ancho dos

f: lado base

g: ancho tres

h: altura dos

Al tener varias posibilidades de combinaciones entre un parámetro con los ocho lados del perímetro del electrodo en forma de T, el presente estudio se centra en casos más probables de existencia, el cual es de uniformidad, es decir los lados a, b, c, d, g, y h son iguales, y por lo tanto, el lado f es tres veces el lado a.

Se utiliza la nomenclatura de parámetro "a" para esta configuración, que gráficamente es un modelo similar al expuesto en la Figura 6.2. Este parámetro es un valor básico que permite encontrar los demás datos mediante la relación de las ecuaciones [6.1] y [6.2] para encontrar la configuración completa.

$$b = c = d = g = h = a$$
 [6.1]

$$f = 3a ag{6.2}$$

Para el análisis de la presente configuración de electrodos con perímetro tipo T, se subdividirá en estudio en:

- Electrodos con perímetro en T sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en T con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en T con reticulado interno y sin jabalinas.
- Electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con jabalinas en las uniones perimetrales.

El esquema de las configuraciones se encuentra en el apéndice B y para cada uno de los esquemas se requiere de un estudio independiente.

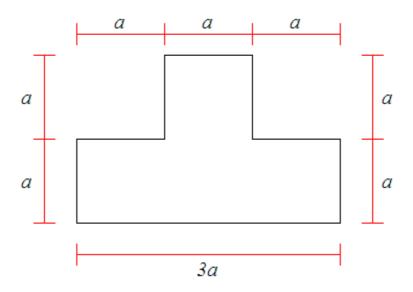


Figura 6.2. Esquema del caso de uniformidad para electrodos tipo "T"

En cada estudio se encuentran los potenciales que se han obtenido en la superficie del suelo generado por este tipo de configuración, que son:

- El potencial de punto
- El potencial de toque
- El potencial de paso

Como se describió en los capítulos anteriores, siempre se busca la ubicación sobre el suelo del valor de cada potencial máximo y mínimo que genera el electrodo; y los parámetros técnicos que no se modifican son:

- Tipo de suelo, el estudio se basará para un suelo homogéneo (100Ωm)
- Corriente de cortocircuito (Icc=1000A)
- Diámetro de los conductores (D=14mm)

6.2ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN T SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Con la aplicación del programa informático GNDSTUDIO V 1.0 se realizó dos tipos de análisis: uno para encontrar los máximos y mínimos potenciales de toque; y otro para visualizar el mayor potencial de paso sobre la superficie del suelo en el que se ubique el electrodo.

6.2.1 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE TOQUE

Sobre el tema se empleó el procedimiento que se encuentra en el apéndice H. Las coordenadas de los puntos de los vértices en el plano XY en función de "a" de esta configuración se muestran en la Figura 6.3.

El estudio es similar al ejecutado en los tres capítulos anteriores. Los potenciales generados por el comportamiento de electrodos con perímetro en T sin jabalinas en los vértices sobre la superficie del suelo, se observan en la Figura 6. 4.

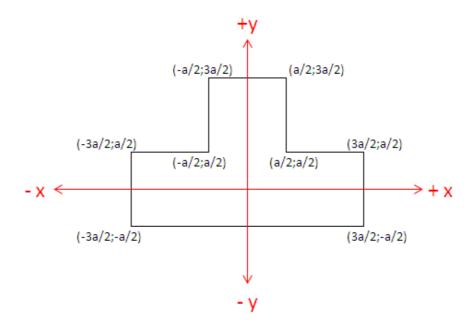


Figura 6.3. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

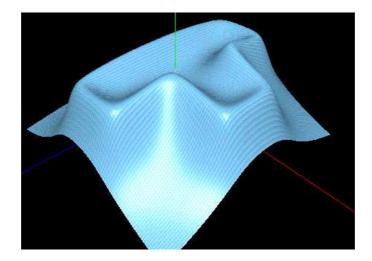


Figura 6. 4. Potenciales sobre el suelo en electrodos con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

En el análisis de esta configuración se encontró que si el valor del valor de "a" es menor o igual a dos, el potencial más alto se encontrará en la esquina formada entre el lado base y cada uno de los anchos, caso contrario el potencial de toque máximo se ubicará en el centro del electrodo es decir en la intersección de uno de los dos ancho con la mediatriz del lado base. El modelo matemático del comportamiento sigue la tendencia de la ecuación [6. 3], en el caso que este modelo sea similar al de las coordenadas de la Figura 6.3.

$$\begin{cases} Vt_{pm\acute{a}x} = \left(\begin{array}{cc} \pm \frac{3a}{2} & ; -\frac{a}{2} \\ Vt_{pm\acute{a}x} = \left(\begin{array}{cc} 0 & ; 0 \end{array}\right) & si \ a \leq 2 \\ si \ a > 2 \end{cases}$$

[6.3]

Mientras que el potencial de toque más seguro se genera en los vértices entre el ala uno y la altura dos y también en el ala dos con la altura uno, que se expresa como la ecuación [6. 4]

$$Vt_{min} = \left(\pm \frac{a}{2} ; \frac{a}{2} \right)$$

[6.4]

Donde:

a: medida del ala uno, parámetro para conformar esta configuración vista según la configuración que muestra la Figura 6.2.

Una vez encontrados los potenciales máximos y mínimos se procedió a tabular los datos y graficar los resultados obtenidos para graficar la Figura 6. 5. Se observa que la variación del voltaje de toque entre sus valores máximo y mínimo va disminuyendo, es decir el valor del parámetro "a" es inversamente proporcional a la magnitud de los potenciales que se generan en la superficie del suelo. También se observa que los potenciales en configuraciones de este tipo muy grandes se estabilizan en toda la superficie de la malla. El voltaje de toque va disminuyendo porque, a medida que aumenta la longitud del parámetro para construir este tipo de electrodo, el voltaje de toque tiende a ser cero. Por consiguiente, no habría voltajes de toque peligrosos en una malla muy grande, esto se puede visualizar en la Figura 6. 5.

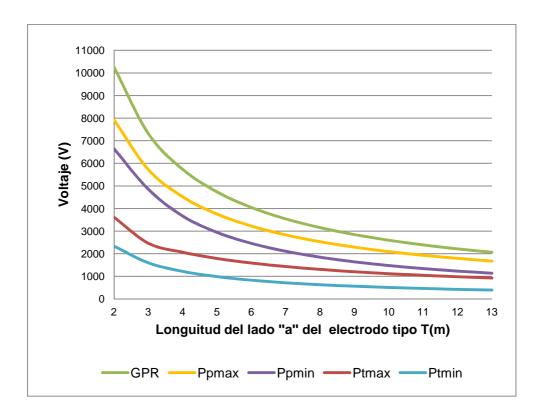


Figura 6. 5 Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

6.2.2 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE PASO

En este estudio se consideraron las aclaraciones expuestas en el en el ítem 3.2.2. del Capítulo 3. Para el análisis del voltaje de paso se tomó como referencia un electrodo con perímetro en T con un valor de a=2, es decir el electrodo base será Tx2x6 que se ubicó en un suelo homogéneo de 100 Ω m y se le insertó una corriente de falla de 1000 A. También se consideró como referencia un paso (distancia entre el pie derecho y el pie izquierdo) de 1m de longitud²¹.

En el estudio del potencial de paso, como se demostró anteriormente, se divide en partes por las dos variables extras de la dirección y el origen de paso.

6.2.2.1 Manteniendo el origen del paso

Es necesario aplicar el procedimiento descrito en el ítem 3.2.2.1. del Capítulo 3.

Se toman como referencia 27 puntos pero, por cuestiones de simetría, se disminuyen a 16 ya que el punto 1 es igual al punto 1´, el punto 2 similar al punto 2´, y así sucesivamente, como se muestra en la Figura 6. 6.

Cada uno de los puntos es el punto de referencia de inicio del paso (círculo en celeste) y coincidirá con el centro de un círculo (en amarillo) de 1m de radio que muestra el punto final del paso, iniciando desde el eje X (flecha en amarillo) en dirección anti-horario (flecha de color negro), tal como se muestra en la Figura 5.16.

²¹ IEEE, Standart 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York, 2000, párrafo 9, pág. 23

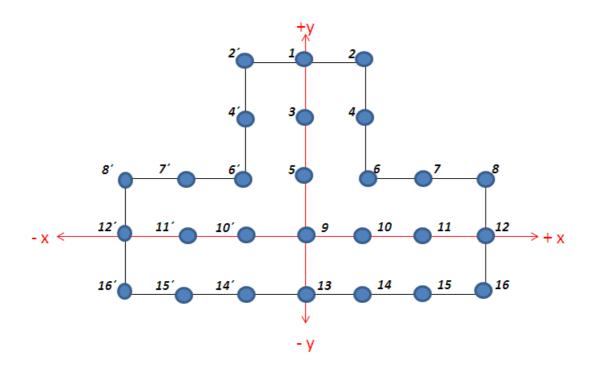


Figura 6. 6. Ubicación de 27 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

El gráfico del comportamiento de los voltajes de paso se expone en el Apéndice H que muestra el estudio completo. Se puede observar que el potencial más peligroso se genera al dar un paso hacia afuera del electrodo en dirección a la bisectriz del ángulo formado por los segmentos de conductor en este punto, exceptuando los puntos donde la simetría afecta la dirección. Los potenciales máximos son similares en magnitud en el punto 1, 2, 15 y 16. El punto uno y dieciséis son iguales en dirección a la bisectriz del ángulo. Esta magnitud de potencial, a partir del punto dos está en dirección a los 60°; mientras que en el punto quince a los 285º, las dos últimas direcciones medidas a partir del inicio y en dirección anti-horaria tal como muestra la Figura 5.16. Los potenciales mínimos de paso generados siempre se obtienen al dar un paso en dirección al interior del electrodo, excepto en los puntos que se ubican sobre cualquiera de las alas, el ancho uno o cualquiera de las alturas en donde los potenciales más seguros se generan al dar un paso al exterior del electrodo, y no siguen un modelo para encontrar la dirección sino que varía según la separación del eje de simetría (eje Y para la Figura 6. 6).

6.2.2.2 Manteniendo la dirección de paso

Se realizó el pprocedimiento expuesto en el subcapítulo 3.2.2.2. La configuración que se toma como referencia para el estudio está en la Figura 6.7. Se visualiza en líneas segmentadas de color rojo las trayectorias paralelas a los ejes X y Y.

El análisis se divide en dos partes, la una para la trayectoria paralela al eje X y la otra trayectoria paralela al eje Y.

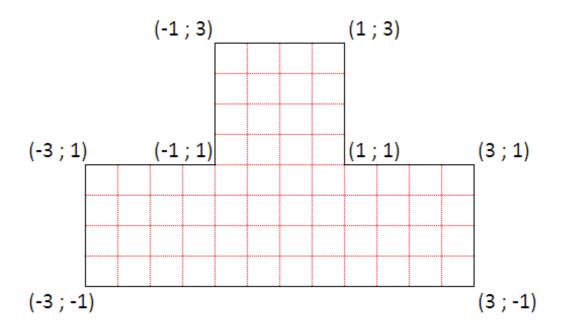


Figura 6.7. Electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices de 2X6 con coordenadas, con las trayectorias en el eje (en rojo con línea segmentada) y para el análisis del voltaje de paso en estudio

6.2.2.2.1 Trayectoria paralela al eje X

Se realiza trayectorias separadas a 0,5 m la una de la otra, por lo que solo se encuentran los potenciales generados en la trayectoria paralela al eje X, para

nueve valores de Y (-1;-0,5;0;0,5;1;1,5;1;2,5;3), que se encuentran en la Figura 6.7.

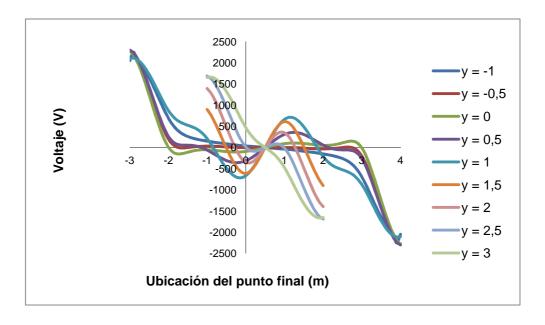


Figura 6. 8. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11 manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices de AX2X6 m para varios valores en el eje Y

Se observa que la trayectoria que genera menos variaciones de potencial de paso es la que sigue sobre el lado mayor o el lado menor, mientras que la trayectoria que genera más variaciones es la que sigue sobre la mediatriz de cualquiera de los anchos. Además, la trayectoria que genera al final o al inicio menores potenciales es la que sigue sobre la mediatriz de cualquiera de las diferencias. Los potenciales generados por todas las trayectorias paralelas al eje X se muestran en la Figura 6. 8.

6.2.2.2.2 Trayectoria paralela al eje Y

Las trayectorias paralelas al eje Y, son similares al caso anterior, con la diferencia de que al haber simetría se realiza la mitad del estudio ya que la otra se parece a la primera.

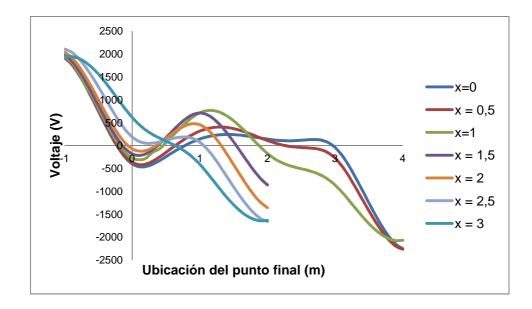


Figura 6. 9. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11 manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices de AX2X6 m para varios valores en el eje X

Se tomará como referencia las rectas de valor de X igual a 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; y 3, para los potenciales de las trayectorias que se representan en la Figura 6. 9. Se observa que las trayectorias que sufren menor variación de potenciales son las que se encuentran más cercanas a la mediatriz del ancho, es decir, al eje de simetría.

6.3 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN T CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Los potenciales generados por el comportamiento de electrodos con perímetro en T con jabalinas en los vértices sobre la superficie del suelo para cada caso se observan en la Figura 6.1.

El mayor potencial de toque que se genera sobre la superficie de la malla está en el punto ocho, mientras que el potencial mínimo está en el seis, como se observa en la Figura 6. 6. Matemáticamente sigue el modelo de la ecuación [6. 3] para el potencial máximo y la ecuación [6. 4] para el potencial mínimo. Los potenciales

máximos y mínimos según la dimensión del lado base se ubican en la Figura 6. 11.

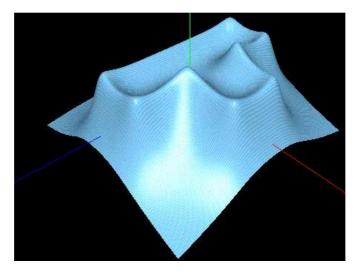


Figura 6. 10. Comportamiento de electrodos con perímetro en T sin reticulado interno con jabalinas en los vértices

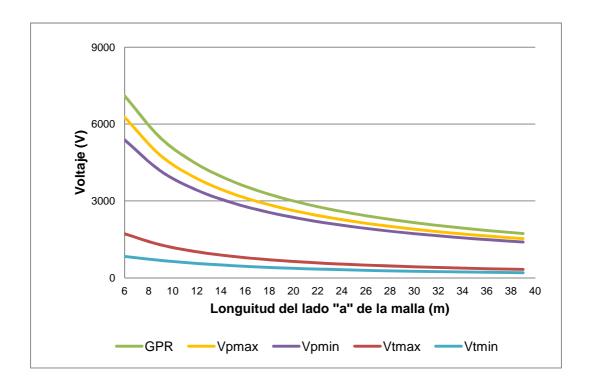


Figura 6. 11. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con jabalinas en los vértices de 180 cm

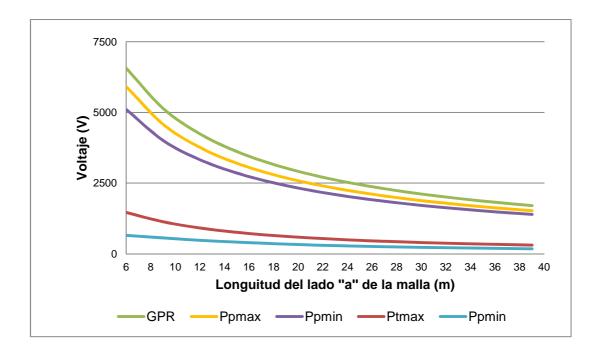


Figura 6. 12. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con jabalinas en los vértices de 240 cm

La longitud de las jabalinas empleadas se verifica en el vértice que no afecta la ubicación del potencial más alto o bajo solo en la magnitud de todos los potenciales generados. También se ve que se mantiene la relación en los electrodos de la configuración en T sin electrodos en los vértices.

6.4 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN T CON RETICULADO INTERNO Y SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

El análisis de las configuraciones de los electrodos en T encontró que los potenciales que se generan sobre la superficie del suelo se asemejan a la Figura 6. 13. Se muestra los potenciales generados para un electrodo con perímetro en con reticulado interno sin jabalinas en los vértices de T TX6X18.

Se encontró que el mayor potencial que se genera sobre la superficie del suelo nuevamente coincide con los casos anteriores; el máximo en el punto ocho y el mínimo en el punto seis, la magnitud de los mismos se muestran en la Figura 6.

14 y mantiene un modelo matemático similar al expuesto en la ecuación [6. 3] para potenciales máximos y la ecuación [6. 4] para potenciales mínimos.

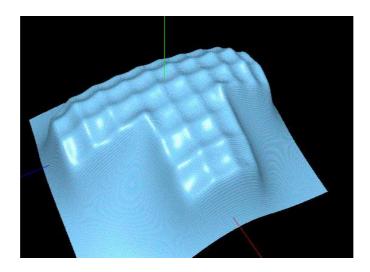


Figura 6. 13. Potenciales sobre el suelo en electrodos con perímetro en T con reticulado interno sin jabalinas en los vértices

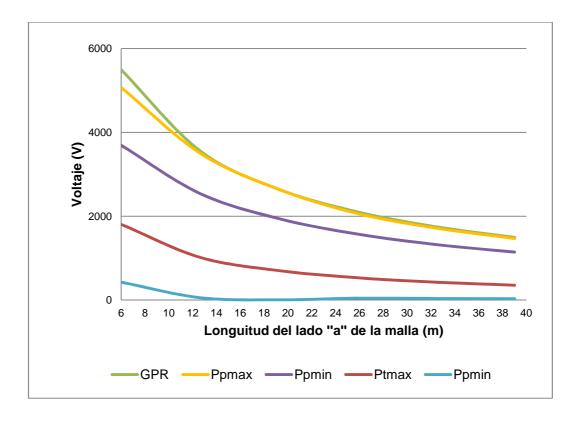


Figura 6. 14. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con reticulado interno y sin jabalinas en los vértices

6.5 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN T CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Las configuraciones de los electrodos en T permitieron encontrar que los potenciales que se generan sobre la superficie del suelo se asemejan a la Figura 6. 15. En la cual se muestra los potenciales generados para un electrodo con perímetro en T con reticulado interno con jabalinas en los vértices de T TX8X24 y con jabalinas de 180 cm.

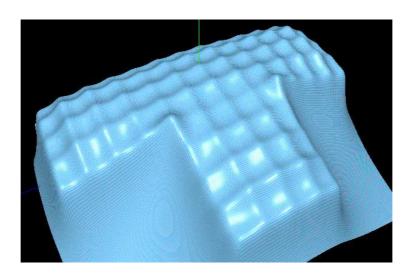


Figura 6. 15. Comportamiento de electrodos con perímetro en T con reticulado interno con jabalinas de 180 cm en los vértices

Se halló que la longitud de las jabalinas ubicadas en el vértice no afectan la ubicación del punto donde se genera el potencial de toque más alto o más bajo y que además estos potenciales máximos y mínimos que se genera sobre la superficie de la malla nuevamente coinciden con los casos anteriores: el máximo en el punto ocho y el mínimo en el punto seis. Los máximos y mínimos potenciales que se generan sobre la superficie de la malla se muestran en la Figura 6. 16 y en la Figura 6. 17, para las jabalinas de 180 cm y 240 cm respectivamente. Los potenciales máximos y mínimos mantienen un modelo matemático similar al expuesto en la ecuación [6. 3] para potenciales máximos y la ecuación [6. 4] para potenciales mínimos.

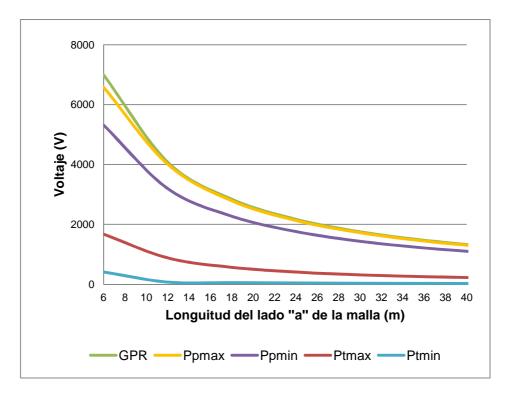


Figura 6. 16. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en los vértices

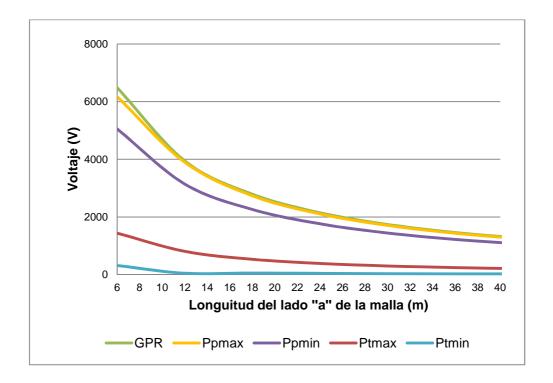


Figura 6. 17. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices

6.6 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN T CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LAS UNIONES PERIMETRALES

Para esta parte del análisis de las configuraciones de los electrodos en T se encontró que los potenciales que se generan sobre la superficie del suelo se asemejan a la Figura 6. 18. Se muestra los potenciales generados para un electrodo con perímetro en T con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales de T TX10X30.

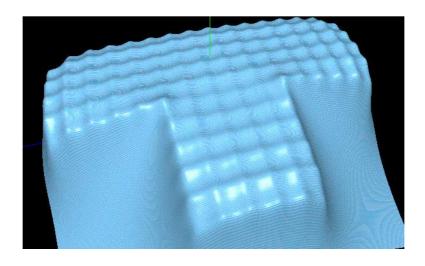


Figura 6. 18. Potenciales sobre el suelo en electrodos con perímetro en T con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales

La longitud de las jabalinas ubicadas en las uniones perimetrales solo afecta en la magnitud del potencial generado y no a la ubicación del punto donde se genera el potencial de toque más alto o más bajo. Además, estos potenciales máximos y mínimos que se genera sobre la superficie del electrodo nuevamente coincide con los casos anteriores, el máximo en el punto ocho y el mínimo en el punto seis. Los máximos y mínimos potenciales que se generan sobre la superficie de la malla se muestran en la Figura 6. 19 y en la Figura 6. 20 para las jabalinas de 180 cm y 240 cm respectivamente.

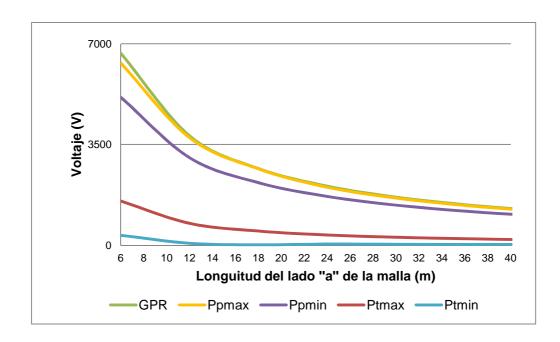


Figura 6. 19. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en las uniones perimetrales

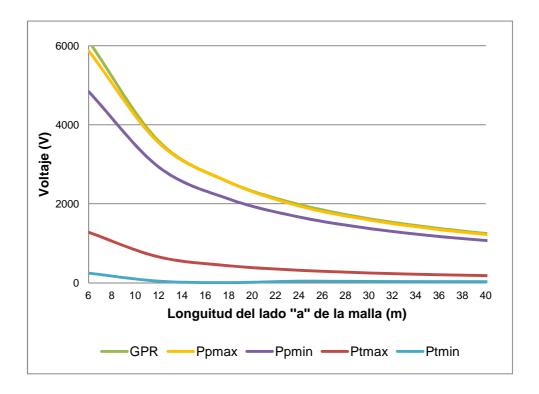


Figura 6. 20. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en T con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones perimetrales

Los potenciales máximos y mínimos mantienen un modelo matemático similar al expuesto en la ecuación [6. 3] para potenciales máximos y la ecuación [6. 4] para potenciales mínimos.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS DE MALLAS EN OTRAS CONFIGURACIONES

7.1 RESUMEN DEL ESTUDIO

En los capítulos anteriores se presentaron las configuraciones más comunes de mallas usadas para los sistemas de puestas a tierra. Se analizará una configuración que no muy usual pero posible de emplear; por consiguiente no se profundizará en el estudio. La configuración uniforme del modelo de electrodos tipo "C", se muestra gráficamente en la Figura 7. 1. En este esquema se tiene en cuenta que cada uno de sus lados es perpendicular a los otros dos lados adyacentes.

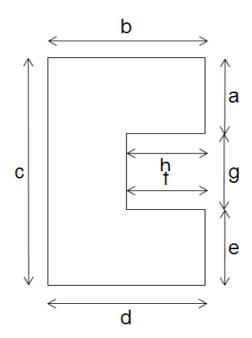


Figura 7. 1. Esquema de básico de un electrodo tipo "C"

Donde:

a: ancho uno

b: lado superior

c: altura

d: lado inferior

e: ancho dos

f: lado convexo uno

g: lado interior

h: lado convexo dos

El estudio de los potenciales que se han ensayado antes (de punto, de toque y el potencial de paso) sobre la superficie del suelo buscan el lugar en el que el electrodo genere el mayor y menor de los potenciales. Para el presente estudio se consideran parámetros que no se modifican, similar a los capítulos anteriores.

En la Figura 7. 1 se muestra un esquema uniforme y simétrico, es decir el lado a, e, f, g y h son iguales, los lados b y d son semejantes y equivalentes al doble del lado a y por último, el lado C es el triplo del lado a. Matemáticamente estas relaciones se muestran en las ecuaciones [7.1], [7.2] y [7.3].

$$e = f = g = h = a$$
 [7.1]

$$b = d = 2a \tag{7.2}$$

$$c = 3a ag{7.3}$$

De lo anterior se infiere que es necesario tomar en cuenta el parámetro "a" como base para la construcción del esquema de puesta a tierra, teniendo en cuenta las ecuaciones [7.1], [7.2] y [7.3]. Gráficamente estas relaciones se observan en la Figura 7. 2.

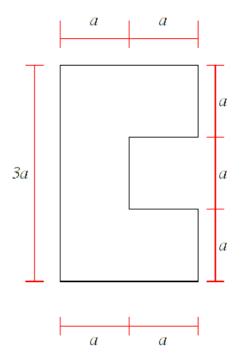


Figura 7. 2. Esquema del caso de uniformidad para mallas tipo "C"

Para el análisis de la presente configuración de electrodos con perímetro tipo C, se subdividirá el estudio en:

- Electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en C con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en C con reticulado interno y sin jabalinas.
- Electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con jabalinas en las uniones perimetrales.

En cada uno de los electrodos se encuentra los potenciales que se obtuvo sobre la superficie del suelo generado por este tipo de configuración y que son: potencial de punto, de toque y de paso. Como se explicó anteriormente, se emplea el programa informático GRNDSTUDIO V1.0 para simular los modelos en los que se aplica los diferentes tipos de estudio. En consecuencia, es necesario revisar el procedimiento descrito en el final del subcapítulo 3.1. El esquema de las configuraciones se encuentra en el apéndice B.

7.2 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN C SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

El estudio se realizó en dos partes, la primera permite visualizar el comportamiento del voltaje de toque y la segunda, el voltaje de paso en cada uno de los dos análisis, tratando de encontrar la ubicación y magnitud de los máximos y mínimos potenciales generados sobre la superficie del suelo.

7.2.1 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE TOQUE

Se aplicó con el procedimiento que se encuentra en el Anexo c. Las coordenadas de los puntos de los vértices en el plano XY en función de "a" de esta configuración se muestran en la Figura 7. 3.

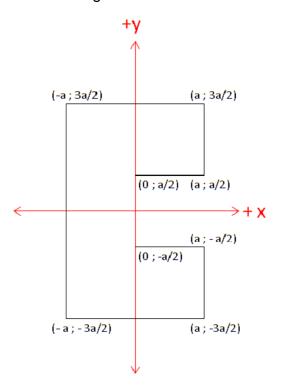


Figura 7. 3. Esquema con coordenadas de electrodos con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

El estudio es similar a lo ejecutado en los cuatro capítulos anteriores. Los potenciales generados por el comportamiento de electrodos con perímetro en C

sin jabalinas en los vértices sobre la superficie del suelo, se observa en la Figura 7. 4.

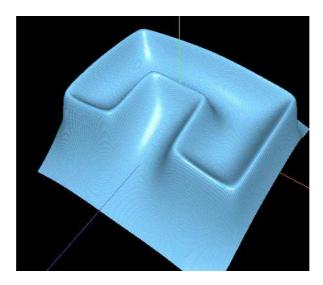


Figura 7. 4. Potenciales generados sobre el suelo en electrodos con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

Al analizar esta configuración se encontró que si el valor de "a" es menor o igual a dos, el potencial más alto se encontrará en la esquina formada entre el lado base y cada uno de los anchos. De lo contrario, el potencial de toque máximo se ubica en el centro de la malla, es decir, en la intersección de uno de los dos anchos con la mediatriz del lado base. Este comportamiento sigue la tendencia de la ecuación [7. 4]. Este modelo es similar al de coordenadas de la Figura 7. 3.

$$\begin{cases} Vt_{pm\acute{a}x} = \left(\pm \frac{3a}{2} ; -\frac{a}{2} \right) & si \ a \le 2 \\ Vt_{pm\acute{a}x} = \left(-\frac{a}{2} ; 0 \right) & si \ a > 2 \end{cases}$$
 [7. 4]

Mientras que el potencial de toque más seguro se genera sobre la mitad del lado interior uno, que se ve en la Figura 7. 1, matemáticamente se expresa como la ecuación [7. 5].

$$Vt_{min} = (0; 0)$$
 [7.5]

En la Figura 7. 5 se observan las variaciones provocadas por el voltaje de toque, como se explicó anteriormente en el subcapítulo 4.3.

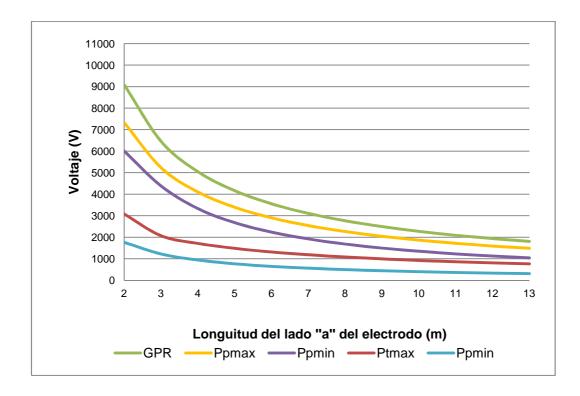


Figura 7. 5 Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

7.2.2 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE PASO

En este estudio se consideraron las aclaraciones expuestas en el ítem 3.2.2 del Capítulo 3. El estudio se subdivide en consideración a las variables: manteniendo el origen del paso y la dirección del paso.

7.2.2.1 Manteniendo el origen del paso

El estudio es similar a lo ejecutado en anteriormente. Encontrar la dirección hacia donde resulta más peligroso dar el paso se observa en la Figura 3.4.

Para esta parte del estudio se tomará como referencia 27 puntos, de los cuales, por cuestiones de simetría se disminuyen a 16 ya que el punto 1 es igual al punto

1´, el punto 2 similar al punto 2´, y así sucesivamente tal como se muestra en la Figura 7. 6.

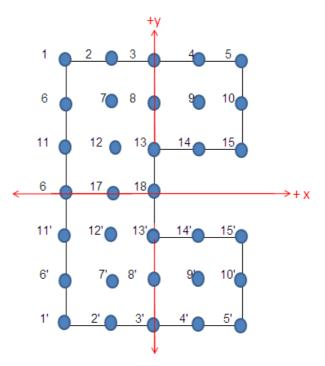


Figura 7. 6. Ubicación de 27 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

Cada uno de los puntos será el valor de espacio de inicio del paso (círculo en celeste) y coincidirá con los con el centro de un círculo (círculo en amarillo) de 1m de radio que muestra el punto final del paso, iniciando desde el eje X (flecha en amarillo) en dirección anti-horario (flecha de color negro), tal como se muestra en la Figura g. 2.

Del estudio indicado y aplicando el criterio expuesto en el subcapítulo 3.2.2.1, se encontró que los resultados de los puntos finales que se tabuló para realizar el gráfico del comportamiento de los voltajes de paso, que se expone detalladamente en el apéndice L. Se pudo ver que la dirección donde se genera el potencial más elevado sobre la superficie del electrodo es al dar un paso desde el punto cinco de la Figura 7. 6 en dirección a la bisectriz del ángulo externo formado entre los lados del electrodo que forman este vértice. Mientras que el punto donde no se generan los picos de los potenciales máximos más bajos se

ubican en el punto siete de la Figura 7. 6 en dirección al punto trece de la misma figura (315°); si se relacionan estos potenciales máximos en cada punto, el uno con el otro, se encuentra que el potencial del punto siete es cercano a un 15,62% del potencial generado en el punto cinco.

7.2.2.2 Manteniendo la dirección de paso

Para esta parte del análisis se realizo el procedimiento expuesto en el subcapítulo 3.2.2.2.

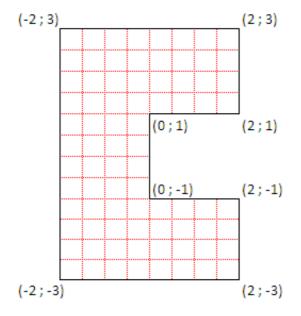


Figura 7.7. Electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices de 2X6 con coordenadas, con las trayectorias en el eje (en rojo con línea segmentada) y para el análisis del voltaje de paso en estudio

La configuración que se toma como referencia para el estudio se encuentra en la Figura 7.7 en la que se visualizan las líneas segmentadas de color rojo las trayectorias paralelas a los ejes X y Y, por lo cual el análisis se subdivide en dos partes.

7.2.2.2.1 Trayectoria paralela al eje X

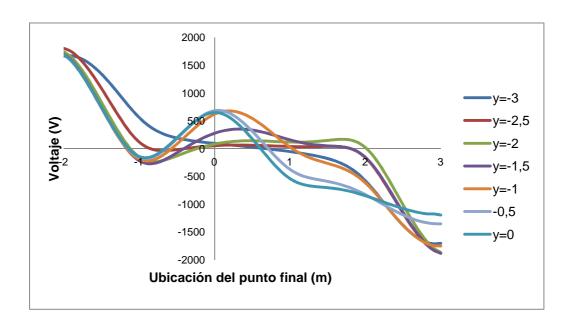


Figura 7. 8. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11 manteniendo una trayectoria paralela al eje X del electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices de CX2X6 m para varios valores en el eje Y

Las trayectorias tienen una separación de 0,5 m; por lo que se encuentra los potenciales generados únicamente en la trayectoria paralela al eje X, para nueve valores de y de (-3;-2,5;-2;-1,5;-1;-0,5;0); de esa forma se obtuvo la Figura 7.7. Se observa que la trayectoria que genera menos variaciones de potencial de paso es la que sigue sobre una trayectoria por encima y superior a los anchos, mientras que la trayectoria que genera más variaciones es la que sigue sobre una trayectoria paralela a la recta y=-1. Los potenciales generados por todas las trayectorias paralelas al eje X se muestran en la Figura 7. 8.

7.2.2.2.2 Trayectoria paralela al eje Y

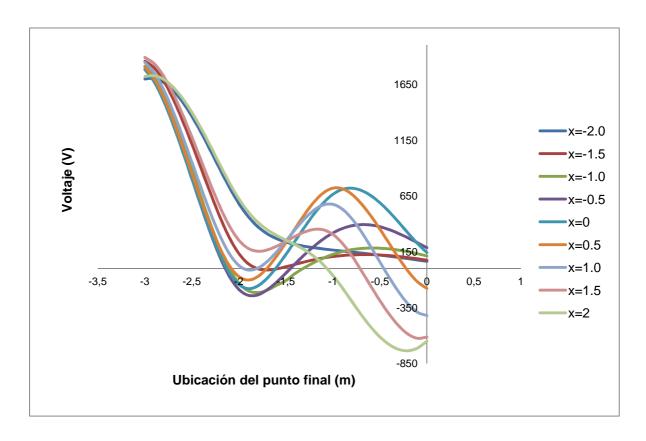


Figura 7. 9. Análisis del potencial de paso aplicando en la ec.3.3 y 3.11 manteniendo una trayectoria paralela al eje Y del electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices de CX2X6 m para varios valores en el eje X

Para el caso de trayectorias paralelas al eje Y es similar al caso anterior, con la diferencia que estudio a realizarse será en todos los puntos sobre la superficie de la malla manteniendo las direcciones indicadas en la Figura 7. 9, es decir las rectas de valor de x igual a (-2; -1.5; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 1,5 y 2), de las trayectorias en mención se observa que sobre el lado "c" (altura) tiene un comportamiento que al final se establece, es decir a medida que nos acercamos al centro de este lado el potencial tiende a disminuir notablemente cabe aclarara que los puntos evaluados de la trayectoria van desde dar un paso desde fuera del electrodo en dirección perpendicular a al lado superior (lado "b" de la Figura 7. 1) hasta un paso que se dé desde antes del eje X hasta llegar exactamente un paso sobre el eje en mención.

7.3 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN C CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Los potenciales generados por el comportamiento de electrodos con perímetro en C con jabalinas en los vértices sobre la superficie del suelo se observa en la Figura 7. 10.

Para esta configuración se encontró que el mayor potencial de toque que se genera sobre la superficie del electrodo es en el punto uno si la longitud del lado "a" no supera y es cercano al valor de cuatro metros, caso contrario el punto donde se genera el potencial máximo es en el punto siete del la Figura 7. 6.

Mientras que el potencial mínimo generado es en el punto dieciocho para el caso que "a" sea menor que cuatro metros mientras que para el caso contrario los potenciales más seguros se generan en el punto trece mostrado en la Figura 7. 6. Matemáticamente sigue el modelo de la ecuación [7.6] para el potencial máximo y la ecuación [7.7] para el potencial mínimo. Los potenciales máximos y mínimos según la dimensión del lado base se ubican en la Figura 7. 11.

$$Vt_{pm\acute{a}x} = \begin{cases} \left(-a ; \pm \frac{3a}{2}\right) & si \ a < 4 \\ \left(-\frac{a}{2} ; \pm a\right) & si \ a \ge 4 \end{cases}$$
 [7.6]

$$Vt_{pmin} = \begin{cases} (0; 0) & si \ a < 4 \\ (0; \pm \frac{a}{2}) & si \ a \ge 4 \end{cases}$$
 [7.7]

Además se verifica que la longitud de las jabalinas empleadas en el vértice no afecta en la ubicación del potencial más alto o bajo únicamente en la magnitud de todos los potenciales generados.

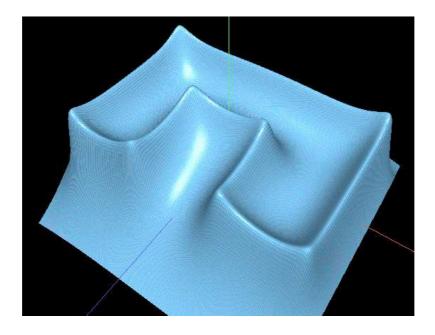


Figura 7. 10. Comportamiento de electrodos con perímetro en C sin reticulado interno con jabalinas de 180 cm en los vértices

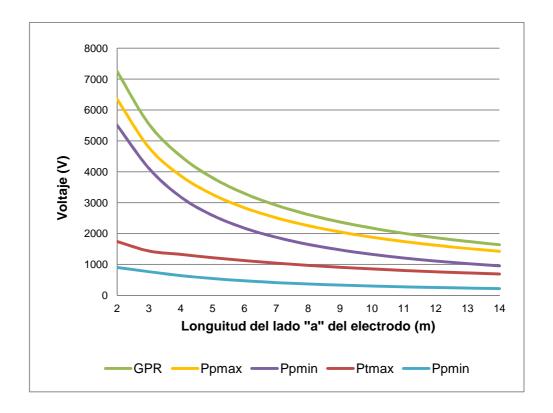


Figura 7. 11. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con jabalinas en los vértices de 180 cm

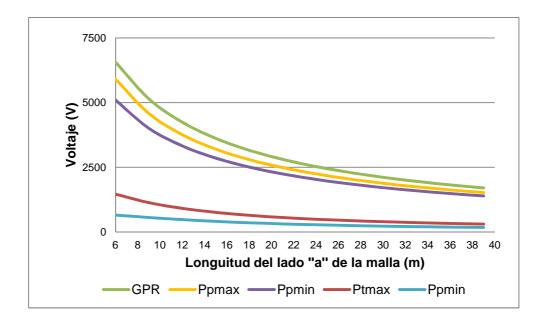


Figura 7. 12. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con jabalinas en los vértices de 240 cm

7.4 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN C CON RETICULADO INTERNO Y SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Para esta parte del análisis de las configuraciones de los electrodos en T se encontró que los potenciales que se generan sobre la superficie del suelo se asemejan a la Figura 7. 13. Se muestra los potenciales generados para un electrodo con perímetro en con reticulado interno sin jabalinas en los vértices de CX6X18.

Para esta configuración se encontró que el mayor potencial que se genera sobre la superficie de la malla es en el punto uno el máximo y en el punto trece el mínimo: El modelo matemático sigue la ecuación [7.8] el detalle de todos los potenciales máximos y mínimos generados a medida que se aumenta el lado del electrodo se muestran en la Figura 7. 14 Y mantienen un modelo matemático similar al expuesto en la ecuación [7. 4] para potenciales máximos y la ecuación [7. 5] para potenciales mínimos.

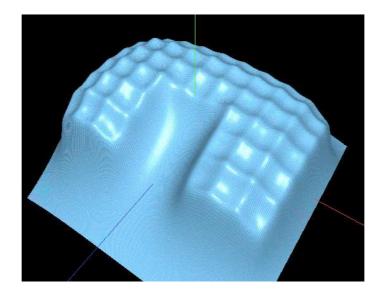


Figura 7. 13. Comportamiento de electrodos con perímetro en C con reticulado interno sin jabalinas en los vértices

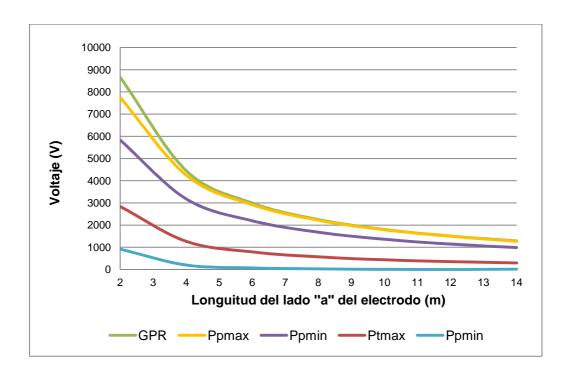


Figura 7. 14. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con reticulado interno y sin jabalinas en los vértices

Un detalle en particular que tiene esta configuración según la Figura 7. 14 es que el potencial de paso es muy cercano al valor del potencial de malla por lo que toque son relativamente pequeños.

$$Vt_{pm\acute{a}x} = \left(-a ; \pm \frac{3a}{2}\right)$$
 [7.8]

$$Vt_{pmin} = \left(0 ; \pm \frac{a}{2} \right)$$
 [7.9]

7.5 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN C CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Para esta parte del análisis de las configuraciones de los electrodos en C se encontró que los potenciales que se generan sobre la superficie del suelo se asemejan a la Figura 7. 15. En la cual se muestra los potenciales generados para un electrodo con perímetro en C con reticulado interno con jabalinas en los vértices de CX8X24 y con jabalinas de 180 cm.

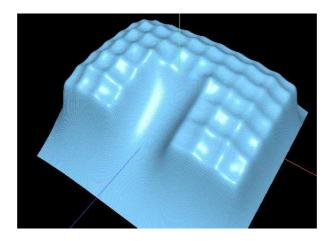


Figura 7. 15. Comportamiento de electrodos con perímetro en C con reticulado interno con jabalinas en los vértices de 180 cm

Para esta configuración se encontró que la longitud de las jabalinas ubicadas en el vértice no afectan la ubicación del punto donde se genera el potencial de toque más alto o más bajo y que además estos potenciales máximos y mínimos que se genera sobre la superficie de la malla nuevamente coincide que en los casos anteriores, el máximo en el punto uno y el mínimo en el punto trece y los máximos

y mínimos potenciales que se generan sobre la superficie de la malla se muestran en la Figura 7. 16 y Figura 7. 17.

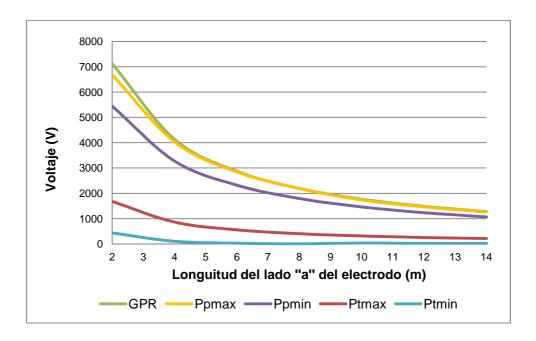


Figura 7. 16. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en los vértices

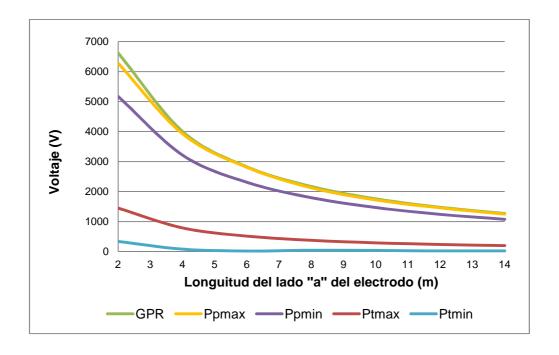


Figura 7. 17. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en los vértices

Figura 7. 16 y Figura 7. 17 para las jabalinas de 180 cm y 240 cm respectivamente. Los potenciales máximos y mínimos mantienen un modelo matemático similar al expuesto en la ecuación [7.8] para potenciales máximos y la ecuación [7.9] para potenciales mínimos.

7.6 ANÁLISIS EN ELECTRODOS CON PERÍMETRO EN C CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LAS UNIONES PERIMETRALES

Para esta parte del análisis de las configuraciones de los electrodos en C se encontró que los potenciales que se generan sobre la superficie del suelo se asemejan a la Figura 7. 18. En la cual se muestra los potenciales generados para un electrodo con perímetro en C con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales de CX10X30.

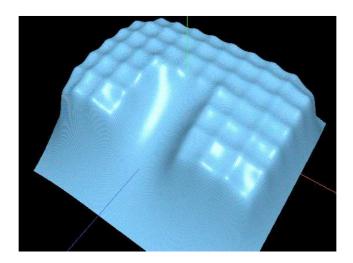


Figura 7. 18. Potenciales de punto en la superficie del suelo sobre un electrodo con perímetro en C con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales

Para esta configuración se encontró que la longitud de las jabalinas ubicadas en las uniones perimetrales solo afecta en la magnitud del potencial generado y no afectan la ubicación del punto donde se genera el potencial de toque más alto o más bajo y que además estos potenciales máximos y mínimos que se genera

sobre la superficie de la malla nuevamente coincide que en los casos anteriores, el máximo en el punto ocho y el mínimo en el punto seis y los máximos y mínimos potenciales que se generan sobre la superficie de la malla se muestran en la Figura 7. 19 y en la Figura 7. 20 para las jabalinas de 180 cm y 240 cm respectivamente. Los potenciales máximos y mínimos mantienen un modelo matemático similar al expuesto en la ecuación [7.8] para potenciales máximos y la ecuación [7.9] para potenciales mínimos.

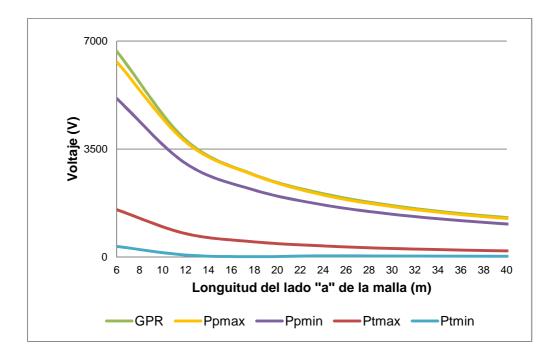


Figura 7. 19. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con jabalinas de 1.80 m en las uniones perimetrales

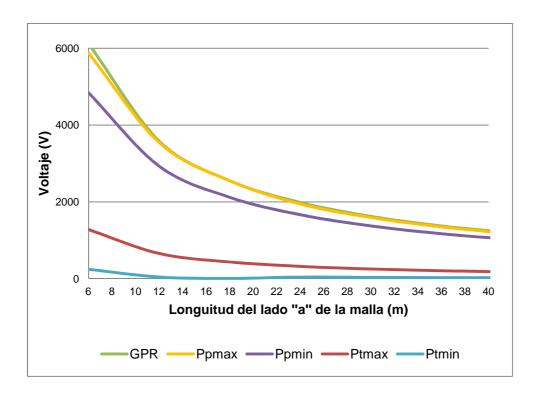


Figura 7. 20. Potenciales en configuración de electrodos con perímetro en C con reticulado interno y con jabalinas de 2.40 m en las uniones perimetrales

CAPÍTULO VIII

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Se demostró que el programa informático GRDNSTUDIO V 1.0 tiene una importante funcionalidad porque permitió encontrar la resistencia de malla, así como los potenciales de punto, toque y paso en la superficie del suelo sobre la malla. Estos valores o magnitudes se observan en el Panel de Resultados del programa. No obstante, solo se muestran los potenciales de punto sobre toda la malla en la ventana de visualización de Gráficos.

Se comprobó que, al realizar una simulación en el programa, no siempre se genera el potencial de paso más peligroso al dar un paso al exterior de la malla en todas las configuraciones excepto en las de tipo C. En el caso de mallas de tipo C, el potencial más seguro se encuentra al dar un paso al exterior de la malla desde el vértice entre el lado interno y el lado convexo dos; al igual que a partir del vértice entre el lado interno y el lado convexo uno (Figura i.14).

La investigación verificó que, a través de la aplicación del programa GRDNSTUDIO V 1.0, los potenciales de punto y de toque máximos y mínimos disminuyen directamente a medida que la resistencia de malla disminuye. Otra situación que hace confiable al programa es que permite calcular las resistencias de malla, las mismas que disminuyen a medida que las longitudes de los lados de las configuraciones aumentan.

Mediante el programa se demuestra que, cuando no existe simetría, los potenciales de toque más peligrosos se generan en un solo punto, aunque no siempre coincidan en un mismo lugar, al variar la longitud del perímetro. En el caso de presentarse simetría, la magnitud del potencial único se repite las veces en las que haya simetría.

Se verificó que el comportamiento de la malla de puesta a tierra sobre la superficie del suelo depende de varios factores, entre los que están la resistividad, la corriente de falla, los diámetros de los conductores y en especial, la configuración geométrica de la malla la que genera dificultades en la ubicación de los voltajes.

Se comprobó que la teoría que se aplica en el programa informático GRDNSTUDIO V 1.0 está de acuerdo con los autores consultados (referencias bibliográficas) para realizar el presente proyecto y las normas que son aceptadas como un estándar internacional. Se demostró la influencia de cada elemento en el comportamiento de la resistencia y los potenciales que se obtienen en la superficie de la malla.

RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar los cambios necesarios en el programa GRDNSTUDIO V 1.0, con la finalidad de que la resolución sea más rápida y exacta y se muestre las zonas donde se generan los potenciales de toque y de paso y se muestren en la ventana de visualización de Gráficos, donde además se debería marcar las áreas de los máximos y mínimos riesgos. Además, la ejecución del programa debería evitar los errores que se explican al final del Capítulo 2 del presente proyecto.

Antes de implementar un diseño de puesta a tierra se debería verificar hacia dónde se generan los potenciales máximos y mínimos ya que no se puede generalizar la ubicación y dirección exacta de los mismos, porque ya se cuenta con un programa de simulaciones.

Es necesario aclarar que, en el caso de tener resultados de los potenciales máximos y mínimos de una configuración específica con parámetros establecidos (corriente, resistividad del suelo) no es necesario volver a calcular otra

configuración similar con un cambio de parámetros, porque ya se cuentan con los resultados de la primera; tanto en ubicación como sentido, lo único que variará directamente son las magnitudes en forma directamente proporcional.

En el caso de existir simetría se debería realizar un estudio en la parte que se toma como base de la simetría, lo que se refleja sobre el eje simétrico para encontrar cuántas veces se dan potenciales máximos y mínimos.

Se debe extremar el cuidado al diseñar e implementar una malla de puesta a tierra, en particular sobre la configuración geométrica porque afecta de diferente manera el comportamiento de la malla de puesta a tierra, así como la ubicación de los potenciales máximos generados, mientras que los otros factores solo perturban en la magnitud y no en la ubicación de los voltajes.

Se sugiere perfeccionar el programa informático GRDNSTUDIO V 1.0, con la intervención de un equipo multidisciplinario, porque la investigación y la demostración de los proyectos realizados en el sistema de Educación Superior, contribuyen al desarrollo de la ciencia y tecnología en el Ecuador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE, Standart 80 (2000), Guide for Safety in AC Substation Grounding, Estados Unidos, New York.
- [2] Casas, Fabio (2008). Tierras: Soporte de la seguridad eléctrica (4ta. Ed.), Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- [3] García, Rogelio (1991). La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T.(1ra. Ed.), Barcelona, España: Marcombo.
- [4] Martínez, Juan y Toledano, José (2002). Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas (4ta. Ed.), Madrid, España: Tomson.
- [5] Montaña, Johny (2011). Teoría de puestas a tierra (1ra. Ed.), Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte
- [6] Ospina, Germán; Valencia, Jaime; Cárdenas, Carlos y Villa, Walter (2007). Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos (1ra. Ed.), Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- [7] Gudel, Sebastián, y González, Pedro (2005). Instalaciones eléctricas de Interior. Recuperado de http://www.marcombo.com/Descargas/8496334147 -INSTALACIONES%20EL%C3%89CTRICAS%20DE%20INTERIOR/UNID AD%2010.pdf (Marzo, 2012).
- [8] ALLER CASTRO, José Manuel (1993). Diseño de sistemas complejos de puesta a tierra en terrenos con estratos múltiples y con consideraciones de su comportamiento en régimen transitorio (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.

- [9] Villarrubia M. Seguridad eléctrica: efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano (2000), Recuperado de http://www.ing.unp.edu.ar/electronica/asignaturas/ee016/anexo/s-BIB851.pdf (Marzo, 2012).
- [10] Pararrayos(2006). MANUAL DE PUESTAS A TIERRA THOR-GEL recuperado de http://www.para-rayos.com/datos/gel20061.pdf (Marzo, 2012).
- [11] Navarrete, Joffre (1996) Evaluación del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra mediante el uso de un computador personal. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero eléctrico. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- [12] Marín, Cristian (2005). Evaluación del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra en un suelo estratificado mediante simulación aplicando un computador personal. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero eléctrico. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- [13] Caiza, Victor Hugo (2008), Diseño e implementación de un Software optimizado para el análisis y diseño de sistemas de puestas a tierra. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- [14] Samaniego, Viviana (2008), Construcción de un prototipo didáctico para medir la resistividad del terreno. Proyecto previo a la obtención del título de tecnóloga electromecánica. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- [15] Rojas Gregor (2007), Manual de sistemas de puesta a tierra. Recuperado de http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/00%20MANUAL%20GEDIWELD%202007%20COMPLET O%20B.pdf (abril, 2012)

- [16] Jiménez Edgar (2012), Manual de diseño de puesta a tierra. Recuperado de http://es.scribd.com/doc/104729449/MANUAL-DISENO-PUESTA-A-TIERRA -1 (abril, 2012).
- [17] Instituto de Ingeniería Eléctrica (2004), Curso de Instalaciones eléctricas; "Puestas a tierra y conductores de protección". Recuperado de http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/iiee/Documentos/Teorico/Puesta_tierra.pdf (abril, 2012).

ANEXOS

ANEXO A

Ecuaciones empleadas para evaluar el comportamiento de electrodos en el programa GRDNSTUDIO V1.0

A.1 Expresiones para simplificar el tipo de suelo

Expresión para simplificar un suelo de 3 capas a 2 capas, cuando la malla o electrodo está integramente en la segunda capa.

Cuando se tiene un modelo de suelo de varias capas, es necesario simplificarlo para facilitar su estudio y análisis. Para reducir el número de capas de un suelo se considera resistividades y profundidades de cada una de las capas.

Para un suelo de varias capas como se indica en la figura se obtienen las siguientes expresiones de simplificación²².

Instituto de Ingeniería Eléctrica (2004), Curso de Instalaciones eléctricas; "Puestas a tierra y conductores de protección". Recuperado de http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/iiee/Documentos/Teorico/Puesta_tierra.pdf (abril, 2012).

²² Curso de Instalaciones eléctricas; "Puestas a tierra y conductores de protección"; http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/iiee/Documentos/Teorico/Puesta_tierra.pdf pp 39-41

²² MARTÍNEZ Juan, TOLEADO José, Puestas a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas, Madrid España, 2004. Thomson Editores Spain, pág. 6 y 7.

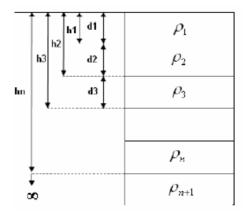


Figura a. 1. Modelo de un suelo estratificado de n capas

$$d_a = d_{eq} = \sum_{1}^{n} d_i$$
 [A. 1]

$$d_b = \infty$$
 [A. 2]

$$\rho_a = \rho_{eq} = \frac{d_{eq}}{\sum_{1}^{n} \frac{d_i}{\rho_i}}$$
 [A. 3]

$$\rho_b = \rho_n + 1 \tag{A.4}$$

Donde:

d_{eq}:

d_a: anchura promedio de la capa que se encuentra junto a la superficie

del suelo de un suelo estratificado de dos capas.

 da: anchura promedio de la capa que hacia el interior del suelo del suelo de un suelo estratificado de dos capas.

anchura promedio equivalente a un suelo homogéneo.

ρ_a: resistividad de la capa superficial en un suelo homogéneo de un

suelo.

 ρ_{eq} : resistividad equivalente del suelo.

Expresión para simplificar un suelo estratificado (2 ó 3 capas),

Si se tiene un suelo de 3 capas, para simplificarlo a uno de 2 capas de procede de la siguiente forma, manteniendo el criterio expuesto anteriormente²³.

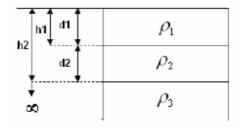


Figura a. 2. Modelo de un suelo estratificado de 3 capas

$$d_a = d_{eq} = d_1 + d_2 [A. 5]$$

$$d_a = d_{eq} = \sum_{1}^{n} d_i$$
 [A. 6]

$$\rho_a = \rho_{eq} = \frac{d_{eq}}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2}}$$
 [A. 7]

$$\rho_b = \rho_3 \tag{A. 8}$$

La simplificación permite obtener un modelo de suelo de 2 capas representado por el siguiente gráfico.

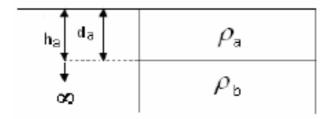


Figura a. 3. Modelo de un suelo estratificado de 2 capas

²³ Curso de Instalaciones eléctricas; "Puestas a tierra y conductores de protección"; http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/iiee/Documentos/Teorico/Puesta_tierra.pdf

Expresión para simplificar un suelo estratificado (2 ó 3 capas), cuando la malla o electrodo se encuentra en las 2 capas de un suelo estratificado. Tener en cuenta que en un suelo de 3 capas, la capa superior es de protección, ahí no se instala la malla o electrodo.

Cuando la malla o electrodo se encuentra en 2 capas de un suelo estratificado se procede a simplificar de la siguiente forma.

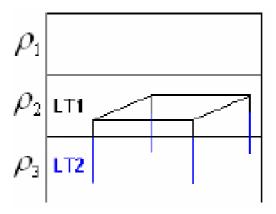


Figura a. 4. Modelo de un electrodo entre un suelo estratificado de 3 capas

L_{T1}: Es la longitud total de los electrodos, que se encuentran en la 2 capa de un suelo estratificado.

L_{T2}: Es la longitud total de los electrodos, que se encuentran en la 3 capa de un suelo estratificado.

$$\rho_a = \frac{L_{T1} + L_{T2}}{\frac{L_{T1}}{\rho_1} + \frac{L_{T2}}{\rho_2}}$$
 [A. 9]

Teniendo la resistividad equivalente se procede a la evaluación de la malla o electrodo, como si se tratara de un suelo homogéneo.

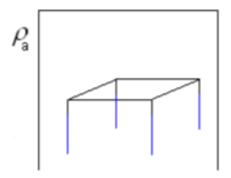


Figura a. 5. Resultado obtenido al aplicar la simplificación

A.2 Expresiones para el análisis de los electrodos de puestas a tierra

El siguiente análisis matemático considera sólo 2 tipos de suelo²⁴:

- Homogéneo (1 capa)
- Estratificado (2 capas)

Cuando se trata de un suelo estratificado de 2 capas, el electrodo sólo puede estar inmerso en la primera capa.

Para resolver con un tipo de suelo estratificado de 3 capas, se procede a reducir sus capas a un modelo de suelo de 2 capas utilizando la ecuación 2.

Cuando se trata de un suelo estratificado de 2 ó 3 capas, y el electrodo se encuentra inmerso en 2 capas. Se procede a simplificar utilizado la ecuación 3 y se procede a resolver como un suelo homogéneo.

Expresión para calcular los coeficientes de reflexión

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$
 [A. 10]

Expresión para el cambio de coordenadas

NAVARRETE Jofre. Evaluación del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra mediante el uso de un computador personal. Tesis. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 1996.

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta cos\alpha & cos\theta sen\alpha & sen\theta \\ -sen\alpha & cos\alpha & 0 \\ -sen\theta cos\alpha & -sen\theta sen\alpha & cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X - X_i \\ Y - Y_i \\ Z - Z_i \end{bmatrix}$$
 [A. 11]

Expresión que definen las coordenadas U, V, W

$$U_K = \alpha' * \lambda_K + b'$$
 [A. 12]

$$V_K = a^{\prime\prime} * \lambda_K + b^{\prime\prime}$$
 [A. 13]

$$W_K = a^{\prime\prime\prime} * \lambda_K + b^{\prime\prime\prime}$$
 [A. 14]

Expresión que definen las constantes a', a", a" y b', b", b"

$$a' = \frac{U_{fk} - U_{ik}}{\lambda_{jk} - \lambda_{ik}}$$
 [A. 15]

$$a^{\prime\prime} = \frac{V_{fk} - V_{ik}}{\lambda_{jk} - \lambda_{ik}}$$
 [A. 16]

$$a^{\prime\prime\prime} = \frac{W_{fk} - W_{ik}}{\lambda_{jk} - \lambda_{ik}}$$
 [A. 17]

$$b' = \frac{\lambda_{jk} \times U_{fk} - \lambda_{ik} \times U_{ik}}{\lambda_{ik} - \lambda_{ik}}$$
 [A. 18]

$$b^{\prime\prime} = \frac{\lambda_{jk} \times V_{fk} - \lambda_{ik} \times V_{ik}}{\lambda_{ik} - \lambda_{ik}}$$
 [A. 19]

$$b^{\prime\prime\prime} = \frac{\lambda_{jk} \times W_{fk} - \lambda_{ik} \times W_{ik}}{\lambda_{ik} - \lambda_{ik}}$$
 [A. 20]

Expresión para calcular las resistencias mutuas.

$$\bar{R}_{jk} = \frac{\bar{V}_{jk}}{I_j}$$
 [A. 21]

Expresión para calcular el potencial promedio.

$$\bar{V}_{jk} = \frac{\int_{\lambda_{fk}}^{\lambda_{ik}} V_{jk}(\lambda_{jk}) d\lambda}{\lambda_{fk} - \lambda_{ik}}$$
 [A. 22]

Expresión para calcular las corrientes en cada electrodo.

$$[V] = [R][I]$$
 [A. 23]

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$
 [A. 24]

Expresión para calcular el potencial generado por un electrodo, en un punto P(X,Y,0).

$$V(P) = \frac{\rho_1 * i}{4 * \pi} * \sum_{-\infty}^{\infty} k^{|n|} \{ ff_O + ff_{O'} \}$$
 [A. 25]

Donde:

$$ff_{0} = \sinh^{-1} \left[\frac{L_{j} - (a'\lambda_{k} + b' - 2nH\sin\theta)}{\left[(a''\lambda_{k} + b'')^{2} + (a'''\lambda_{k} + b''' - 2nH\cos\theta)^{2} \right]^{1/2}} \right] + \sinh^{-1} \left[\frac{(a'\lambda_{k} + b' - 2nH\sin\theta)}{\left[(a''\lambda_{k} + b'')^{2} + (a'''\lambda_{k} + b''' - 2nH\cos\theta)^{2} \right]^{1/2}} \right]$$
[A. 26]

$$ff_{0}$$

$$= \sinh^{-1} \left[\frac{L_{j} - \left((a'\lambda_{k} + b')cos(2\theta) - (a'''\lambda_{k} + b''')sin(2\theta) - (2Z_{i} + 2nH)sin\theta \right)}{\left[(a''\lambda_{k} + b'')^{2} + \left((a'\lambda_{k} + b')sin(2\theta) + (a'''\lambda_{k} + b''')cos(2\theta) + (2Z_{i} + 2nH)cos\theta \right)^{2} \right]^{1/2}} \right]$$

$$+ \sinh^{-1} \left[\frac{\left((a'\lambda_{k} + b')cos(2\theta) - (a'''\lambda_{k} + b''')sin(2\theta) - (2Z_{i} + 2nH)sin\theta \right)}{\left[(a''\lambda_{k} + b'')^{2} + \left((a'\lambda_{k} + b')sin(2\theta) + (a'''\lambda_{k} + b''')cos(2\theta) + (2Z_{i} + 2nH)cos\theta \right)^{2} \right]^{1/2}} \right]$$

Cuando se trata de un suelo homogéneo n=0

Expresión para calcular la resistencia de puesta a tierra.

$$R_g = \left[\sum_{j=1}^n I_j \right]^{-1}$$
 [A. 28]

Expresión para calcular la corriente total en PU que abandona el electrodo.

$$I = \sum_{j=1}^{n} I_j$$
 [A. 29]

Expresión para calcular el potencial total, en un punto P(X,Y,0).

$$V(P) = \sum_{i=1}^{n} V_j(P)$$
 [A. 30]

Expresión para calcular el GPR en voltios.

$$GPR = R_a \times Icc$$
 [A. 31]

Expresión para calcular el potencial de toque.

$$Vt_{(X,Y,O)} = GPR - V_{(X,Y,O)}$$
 [A. 32]

Expresión para calcular el potencial de paso.

$$\Delta Vp = Vt_{(X,Y,O)} - V_{(X,Y,O)}$$
 [A. 33]

APÉNDICES

APÉNDICE A

Análisis del comportamiento de manera uniforme de variables de diseño de puesta a tierra

A.1 ANÁLISIS DE LA RESISTIVIDAD DE LA PUESTA A TIERRA

Para el estudio de la influencia de la resistividad de la puestas a tierra se modificó este parámetro para una configuración dada (electrodo con perímetro cuadrado de 20 m de lado con jabalinas en los vértices), manteniendo los valores de la corriente de falla en 1000 A, el diámetro del conductor en 14 mm, las coordenadas del punto inicial (0;10) las coordenadas del punto final en (0;11) para el cálculo de potenciales e paso y las coordenadas para el potencial de toque en (10;-10) seguidamente se evaluó los voltajes que se generan en un mismo punto, tanto el GPR, potencial de punto, el potencial de toque y el potencial de paso, además obteniendo el valor de la resistencia de malla, y estos valores tabulados se los visualiza en la Tabla A. 1.

Los valores de referencia de la Tabla A. 1, son los valores promedios de los rangos de los valores de resistividad típicos que se mostró en la Tabla 1. 1. De los resultados de los potenciales obtenidos si se relaciona en una proporción entre la resistividad inicial y la resistividad final con el potencial (sea el GPR, de toque, de punto o de paso) inicial con el final vemos que exactamente es lo mismo a manera de ejemplo se observa a continuación, si se relaciona el tipo de suelo entre Humus y Rocas cristalinas, tanto sus resistividades, sus potenciales y sus resistencias se tiene:

Relación de resistividades

$$\frac{\rho_{Humus}}{\rho_{Rocas\ crist}} = \frac{80,000\ (\varOmega\ m)}{750,000\ (\varOmega\ m)} = 0,1066666$$

Tipo de suelo	Resistividad promedio del suelo (Ω m)	Resistencia (Ω)	Potencial GPR (V)	Potencial de punto (V)	Potencial de toque (V)	Potencial de paso (V)
Agua salada	0,505	0,010	9,912	8,358	1,553	1,017
Lama	7,500	0,147	147,202	124,133	23,069	15,107
Suelo Orgánico	102,500	2,012	2011,760	1696,489	315,271	206,459
Humus	80,000	1,570	1570,154	1324,089	246,065	161,138
Arcilla	155,000	3,042	3042,174	2565,422	476,752	312,206
Agua de río	275,000	5,397	5397,405	4551,555	845,850	553,913
Gneises descompuestos	1050,000	20,608	20608,273	17378,664	221,532	2114,942
Rocas calcáreas	310,000	6,084	6084,347	5130,844	953,503	624,411
Tierra de Jardín	6000,000	117,762	117761,562	99306,653	18454,906	12085,381
Rocas cristalinas	750,000	14,720	14720,195	12413,332	2306,863	1510,673
Caliza fisurada	2750,000	53,974	53974,051	45515,551	8458,500	5539,133
Caliza compacta	3000,000	58,881	58880,781	49653,327	9227,453	6042,690
Granitos y basaltos	25500,000	500,487	500486,625	422053,263	78433,375	51362,867
Arena común	5500,000	107 948	107948 107	91031 101	16917 000	11078 266

Tabla A. 1. Modificando el valor de la resistividad del suelo

*El Autor

Relación de resistencias

$$\frac{R_{P \; Humus}}{R_{P \; Rocas \; crist}} = \frac{1,570 \; (\Omega)}{14,720 \; (\Omega)} = 0,1066666$$

Relación de GPR

$$\frac{GPR_{P Humus}}{GPR_{P Rocas \ crist}} = \frac{1570,154 \ (V)}{14720,195 \ (V)} = 0,1066666$$

Relación de potencial de punto

$$\frac{V_{PT\ Humus}}{V_{PT\ Rocas\ crist}} = \frac{1324,089\ (V)}{12413,332\ (V)} = 0,1066666$$

Relación de potencial de toque

$$\frac{V_{T \; Humus}}{V_{T \; Rocas \; crist}} = \frac{246,065 \; (V)}{2306,863 \; (V)} = 0,1066666$$

Relación de potencial de paso

$$\frac{V_{P\,Humus}}{V_{P\,Rocas\,crist}} = \frac{161,138\,(V)}{1510,673\,(V)} = 0,1066666$$

De las relaciones anteriores se concluye la resistividad es directamente proporcional al valor del potenciales y de resistencia.

De lo explicación anterior se obtiene las ecuaciones desde la ecuación [3. 12] hasta la ecuación [3. 16] que se mencionó el capítulo 3.

$$R_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} R_o \tag{3. 12}$$

$$GPR_f = \frac{\rho_f}{\rho_o}GPR_o$$
 [3. 13]

$$VPt_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} VPt_o$$
 [3. 14]

$$VT_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} VT_o$$
 [3. 15]

$$VP_f = \frac{\rho_f}{\rho_o} VP_o$$
 [3. 16]

Donde:

R_f: Resistencia de la malla final.

R_o: Resistencia de la malla inicial.

 $ρ_0$: Densidad inicial del suelo en una capa homogénea (100 Ω m para el presente estudio).

 ρ_f : Densidad final del suelo en una capa homogénea.

 GPR_f : Voltaje de malla en un suelo homogéneo con densidad ρ_f .

 GPR_o : Voltaje de malla en un suelo homogéneo con densidad ρ_o .

 Vpt_o : Voltaje de punto en un suelo homogéneo con densidad ρ_o .

 Vpt_f : Voltaje de punto en un suelo homogéneo con densidad ρ_f .

 VT_0 : Voltaje de toque en un suelo homogéneo con densidad ρ_0 .

 $\begin{array}{ll} VT_f \colon & \text{Voltaje de toque en un suelo homogéneo con densidad } \rho_f. \\ Vp_o \colon & \text{Voltaje de paso en un suelo homogéneo con densidad } \rho_o. \\ Vp_f \colon & \text{Voltaje de paso en un suelo homogéneo con densidad } \rho_f. \end{array}$

A.2 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA CORRIENTE DE FALLA EN LA PUESTA A TIERRA

Se procedió a implementar en esta parte, un similar estudio que el anterior mostrando para esto la resistividad será un parámetro constante de 100 Ω m y se modifica los valores de la corriente de falla, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla A.2

Tabla A. 2. Modificando el valor de la corriente de falla

resistividad del suelo (Ω m)	Corriente de falla (A)	Diámetro del conductor (mm)	Resistencia (Ω)	Potencial GPR (V)	Potencial de punto (V)	Potencial de toque (V)	Potencial de paso (V)
100,000	100,000	14,000	1,963	196,269	165,511	30,758	20,142
100,000	200,000	14,000	1,963	392,539	331,022	61,516	40,285
100,000	300,000	14,000	1,963	588,808	496,533	92,275	60,427
100,000	500,000	14,000	1,963	981,346	827,555	153,791	100,712
100,000	750,000	14,000	1,963	1472,020	1241,333	230,686	151,067
100,000	1000,000	14,000	1,963	1962,693	1655,111	307,582	201,423
100,000	1200,000	14,000	1,963	2355,231	1986,133	369,098	241,708
100,000	1500,000	14,000	1,963	2944,039	2482,666	461,373	302,135
100,000	2000,000	14,000	1,963	3925,385	3310,222	615,164	402,846
100,000	10000,000	14,000	1,963	19626,928	16551,109	3075,818	2014,230
100,000	20000,000	14,000	1,963	39253,855	33102,219	6151,637	4028,460
100,000	100000,000	14,000	1,963	196269,265	165511,084	30758,188	20142,301
100,000	200000,000	14,000	1,963	392538,530	331022,169	61516,375	40284,602
100,000	1000000,000	14,000	1,963	1962692,750	1655110,924	307581,875	201423,020

^{*}El Autor

Si se relaciona los resultados obtenidos entre la corriente 1000 A con los de 20000 A, sus potenciales y sus resistencias así como el dato de corriente insertada se tiene:

Relación de corrientes

$$\frac{I_{20000\,A}}{I_{1000\,A}} = \frac{20\ 000\ (A)}{1\ 000\ (A)} = 20$$

Relación de resistencias

$$\frac{R_{20000\,A}}{R_{P\,1000\,A}} = \frac{1,96263\,(\Omega)}{1,96263\,(\Omega)} = 1$$

Relación de GPR

$$\frac{GPR_{20000\,A}}{GPR_{P\,1000\,A}} = \frac{39253,855\,(V)}{1962,693\,(V)} = 20$$

Relación de potencial de punto

$$\frac{V_{PT\ 20000\ A}}{V_{PT\ 1000\ A}} = \frac{33102,219\ (V)}{1655,111\ (V)} = 20$$

Relación de potencial de toque

$$\frac{V_{T \, 20000 \, A}}{V_{T \, 1000 \, A}} = \frac{6151,637 \, (V)}{307,582 \, (V)} = 20$$

Relación de potencial de paso

$$\frac{V_{P \, 20000 \, A}}{V_{P \, 1000 \, A}} = \frac{4028,460 \, (V)}{201,423 \, (V)} = 20$$

De las relaciones anteriores se concluye la corriente es directamente proporcional al valor del potenciales mas no a al valor de resistencia de malla.

De lo explicación anterior se obtiene las ecuaciones desde la ecuación [3.17] hasta la ecuación [3.21] que se mencionó el capítulo 3.

$$R_f = R_o ag{3.17}$$

$$GPR_f = \frac{I_f}{I_o}GPR_o ag{3.18}$$

$$VPt_f = \frac{I_f}{I_o} VPt_o ag{3.19}$$

$$VT_f = \frac{I_f}{I_o}VT_o ag{3.20}$$

$$VP_f = \frac{I_f}{I_o} VP_o ag{3.21}$$

A.3 ANÁLISIS DE PROPORCIONALIDAD DE LA PUESTA A TIERRA

A.3.1 ANÁLISIS DEL DIÁMETRO DEL CONDUCTOR EMPLEADO PARA LA PUESTA A TIERRA

En esta parte del análisis se toma como referencia similares características del electrodo que en los casos anteriores así como también se mantienen los parámetros de corriente de falla, resistividad, y las coordenadas para los puntos de que se emplearan para el cálculo de potenciales, y se modifica el diámetro del conductor empleado, así se obtiene la Tabla A. 3

Tabla A. 3. Modificando el valor del diámetro del conductor

Calibre AWG ó MCM	Diámetro del conductor (mm)	Resistividad promedio del suelo (Ω m)	Corriente de falla (A)	Resistencia (Ω)	Potencial GPR (V)	Potencial de punto (V)	Potencial de toque (V)	Potencial de paso (V)
14	1,63	100,00	1000,00	2,05	2049,04	1632,73	416,31	207,51
12	2,05	100,00	1000,00	2,04	2040,26	1634,87	405,39	207,04
10	2,59	100,00	1000,00	2,03	2031,23	1637,11	394,12	206,52
8	3,26	100,00	1000,00	2,02	2022,24	1639,37	382,88	205,98
6	4,12	100,00	1000,00	2,01	2013,00	1641,73	371,27	205,39
14	1,86	100,00	1000,00	2,04	2044,00	1633,96	410,04	207,24
12	2,34	100,00	1000,00	2,04	2035,16	1636,13	399,03	206,75
10	2,94	100,00	1000,00	2,03	2026,29	1638,35	387,94	206,23
8	3,69	100,00	1000,00	2,02	2017,37	1640,61	376,76	205,67
6	4,65	100,00	1000,00	2,01	2008,19	1642,98	365,21	205,06
4	5,88	100,00	1000,00	2,00	1998,75	1645,44	353,31	204,40
2	7,41	100,00	1000,00	1,99	1989,33	1647,94	341,40	203,69
1	8,34	100,00	1000,00	1,98	1984,47	1649,23	335,23	203,31
1/0	9,36	100,00	1000,00	1,98	1979,68	1650,52	329,17	202,92
2/0	10,5	100,00	1000,00	1,97	1974,88	1651,81	323,07	202,52
1/0	9,45	100,00	1000,00	1,98	1979,29	1650,62	328,66	202,89
2/0	10,6	100,00	1000,00	1,97	1974,48	1651,92	322,57	202,48
3/0	11,95	100,00	1000,00	1,97	1969,43	1653,28	316,15	202,04
4/0	13,4	100,00	1000,00	1,96	1964,57	1654,60	309,96	201,60
250	14,63	100,00	1000,00	1,96	1960,80	1655,62	305,18	201,24
300	16,03	100,00	1000,00	1,96	1956,86	1656,70	300,17	200,86
350	17,29	100,00	1000,00	1,95	1953,58	1657,59	295,99	200,54
400	18,48	100,00	1000,00	1,95	1950,67	1658,38	292,29	200,24
500	20,65	100,00	1000,00	1,95	1945,78	1659,72	286,07	199,74
600	22,61	100,00	1000,00	1,94	1941,76	1660,81	280,95	199,30
650	23,59	100,00	1000,00	1,94	1939,86	1661,33	278,53	199,09
700	24,43	100,00	1000,00	1,94	1938,29	1661,75	276,54	198,92

^{*}El Autor

En este análisis no se encuentra una relación directa de este parámetro, por lo que no se detalla la relación matemática.

A.3.1 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA

Análogo a los estudios anteriores se mantiene n los parámetros establecidos, esta vez se modifica la longitud de un electrodo empleado que para esta configuración

será un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno con jabalinas en los vértices, y se obtiene los resultados que se visualiza en la tabla

Tabla A. 4. Modificando la longitud de los lados del electrodo

Dimensión (m²)	Corriente de falla (A)	Resistencia (Ω)	Potencial GPR (V)	Potencial de punto (V)	Potencial de toque (V)	Potencial de paso (V)
4 X 4	1000,00	8,85	8848,72	6576,14	2272,58	161,41
6 X 6	1000,00	6,51	6513,76	4953,47	1560,28	1062,63
8 X 8	1000,00	5,11	5108,53	3939,72	1168,81	788,98
10 X 10	1000,00	4,18	4184,26	3254,85	929,42	587,92
12 X 12	1000,00	3,54	3535,14	2764,26	770,88	479,79
14 X 14	1000,00	3,06	3056,24	2396,74	659,51	385,03
16 X 16	1000,00	2,69	2689,30	2111,58	577,72	331,17
18 X 18	1000,00	2,40	2399,62	1884,05	515,57	277,64
20 X 20	1000,00	2,17	2165,37	1698,31	467,06	247,04
22 X 22	1000,00	1,97	1972,18	1543,79	428,39	213,06
24 X 24	1000,00	1,81	1810,20	1413,15	397,05	194,18
26 X 26	1000,00	1,67	1672,49	1301,18	371,31	170,78
28 X 28	1000,00	1,55	1554,01	1204,06	349,95	158,50
30 X 30	1000,00	1,45	1451,01	1118,91	332,09	141,38
32 X 32	1000,00	1,36	1360,66	1043,57	317,09	133,12
34 X 34	1000,00	1,28	1280,77	976,32	304,45	120,00
36 X 36	1000,00	1,21	1209,63	915,82	293,81	114,36
38 X 38	1000,00	1,15	1145,88	860,99	284,89	103,92
40 X 40	1000,00	1,09	1088,43	810,97	277,46	100,09

^{*}El Autor

Si se relaciona los resultados obtenidos se puede observar que no tiene una proporción directa entre estos parámetros por lo que no se puede encontrar una relación matemática de dependencia, pero si influye en el cabio de los parámetros.

APÉNDICE B

Configuración de electrodos

El análisis, en todos los capítulos del proyecto se basa en cinco tipos de configuraciones de electrodos:

- Electrodos con perímetro definido sin jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro definido con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro definido con reticulado interno y sin jabalinas.
- Electrodos con perímetro definido con reticulado interno y con jabalinas en los vértices.
- Electrodos con perímetro definido con reticulado interno y con jabalinas en las uniones perimetrales.

Los perímetros definidos corresponden a cualquier figura geométrica, pero en este proyecto se 5 tipos de perímetros que son: cuadrado, rectangular, en forma de L, en forma de T, y en forma de C, pese a que no son los únicos, se toman como referencia para aclarar cada tipo de configuración porque son los perímetros en los cuales se centra el análisis.

b.1 ELECTRODOS CON PERÍMETRO DEFINIDO SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Este tipo de configuración puede estar definida con cualquiera de los cinco tipos de perímetros. Es básica en el presente conjunto de electrodos porque únicamente posee un conductor externo alrededor del perímetro, que se representa con el color café desde la Figura b. 1. Modelo de hasta la Figura b. 5.

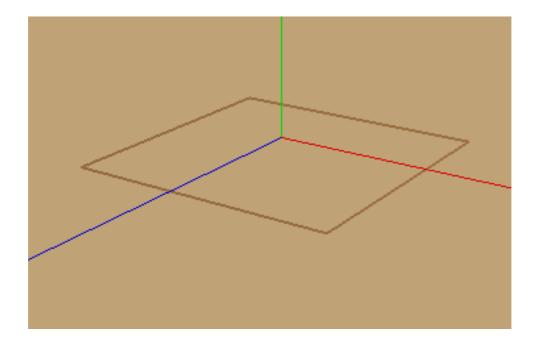


Figura b. 1. Modelo de electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices

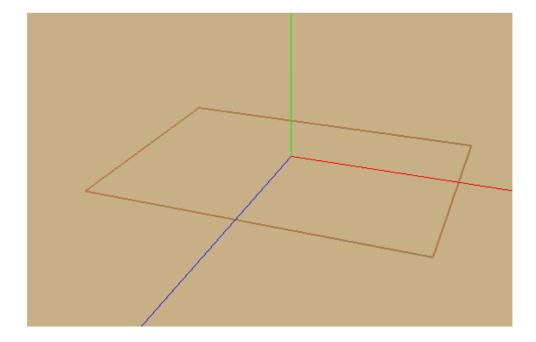


Figura b. 2. Modelo de un electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices

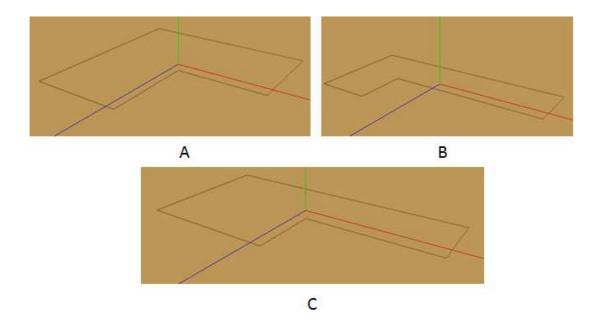


Figura b. 3. Modelo de un electrodo con perímetro el "L" sin jabalinas en los vértices a) Caso 1, b) caso 2, c) caso 3

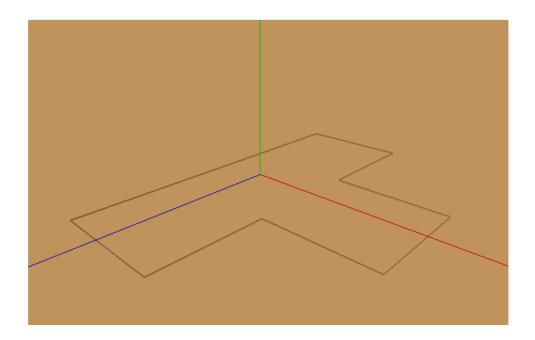


Figura b. 4. Modelo de un electrodo con perímetro el "T" sin jabalinas en los vértices

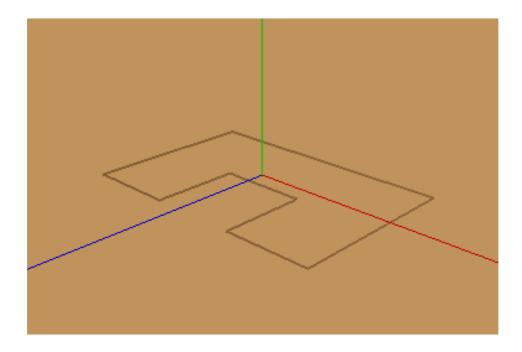


Figura b. 5. Modelo de un electrodo con perímetro el "C" sin jabalinas en los vértices

En la Figura b. 1 se muestra la configuración de electrodos con perímetro cuadrado. Este tipo de mallas se modificará en la longitud del conductor externo (lado perimetral del electrodo) en pasos de 2 metros, iniciando en un electrodo de 2 X 2 m hasta llegar a un electrodo de 40 x 40 m.

El tipo de electrodos con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices se visualiza en la Figura b. 2 y para el estudio de esta configuración se modificará la longitud del conductor externo (lado perimetral de la malla) en pasos de 2 metros el lado pequeño, iniciando en una malla de 2 X (2r) m hasta llegar a una malla máximo de (40/r) x 40 m.; en donde r es la relación entre el lado más largo y el lado más angosto.

Para el análisis de los electrodos con perímetro en "L" sin jabalinas en los vértices todos los electrodos dependerán del valor del ancho uno (lado b) que se otorgue; por consiguiente, para el análisis de este tipo de configuración se modificará la magnitud del ancho uno en pasos de 1 m para cada uno de los tres casos iniciando en un valor de "b" igual a 2 m, con lo que se empezará con electrodos de AX2X4 m, BX2X8 m, CX2X8 m hasta llegar a electrodos en cuya dimensión del lado mayor sea al menos de 40m es decir se llagará a electrodos de AX20X40

m, BX10X40 m y CX10X40 m. El tipo de estas configuraciones se muestran en la Figura b. 3, donde constan los tres tipos de caso de estudio que se menciona en el capítulo 5.

La Figura b. 4 se observa el modelo para el análisis del Capítulo seis que estudia electrodos tipo "T" en los cuales se inicia con electrodos Tx2x6 modificando en pasos de 2 m el valor del ancho hasta llegar a electrodos de Tx14x42.

Finalmente los esquemas que se muestran en el estudio que se realiza en el Capítulo siete se muestra en la Figura b. 5, para el análisis se inicia con electrodos de CX2X6 modificando el lado de referencia en pasos de 2 m hasta llegar a electrodos de CX14X42.

b.2 ELECTRODOS CON PERÍMETRO DEFINIDO CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Este tipo de configuración, a más del conductor externo posee jabalinas en los vértices que se encuentran ubicadas perpendiculares al conductor externo que se usará como electrodo. El esquema de este tipo de configuración se muestra para los tres casos en estudio que se visualiza desde la Figura b. 6 hasta la Figura b. 10.

Para el análisis de este tipo de configuración se especifican dos longitudes de jabalinas, las primeras jabalinas de 1,80 m de longitud y el otro grupo contempla jabalinas de 2,40 m.

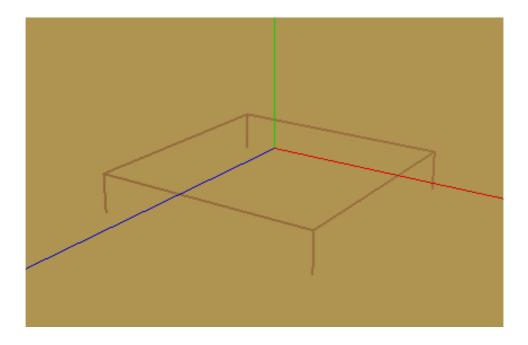


Figura b. 6. Modelo de electrodo con perímetro cuadrado con jabalinas en los vértices

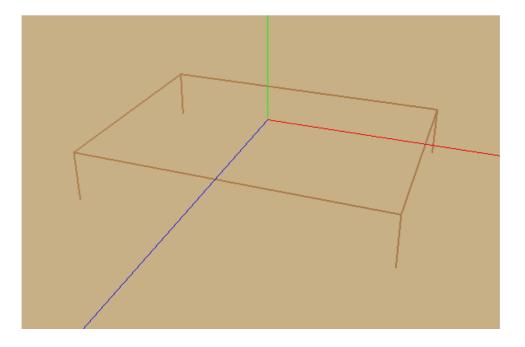


Figura b. 7. Modelo de electrodo con perímetro rectangular con jabalinas en los vértices

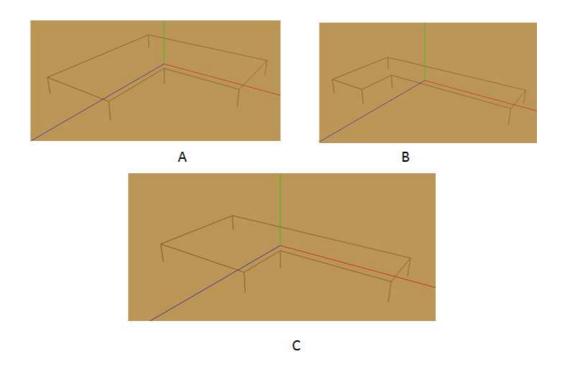


Figura b. 8. Modelo de un electrodo con perímetro en L con jabalinas en los vértices. A) AX8X16, B) BX4X16 y C) CX5X20

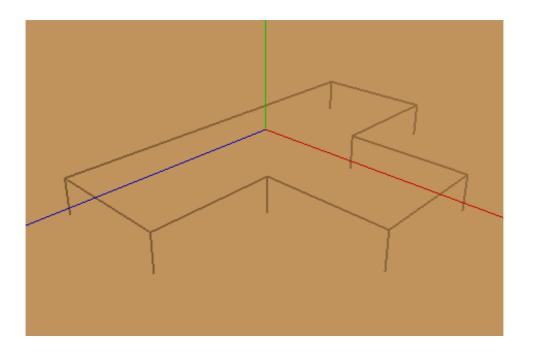


Figura b. 9. Modelo de un electrodo con perímetro en T con jabalinas en los vértices

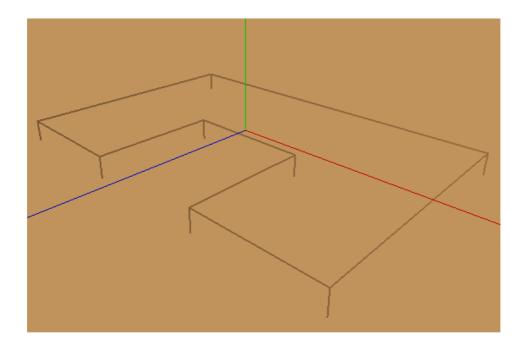


Figura b. 10. Modelo de un electrodo con perímetro en C con jabalinas en los vértices

b.3 ELECTRODOS CON PERÍMETRO DEFINIDO CON RETICULADO INTERNO Y SIN JABALINAS EN LOS VÉRTICES

Esta configuración, a más del conductor de la periferia posee conductor interno, formando cuadrículas de lado definido (2 m de lado en el estudio), pero carecen de jabalinas en los vértices. Los modelos para cada perímetro se muestra en desde la Figura b. 11 hasta la Figura b. 15.

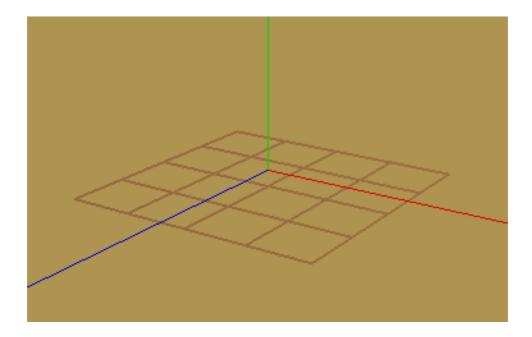


Figura b. 11. Modelo de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno sin jabalinas en los vértices

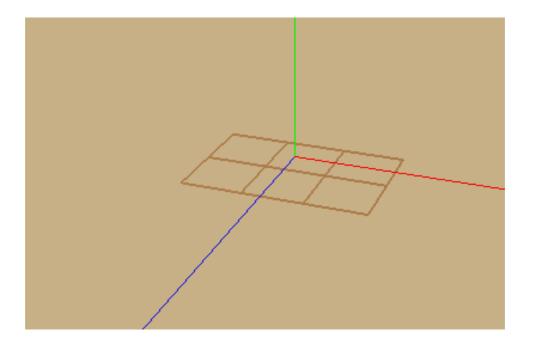


Figura b. 12. Modelo de un electrodo con perímetro rectangular con reticulado interno sin jabalinas en los vértices

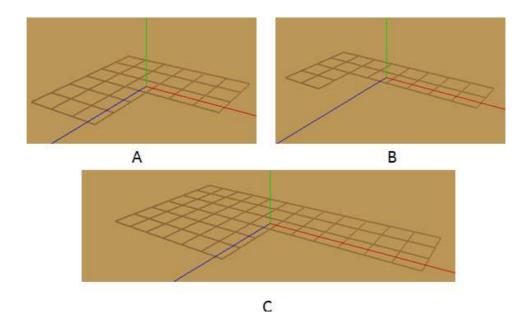


Figura b. 13. Modelo de un electrodo con perímetro en L con reticulado interno sin jabalinas en los vértices. A) AX6X12, B) BX4X16 y C) CX6X24

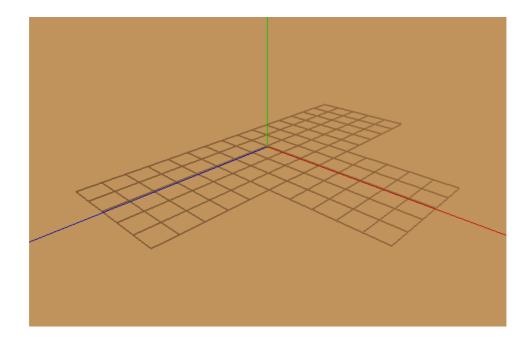


Figura b. 14. Modelo de un electrodo con perímetro en "T" con reticulado interno sin jabalinas en los vértices

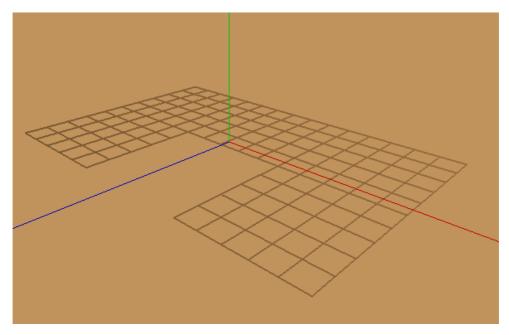


Figura b. 15. Modelo de un electrodo con perímetro en "C" con reticulado interno sin jabalinas en los vértices

b.4 ELECTRODOS CON PERÍMETRO DEFINIDO CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LOS VÉRTICES

La característica de este esquema de electrodos es que a más del conductor alrededor del perímetro y del conductor interno, posee jabalinas perpendiculares al plano formado por el conductor perimetral, pero hacia el interior del suelo. Claramente esto se puede visualizar en las figuras comprendidas entre la Figura b. 16 hasta Figura b. 20.

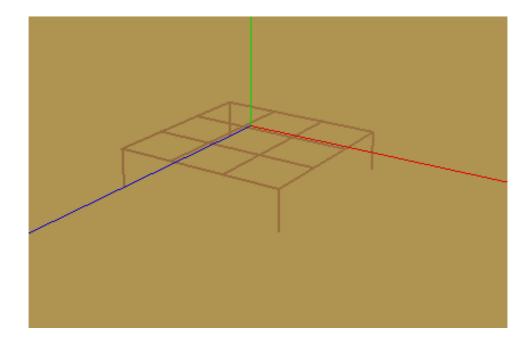


Figura b. 16. Modelo de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno con jabalinas en los vértices

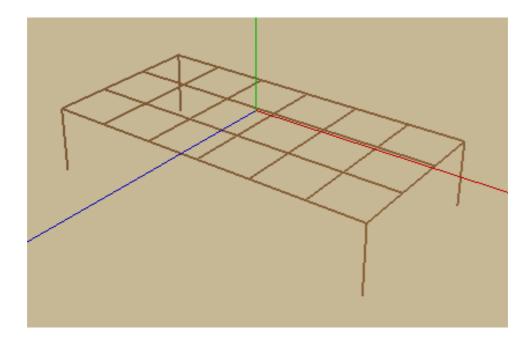


Figura b. 17. Modelo de un electrodo con rectangular cuadrado con reticulado interno con jabalinas en los vértices

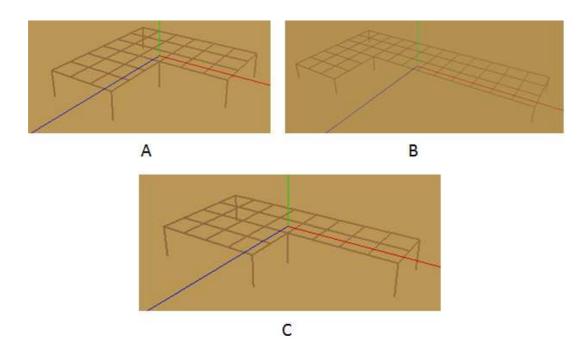


Figura b. 18. Modelo de un electrodo con perímetro en L con reticulado interno con jabalinas en los vértices. A) AX6X12, B) BX6X24 y C) CX4X16

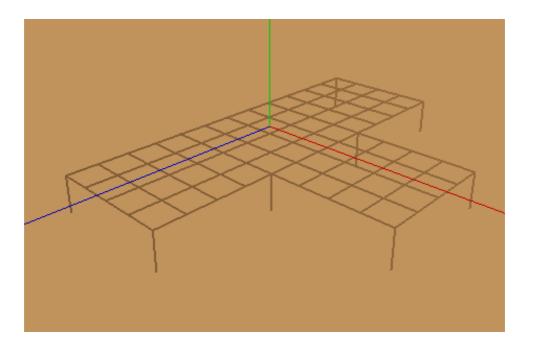


Figura b. 19. Modelo de un electrodo con perímetro en T con reticulado interno con jabalinas en los vértices

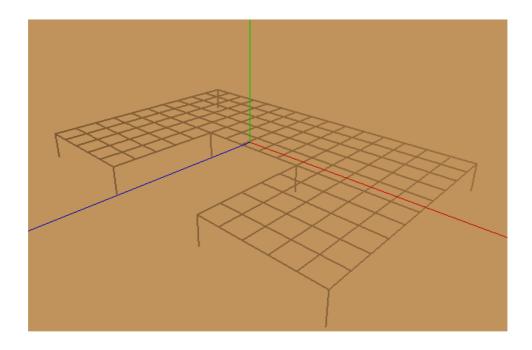


Figura b. 20. Modelo de un electrodo con perímetro en C con reticulado interno con jabalinas en los vértices

Para el análisis de este tipo de electrodos se tendrá cuenta la longitud de la jabalina a ser empleada en el vértice del electrodo, esta puede ser de 1,80 m de longitud o 2,40 m.

b.5 ELECTRODOS CON PERÍMETRO DEFINIDO CON RETICULADO INTERNO Y CON JABALINAS EN LAS UNIONES PERIMETRALES

En este tipo de esquemas a más de todos los elementos que contempla la configuración anterior posee las jabalinas no solo en los vértices sino también en todas las uniones perimetrales, así se visualiza en la figuras entre Figura b. 21 la hasta Figura b. 25.

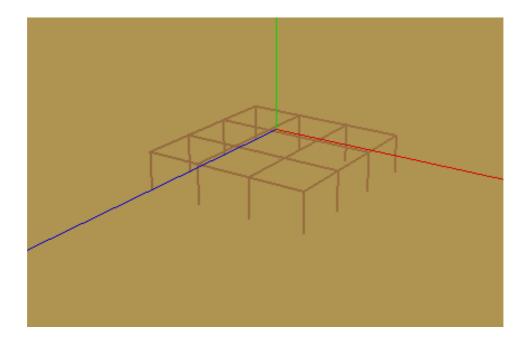


Figura b. 21. Modelo de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales

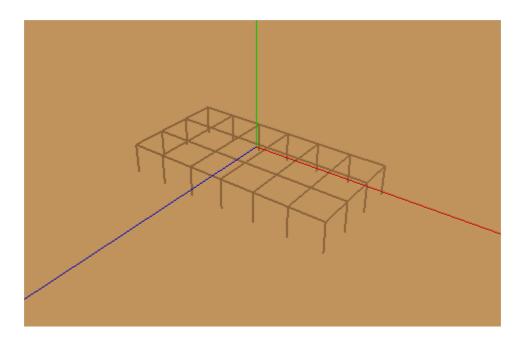


Figura b. 22. Modelo de un electrodo con perímetro rectangular con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales

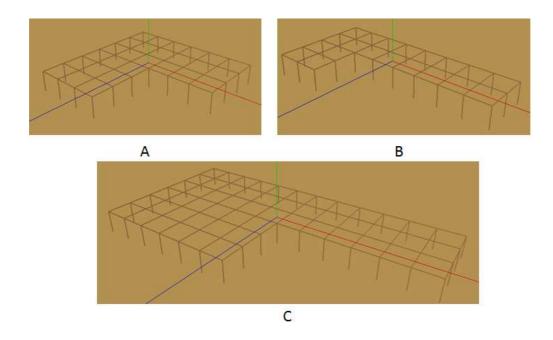


Figura b. 23. Modelo de un electrodo con perímetro en L con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales. A) AX6X12, B) BX4X16 y C) CX6X24

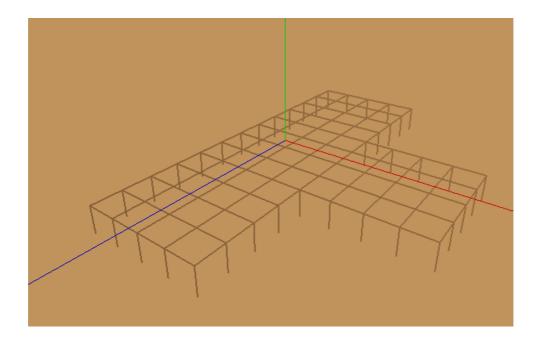


Figura b. 24. Modelo de un electrodo con perímetro en "T" con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales

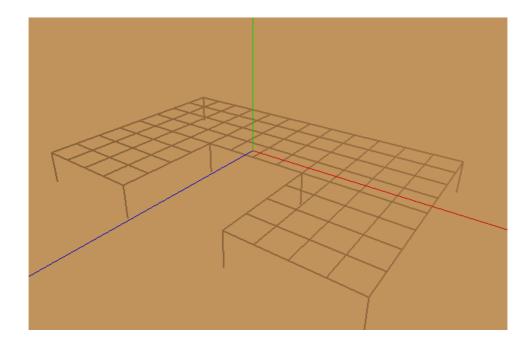


Figura b. 25. Modelo de un electrodo con perímetro en "C" con reticulado interno con jabalinas en las uniones perimetrales

APÉNDICE C

Procedimiento para encontrar los valores de potenciales máximos y mínimos

- **Paso 1.** Disponer del programa informático GNDSTUDIO V1.0; porque el estudio se basa en la simulación de un modelo determinado. Si no se dispone de este software, no se puede continuar el procedimiento.
- **Paso 2.** Definir y seleccionar un tipo de configuración de malla para encontrar los potenciales máximos y mínimos.
- Paso 3. Crear un archivo de Excel con las coordenadas para determinar la configuración seleccionada. Se sugiere revisar las especificaciones del Capítulo 2 para evitar errores de compatibilidad con el programa GNDSTUDIO V1.0
- **Paso 4.** Cargar la configuración en el programa GNDSTUDIO V1.0. Analizar los valores en el software y obtener la gráfica de los potenciales que se que se generan en la superficie del suelo.
- **Paso 5.** Visualizar la ubicación de los puntos donde se producen picos y compararlos. En caso de no obtener la información de los picos, se debe correr los puntos a lo largo de todo el perímetro del electrodo y dentro del mismo para encontrar los puntos.
- **Paso 6.** Aumentar la dimensión del electrodo y repetir el procedimiento con el propósito de relacionar los potenciales generados para cada longitud de lado de la configuración.

Ejemplo: encontrar los valores de potenciales máximos y mínimos para un electrodo con perímetro forma de cuadrado sin reticulado interno y sin jabalinas de 4 m de lado.

Paso 2. Definir y seleccionar un tipo de configuración de malla para encontrar los potenciales máximos y mínimos.

Se selecciona el tipo de configuración de electrodos con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices. La forma gráfica de la configuración se muestra en Figura C. 1.

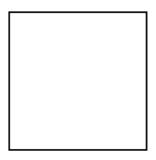


Figura C. 1. Configuración básica de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices.

Paso 3. Crear un archivo de Excel con las coordenadas para determinar la configuración seleccionada. Se sugiere revisar las especificaciones del Capítulo 2 para evitar errores de compatibilidad con el programa GNDSTUDIO V1.0

Considerando que se eligió una configuración de electrodos con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices, para el ejemplo específico de 4m de lado los puntos de coordenadas se encuentran en la Figura C. 2.

Al tener clara la configuración, se procede a crear el archivo Excel en el que se muestra cada uno de los lados como se observa en la Figura C. 3. En las tres primeras columnas se ubica los parámetros iniciales (x,y,z respectivamente) y en los tres columnas siguientes se coloca los puntos finales (x,y,z respectivamente).

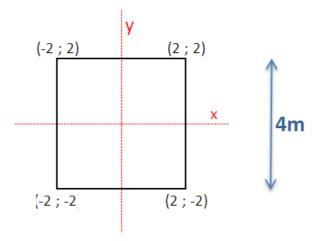


Figura C. 2. Configuración básica de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4m de lado con los puntos en el plano cartesiano en los vértices

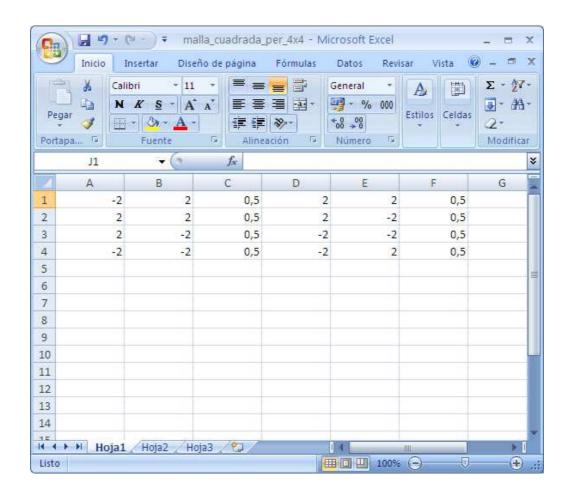


Figura C. 3. Puntos de coordenadas en Excel para una configuración un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4 m de lado

Paso 4. Cargar la configuración en el programa GNDSTUDIO V1.0. Analizar los valores en el software y obtener la gráfica de los potenciales que se generan en la superficie del suelo.

Se procede a cargar la malla que se visualiza en la Figura C. 4. Se muestra la configuración que se tomó como referencia. Posteriormente se ingresan los datos adecuados (tipo de suelo, corriente de cortocircuito); se calcula y grafica los potenciales generados sobre la superficie del suelo y se obtiene la Figura C. 5.

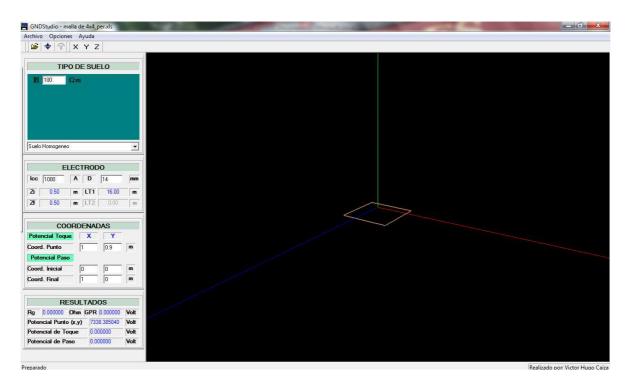


Figura C. 4. Vista del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4m de lado en el software GNDSTUDIO V1.0

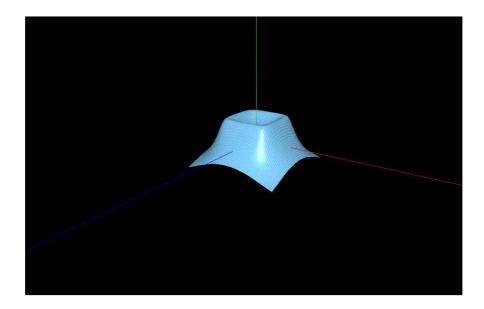


Figura C. 5. Vista de los potenciales de punto generados sobre del suelo del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4m de lado en el software GNDSTUDIO V1.0

Paso 5. Visualizar la ubicación de los puntos donde se producen picos y compararlos. En caso de no obtener la información de los picos, se debe correr los puntos a lo largo de todo el perímetro del electrodo y dentro del mismo para encontrar los puntos.

En la Figura C. 5, se observa claramente donde se genera el potencial de punto más bajo, que a su vez es el lugar donde se genera el potencial más alto de toque; sin embargo, no se visualiza con claridad el lugar donde se genera el potencial más alto de punto, por lo que con la ayuda del programa se realiza los cortes respectivos para observar este sitio con claridad, así se tiene la Figura C. 6.

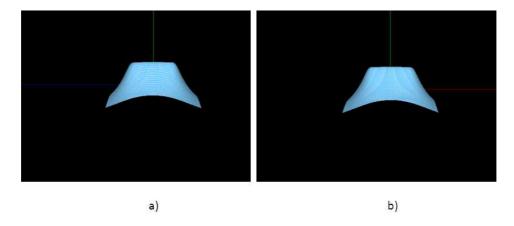


Figura C. 6. Vista de cortes perpendicular al plano a) yz b) xz de los potenciales de punto generados sobre la superficie de un electrodo con perímetro cuadrado de 4 m. de lado

Se observa una ligera variación en nueve puntos y existen varios picos en los que se encuentran los valores máximos y mínimos, por esta razón están los potenciales en estos puntos para compararlos, así se obtienen los potenciales que se muestran en la tabla.

Tabla C. 1. Potenciales generados en puntos críticos de la malla

Punto	Corriente (A)	Resistencia (Ω)	GPR (V)	Potencial de punto (V)	Potencial de toque (V)
(2;2)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 266,17	4 123,74
(2;-2)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 266,17	4 123,74
(-2;-2)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 266,17	4 123,74
(-2;2)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 266,17	4 123,74
(-2;0)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 936,01	3 453,90
(2;0)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 936,01	3 453,90
(0;-2)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 936,01	3 453,90
(0;2)	1 000,00	11,39	11 389,91	7 936,01	3 453,90
(0;0)	1 000,00	11,39	11 389,91	6 844,48	4 545,43

^{*} El Autor

Se observa que los resultados obtenidos no cambian linealmente en estos nueve puntos y en todos los centros de los lados tienen un valor similar, además el mismo valor se tiene en los puntos de las esquinas esto se debe a la uniformidad existente en la configuración. Se realiza un análisis minucioso tomando como

referencia uno de los cuatro lados de la malla, variando el punto de referencia el lado paralelo al eje X con un valor fijo de Y=2. X se modificará desde -2 hasta el 2 con variación en pasos de 0,2m. Así se obtiene la Tabla C. 2. Con esos datos se obtiene la Figura C. 7 en la que se observa el comportamiento de los potenciales sobre uno de los lados del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4m de largo.

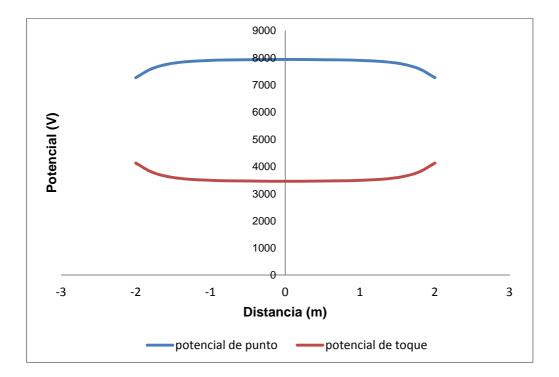


Figura C. 7. Potenciales sobre uno de los lados del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 4m de largo

En la Tabla C. 2 se puede ver que el potencial más alto se genera en el centro de los lados perimetrales del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices.

Paso 6. Aumentar la dimensión del electrodo y repetir el procedimiento con el propósito de relacionar los potenciales generados para cada longitud de lado de la configuración. Se modifica la relación del lado del cuadrado desde lados de 2m en pasos de un metro en aumento hasta un lado de 40m y realizando en cada uno

de estos los pasos del uno al cuatro, con lo que se obtiene la TABLA C2; la tabla de resultados finales y luego con estos datos se obtiene la Figura C. 8.

Tabla C. 2. Potenciales generados en un lado del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices de 2 m de lado.

Punto	Corriente	Resistencia	GPR	Potencial de punto	Potencial de toque
-2,00	1 000,00	11,39	11 389,91	7 266,17	4 123,74
-1,80	1 000,00	11,39	11 389,91	7 580,00	3 809,92
-1,60	1 000,00	11,39	11 389,91	7 748,60	3 641,31
-1,40	1 000,00	11,39	11 389,91	7 833,02	3 556,90
-1,20	1 000,00	11,39	11 389,91	7 877,19	3 512,72
-1,00	1 000,00	11,39	11 389,91	7 902,09	3 487,82
-0,80	1 000,00	11,39	11 389,91	7 917,03	3 472,89
-0,60	1 000,00	11,39	11 389,91	7 926,29	3 463,62
-0,40	1 000,00	11,39	11 389,91	7 931,95	3 457,96
-0,20	1 000,00	11,39	11 389,91	7 935,03	3 454,88
0,00	1 000,00	11,39	11 389,91	7 936,01	3 453,90
0,20	1000,00	11,39	11389,91	7935,03	3 454,88
0,40	1 000,00	11,39	11 389,91	7 931,95	3 457,96
0,60	1 000,00	11,39	11 389,91	7 926,29	3 463,62
0,80	1 000,00	11,39	11 389,91	7 917,03	3 472,89
1,00	1 000,00	11,39	11 389,91	7 902,09	3 487,82
1,20	1 000,00	11,39	11 389,91	7 877,19	3 512,72
1,40	1 000,00	11,39	11 389,91	7 833,02	3 556,90
1,60	1 000,00	11,39	11 389,91	7 748,60	3 641,31
1,80	1 000,00	11,39	11 389,91	7 580,00	3 809,92
2,00	1 000,00	11,39	11 389,91	7 266,17	4 123,74

^{*} El Autor

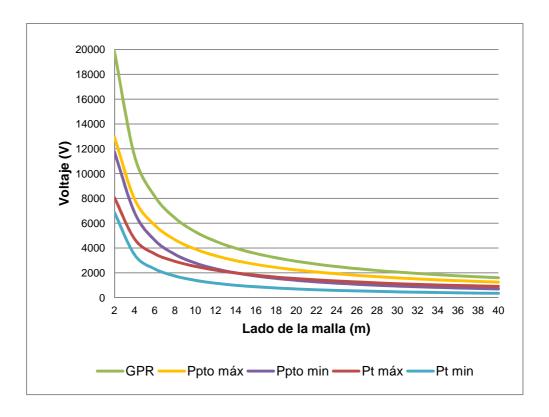


Figura C. 8. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices para varias longitudes de lado.

Tabla C. 3. Potenciales máximos y mínimos generados sobre la superficie de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices para varias longitudes de lado y sus ubicaciones.

Malla	Resistencia	GPR	Voltaje de punto min	Ubicación del vpt min	Voltaje de punto max	Ubicación del vpt max	Voltaje de toque min	Ubicación del vpt min	Voltaje de toque max	ubicación del vt max
2 X 2	19,83	19828,61	11756,84	Esquina	12957,08	Lado centro	6871,52	Centro de malla	8071,77	Esquina
4 X 4	11,39	11389,91	6844,48	Centro de malla	7936,01	Lado centro	3453,90	Lado centro	4723,74	Centro de malla
6 X 6	8,16	8157,39	4624,62	Centro de malla	5839,46	Lado centro	2317,94	Lado centro	3532,77	Centro de malla
8 X 8	6,41	6414,77	3485,11	Centro de malla	4668,73	Lado centro	1746,04	Lado centro	2929,66	Centro de malla
10 X 10	5,31	5314,63	2794,32	Centro de malla	3913,67	Lado centro	1400,96	Lado centro	2520,32	Centro de malla
12 X 12	4,55	4552,74	2331,43	Centro de malla	3382,81	Lado centro	1169,93	Lado centro	2221,31	Centro de malla
14 X 14	3,99	3991,81	1999,84	Centro de malla	2987,43	Lado centro	1004,38	Lado centro	1991,97	Centro de malla
16 X 16	3,56	3560,47	1750,70	Centro de malla	2680,57	Lado centro	879,91	Lado centro	1809,78	Centro de malla
18 X 18	3,22	3217,79	1556,68	Centro de malla	2434,89	Lado centro	782,90	Lado centro	1661,10	Centro de malla
20 X 20	2,94	2938,55	1401,35	Centro de malla	2233,38	Lado centro	705,17	Lado centro	1537,20	Centro de malla
22 X 22	2,71	2706,34	1274,17	Centro de malla	2064,86	Lado centro	641,48	Lado centro	1432,17	Centro de malla
24 X 24	2,51	2510,02	1168,15	Centro de malla	1921,67	Lado centro	588,35	Lado centro	1341,88	Centro de malla
26 X 26	2,34	2341,72	1078,40	Centro de malla	1798,36	Lado centro	543,35	Lado centro	1263,32	Centro de malla
28 X 28	2,20	2195,73	1001,45	Centro de malla	1690,99	Lado centro	504,75	Lado centro	1194,28	Centro de malla
30 X 30	2,07	2067,83	934,75	Centro de malla	1596,57	Lado centro	471,27	Lado centro	1133,08	Centro de malla
32 X 32	1,95	1954,79	876,38	Centro de malla	1512,84	Esquina	441,95	Lado centro	1078,41	Centro de malla
34 X 34	1,85	1854,11	824,86	Centro de malla	1438,04	Esquina	416,07	Lado centro	1029,25	Centro de malla
36 X 36	1,76	1763,85	779,06	Centro de malla	1370,79	Esquina	393,05	Lado centro	984,78	Centro de malla
38 X 38	1,68	1682,42	738,08	Centro de malla	1309,97	Esquina	372,45	Lado centro	944,34	Centro de malla
40 X 40	1,61	1608,58	701,20	Centro de malla	1254,68	Esquina	353,90	Lado centro	907,38	Centro de malla

^{*} El Autor

APÉNDICE D

Análisis del potencial de paso en electrodos con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices manteniendo el origen del paso

Para este análisis se tiene como base un electrodo con perímetro cuadrado de 2m de lado y se toma como referencia 3 puntos en los cuales se generan los puntos críticos que son:

- Una de las cuatro esquinas (-1,-1)
- El centro de la malla (0,0)
- El centro de uno de los cuatro lados (1,0)

En la siguiente figura se muestra gráficamente los puntos de la malla en donde se realiza el estudio.

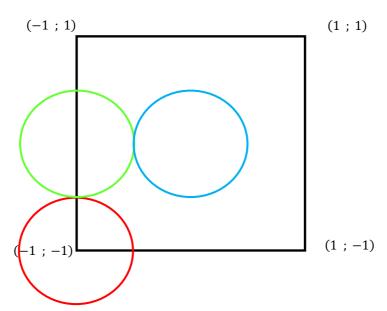


Figura D. 1. Electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vertices de 2X2 m con coordenadas

6.6.1.1.1 Análisis en una esquina

Para el estudio se toma como referencia una de las cuatro esquinas: (-1,-1) la cual en el Figura D. 1, se encuentra señalada de color rojo la trayectoria del análisis a realizarse.

Aplicando el criterio expuesto en el subcapítulo 3.2.2.1, se encuentra los datos de los puntos finales de los cuales se tabula para realizar el gráfico del comportamiento de los voltajes de paso, el gráfico y la tabulación de datos se expone a continuación.

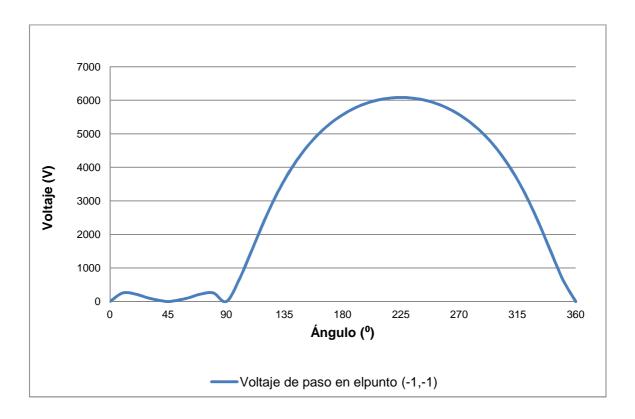


Figura D. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de los vértices del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices modificando la dirección del punto final

De los resultados obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde una de las esquinas en dirección a la bisectriz del ángulo mayor formado por los lados de las caras de la malla que forman el vértice. Además el voltaje de paso más seguro es al dar un paso en

dirección paralela a los lados del electrodo que forman el vértice así como también a la bisectriz del ángulo menor formado por los lados que corresponden al punto en estudio.

6.6.1.1.2 Análisis en el centro de la malla

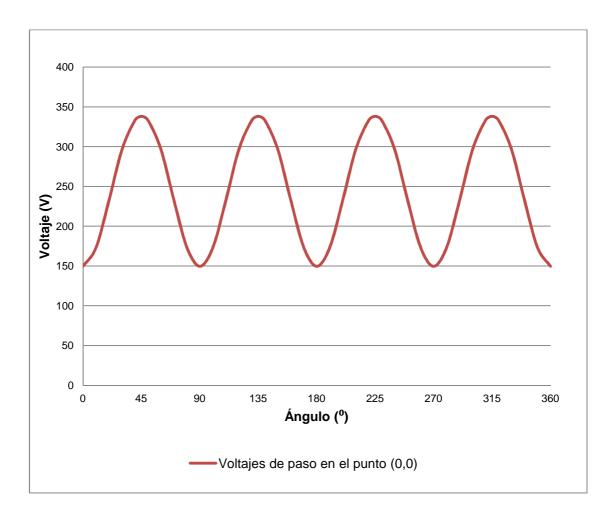


Figura D. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el centro del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices modificando la dirección del punto final

El centro del electrodo (graficado con color celeste en la trayectoria de estudio en la Figura D. 1) es el lugar más inestable para dar un paso, los voltajes de paso más peligrosos que pueden existir al dar un paso cuando se encuentra en el centro de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices es dar un paso en dirección a uno de los vértices de este electrodo. Mientras que el

voltaje de paso menos peligroso es cuando se puede dar un paso en dirección al centro de los lados de la malla.

6.6.1.1.3 Análisis en el centro de uno de los cuatro lados

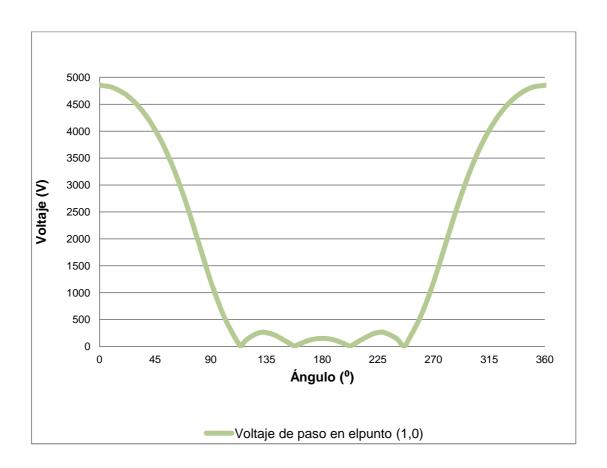


Figura D. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el centro de uno de los lados del electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices modificando la dirección del punto final

Los voltajes de paso más peligrosos que pueden existir al dar un paso cuando se encuentra en el centro de uno de los lados de un electrodo con perímetro cuadrado sin jabalinas en los vértices, es en dirección perpendicular al lado del electrodo de referencia y hacia afuera de la misma. Mientras que el voltaje de paso más seguro es cuando se da un paso en dirección paralela al lado (y sobre el conductor) en el que se encuentre el punto en estudio.

APÉNDICE E

Relaciones entre electrodos con cuadrícula

Tabla e. 1. Característica de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno, y la simetría existente

MODELO COMPLETO	MODELO CON SIMETRÍA
1 1 1 1	1
1 2 1 2 3 2 1 2 1	1 2 3
1 2 2 1 2 3 3 2 2 3 3 2 1 2 2 1	1 2 3
1 2 3 2 1 2 4 5 4 2 3 5 6 5 3 2 4 5 4 2 1 2 3 2 1	1 2 4 3 5 6
1 2 3 3 2 1 2 4 5 5 4 2 3 5 6 6 5 3 3 5 6 6 5 3 2 4 5 5 4 2 1 2 3 3 2 1	1 2 4 3 5 6

Tabla e. 1. Continuación

MOI	DELO COMPLETO	MODELO CON SIMETRÍA
1 2	3 7 3 2 1	
2 4	5 8 5 4 2	1
3 5	6 9 6 5 3	2 4
7 8	9 10 9 8 7	3 5 6
	6 9 6 5 3	7 8 9 10
2 4	5 8 5 4 2	
1 2	3 7 3 2 1	
1 2 3	7 7 3 2 1	
2 4 5	8 8 5 4 2	
3 5 6	9 9 6 5 3	1
7 8 9 1	10 10 9 8 7	2 4
7 8 9 1	10 10 9 8 7	3 5 6
3 5 6	9 9 6 5 3	7 8 9 10
2 4 5	8 8 5 4 2	
1 2 3	7 7 3 2 1	
1 2 3	7 11 7 3 2 1	
2 4 5	8 12 8 5 4 2	
3 5 6	9 13 9 6 5 3	1
	10 14 10 9 8 7	2 4
11 12 13 1	14 15 14 13 12 11	3 5 6
	10 14 10 9 8 7	7 8 9 10
3 5 6	9 13 9 6 5 3	11 12 13 14 15
2 4 5	8 12 8 5 4 2	12 10 11 10
1 2 3	7 11 7 3 2 1	
1 2 3	7 11 11 7 3 2	1
		<mark>■</mark> i i
		3 1
3 5 6	9 13 13 9 6 5	
	10 14 14 10 9 8	2 4
		3 5 6
		7 8 9 10
	10 14 14 10 9 8	7 11 12 13 14 15
3 5 6	9 13 13 9 6 5	3
2 4 5	8 12 12 8 5 4	2
1 2 3	7 11 11 7 3 2	1

Tabla e. 2. Resumen de datos expuestos en la Tabla e.1

DIMENSION	DE	ELECTRODO	CUAD. INT.	CUAD. DIF.	PT. CRIT.	PT. CRIT. DIF
2	Χ	2	1	1	9	3
4	Χ	4	4	1	25	6
6	Χ	6	9	3	49	10
8	Χ	8	16	3	81	14
10	Χ	10	25	6	121	21
12	Χ	12	36	6	169	28
14	Χ	14	49	10	225	34
16	Χ	16	64	10	289	45
18	Χ	18	81	15	361	55
20	Χ	20	100	15	441	66

E.1 RELACIÓN DE CUADRICULAS INTERNAS

Se sabe que el total del área del perímetro cuadrado es

$$A_r = l^2 ag{e.1}$$

El numero de cuadriculas será el valor del área del electrodo dividido para el área de la cuadricula en referencia

$$\#cua = \frac{A_{el}}{A_{cu}} = \frac{l^2}{c^2} = w^2$$

$$\#cua = w^2$$
 [e.2]

Donde:

Ar área del cuadrado

l magnitud de lado del cuadrado

#cua numero de cuadriculas internas

w relación entre el lado del perímetro del electrodo y el lado de la cuadricula en referencia.

n valor del enésimo termino

E.2 RELACIÓN DE CUADRICULAS INTERNAS DIFERENTES

El número de cuadrículas internas diferentes dado por la tabla superior 1,1,3,3,6,6,10,10,15,15, se observa que es un valor repetitivo por lo que la serie se separara en dos de similares características para elementos pares :

De la sucesión anterior se tiene los siguientes datos de la diferencia dos (d) de la diferencia uno (p) y del primer término de la sucesión a_1 .

$$p = 2$$
, $d = 1$, $a_1 = 1$

Se sabe que para encontrar los términos de la sucesión cuadrática se debe los parámetros A, B y C.

$$A = d = 1$$
 [e.3]

$$B = p - d = 2 - 1 = 1$$
 [e.4]

$$c = a_1 - B = 1 - 1 = 0$$
 [e.5]

De lo cual introduciendo estos valores en el modelo de series cuadráticas para obtener el enésimo término se obtiene:

$$a_n = \left(\frac{A}{2}\right)n^2 + \left(B - \frac{A}{2}\right)n + C = \left(\frac{1}{2}\right)n^2 + \left(1 - \frac{1}{2}\right)n + 0$$

$$a_n = \frac{1}{2}n(2n+1)$$
 [e.6]

Si a la relación anterior relacionamos con la magnitud del lado y tomando en cuenta la Tabla e.1 se tiene que hay dos posibilidades, que la mitad del lado sea par o impar, así se obtiene:

$$a_n = \begin{cases} \frac{(l+4) \times l}{32} & \text{si } \frac{l}{2} \text{ es impar} \\ \frac{(l+6) \times (l+2)}{32} & \text{si } \frac{l}{2} \text{ es par} \end{cases}$$
 [e.7]

l magnitud de lado del cuadrado

#cua numero de cuadriculas internas

w relación entre el lado del perímetro del electrodo y el lado de la cuadricula en referencia.

n valor del enésimo termino

E.3 RELACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS

Se observa que el número de puntos críticos viene dado por una serie que sigue el patrón de la ecuación

$$Ptc_T = (a+1)^2$$

$$Ptc_T = (w \times c + 1)^2$$

$$Ptc_T = (w \times c + 1)^2$$
 [e.8]

E.4 RELACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DIFERENTES

Relación de puntos críticos

$$d = 1$$

$$p = 3$$

$$a_1 = 3$$

$$A = d = 1$$
 [e.9]

$$B = p - d = 3 - 1 = 2$$
 [e.10]

$$C = a_1 - B = 3 - 2 = 1$$
 [e.11]

#ptos crit dif =
$$\frac{1}{2}(w+2)(w+1)$$
 [e.12]

Donde

l magnitud de lado del cuadrado

puntos crit dif numero de cuadriculas internas

 w relación entre el lado del perímetro del electrodo y el lado de la cuadricula en referencia.

n valor del enésimo termino

APÉNDICE F

Análisis del potencial de paso en electrodos con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices y manteniendo el origen del paso

Este estudio permite encontrar la dirección hacia donde resulta más peligroso dar el paso, para esto se debe mantener firme uno de los pies (punto inicial A de la figura 3.4) y modificando la dirección hasta donde llega el otro pie (el punto final B de la figura 3.4). Este cambio de dirección se realiza mediante la tabulación en 10° en sentido horario (en algunos casos la variación será menor para encontrar los puntos en los que el voltaje de paso sea cero o donde la tendencia de la curva cambie de sentido es decir encontrar los picos), sabiendo que el módulo de la distancia es 1m. El procedimiento matemático es idéntico al expuesto en el ítem 3.2.2.1.

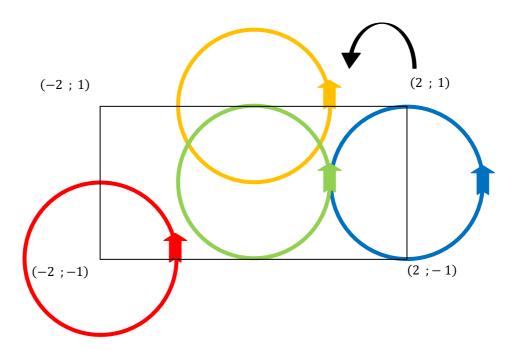


Figura f.1. Electrodo con perímetro rectangular sin electrodos de 4X2 m con coordenadas

Para esta parte del estudio se toma como referencia 4 puntos

- Una de las cuatro esquinas (-2,-1)
- El centro de la malla (0,0)
- El centro de uno de los lados más largos (0,1)
- El centro de uno de los lados más cortos (2,0)

En la Figura 4.7 se muestran gráficamente las direcciones posibles alrededor de los puntos sobre el electrodo en los cuales se realiza el estudio, en color rojo, verde, amarillo y azul respectivamente para los puntos en mención, además en la parte superior en color negro se encuentra el sentido de la dirección que se toma como referencia.

f.1.1 ANÁLISIS EN UNA ESQUINA DEL ELECTRODO

Para el estudio se toma como referencia una de las cuatro esquinas (-2,-1) como se observa en la Figura f.1 señalada con color rojo. La trayectoria del análisis se inicia en el punto en donde se encuentra una flecha de igual color a la trayectoria y el ángulo se varía en sentido anti-horario (el sentido se encuentra en la parte derecha del rectángulo).

Aplicando el criterio expuesto en el subcapítulo 3.2.2.1, se encontraron las magnitudes de los potenciales de paso con relación a la dirección de los puntos finales los cuales se tabuló para obtener la Figura f. 2, que muestra el comportamiento de los voltajes paso a partir del paso iniciado en una de las esquinas.

De los datos obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde una de las esquinas en dirección a la bisectriz del ángulo mayor formado por los lados de las caras de la malla que forman el vértice. Además el voltaje de paso más seguro es al dar un paso en dirección a la relación (r) multiplicada por 10 º desde uno de los lados hacia el otro pero por la parte externa de la malla.

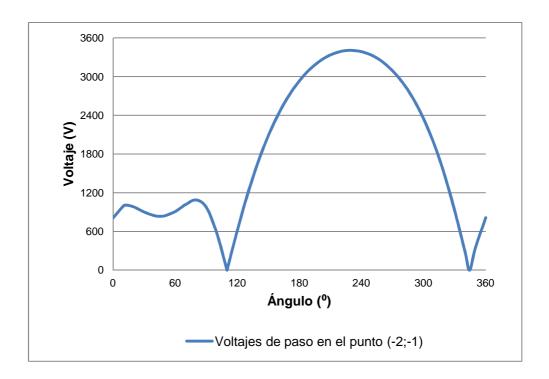


Figura f. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de los vértices del electrodo con perímetro rectangular sin electrodos en los vértices modificando la dirección del punto final

f.1.2 ANÁLISIS EN EL CENTRO DEL ELECTRODO

El centro de la malla se encuentra graficado con color verde en la trayectoria de estudio en la Figura f.1. Se inicia en el punto donde se encuentra la flecha de similar color y se realiza una trayectoria en sentido anti-horario. Este punto de la malla es el lugar más inestable para dar un paso, pero es el lugar donde se generan los potenciales menos peligrosos en relación a los otros puntos. Los voltajes de paso más peligrosos en una malla rectangular son al dar un paso en dirección a uno de los vértices de la malla, mientras que el voltaje de paso menos peligroso es cuando se puede dar un paso en dirección al centro del ancho de la malla.

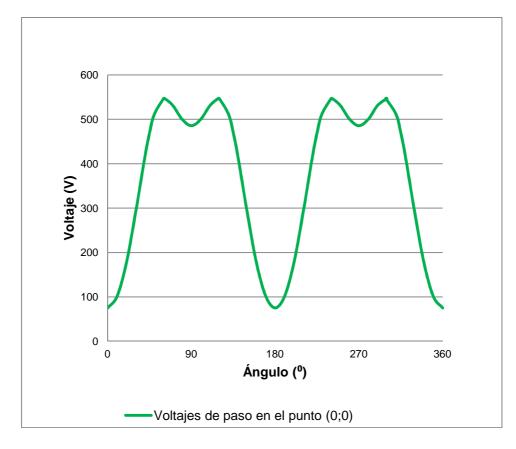


Figura f. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el centro del electrodo con perímetro rectangular sin electrodos en los vértices, modificando la dirección del punto final

f.1.2 ANÁLISIS EN EL CENTRO DEL LADO MÁS LARGO DEL ELECTRODO

El centro del lado más largo de la malla se encuentra graficado con color tomate en la trayectoria de estudio en la Figura f.1 Se inicia en el punto donde se encuentra la flecha de idéntico color y se realiza una trayectoria en sentido anti-horario.

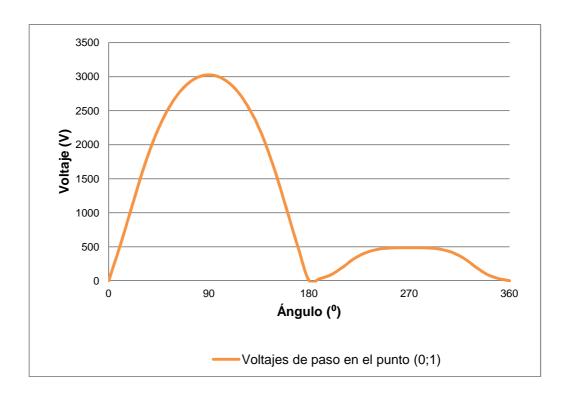


Figura f. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de los centros de los lados más largos del electrodo con perímetro rectangular sin electrodos en los vértices modificando la dirección del punto final

De la Figura f. 4 se concluye que los voltajes de paso más peligrosos, que pueden existir al dar un paso cuando se encuentra en el centro de uno de los lados largos del electrodo con perímetro rectangular sin jabalinas en los vértices la malla rectangular, son en dirección perpendicular al lado de la malla de referencia y hacia afuera de la misma. Mientras que el voltaje de paso más seguro es cuando se da un paso en dirección paralela al lado en el que se encuentre el punto en estudio.

f.1.3 ANÁLISIS EN EL CENTRO DEL LADO MÁS CORTO DEL ELECTRODO

El centro del lado más corto de la malla se encuentra graficado con color azul en la trayectoria de estudio en la Figura f.1. Se inicia en el punto donde se encuentra la flecha de similar color y se realiza una trayectoria en sentido anti-horario. Los voltajes de paso más peligrosos que pueden existir al dar un paso, cuando se encuentra en el centro de uno de los lados más cortos de la malla rectangular, son en dirección perpendicular al lado de la malla de referencia y hacia afuera de la misma. Mientras que el voltaje de paso más seguro es en 4 lugares los mismos que se encuentran en el interior de la malla, que se distribuyen restando 180º menos el producto entre la relación y 20º y este resultado será la diferencia entre los puntos seguros encontrados. Las magnitudes de los potenciales encontrados se encuentran es su totalidad en la Figura f. 5.

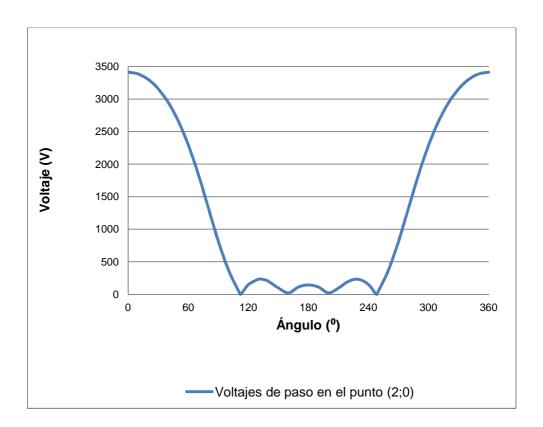


Figura f. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en uno de los centros de los lados más cortos del electrodo con perímetro rectangular sin electrodos en los vértices modificando la dirección del punto final

APÉNDICE G

Análisis del potencial de paso en electrodos con perímetro en "L" sin jabalinas en los vértices manteniendo el origen del paso

Se toma como referencia 21 puntos para cada caso, los cuales son:

- Punto 1, ubicado en la esquina formada entre el lado mayor y el ancho uno (-b; a/2).
- Punto 2, localizado en el centro del lado "b" (-b/2 ; a/2).
- Punto 3, ubicado en la Esquina formada entre la diferencia "d" y el ancho uno (0; a/2).
- Punto 4, formado por la intersección de la mediatriz de la diferencia uno y el lado mayor (-b; (a-e)/2).
- Punto 5, ubicado en la intersección entre las mediatrices de la diferencia uno y el ancho uno (-b/2 ; (a-e)/2).
- Punto 6, localizado sobre la mitad de la diferencia uno (0; (a-e)/2).
- Punto 7, formado por la intersección de la diferencia "c" y el lado mayor (- b ; e-a/2).
- Punto 8, ubicado en la intersección entre el la mediatriz del ancho uno y la prolongación del lado "c" (-b/2 ; e-a/2).
- Punto 9, localizado en el vértice formado entre las dos diferencias (0; e-a/2).

- Punto 10, ubicado sobre el centro de la diferencia "c" (c/2 ; e-a/2).
- Punto 11, localizado en el vértice formado entre la diferencia "c" y el ancho dos (C; e-a/2).
- Punto 12, formado por la intersección entre la mediatriz del ancho dos y el lado mayor (-b; (e-a)/2).
- Punto 13, ubicado en la intersección entre las mediatrices del ancho uno y del ancho dos (-b/2 ; (e-a)/2).
- Punto 14, formado por la intersección de la mediatriz del ancho dos y la prolongación de la diferencia "d" (0; (e-a)/2).
- Punto 15, se encuentra en la intersección entre las mediatrices de la diferencia "c" y del ancho dos (c/2 ; (e-a)/2).
- Punto 16, localizado sobre el centro del ancho dos (C; (e-a)/2).
- Punto 17, ubicado en la esquina formada entre el lado mayor y el lado menor (-b ; -a/2).
- Punto 18, formado por la intersección de la mediatriz del ancho uno y el lado menor (-b/2; -a/2).
- Punto 19, localizado sobre el centro del lado menor (0; -a/2).
- Punto 20, formado por la mediatriz de la diferencia "c" y el lado menor (c/2 ; -a/2).
- Punto 21, ubicado en la esquina formada entre el lado menor y el ancho dos (C; -a/2).

Para un esquema visual de la ubicación física de los puntos mencionados sobre la superficie del suelo se muestra la Figura g. 1.

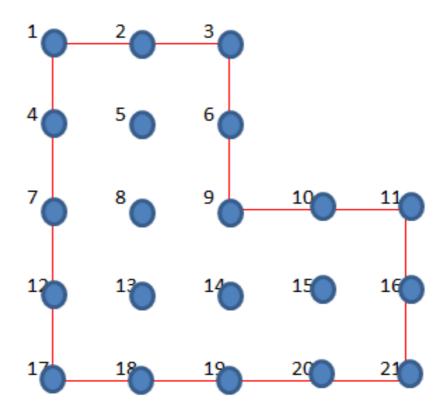


Figura g. 1. Ubicación de 21 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices

Cada uno de los puntos corresponde al valor de espacio de inicio del paso (círculo en celeste) y coincide con los con el centro de un círculo (círculo en amarillo) de 1 m de radio que muestra el punto final del paso, iniciando desde el eje X (flecha en amarillo) en dirección anti-horario (flecha de color negro), tal como se muestra en la Figura g. 2.

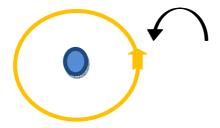


Figura g. 2. Trayectoria, sentido e inicio para estudio manteniendo el origen del paso

Aplicando el criterio expuesto en el subcapítulo 3.2.2.1, se verifican los datos de los puntos finales de los cuales se tabuló para realizar el gráfico del comportamiento de los voltajes de paso, de que se expone desde el subcapítulo 0 hasta el subcapítulo 0.

g.1.1 Análisis en el punto uno

Para el estudio se toma como referencia la esquina formada entre el lado mayor y el ancho uno (-b; a/2), mostrado gráficamente en la Figura g. 1 y que para cada uno de los casos respectivamente serán los puntos (-2;-2), (-2;-4) y (-2;-4).

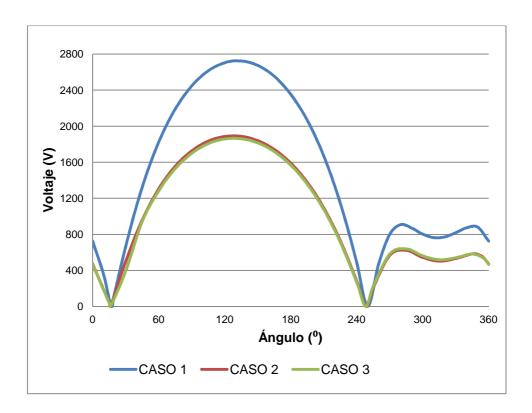


Figura g. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto uno y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

De los datos obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde de la esquina formada entre el lado mayor y el ancho uno en dirección a la bisectriz del ángulo mayor formado por los lados de las caras de la malla que forman el vértice. Además el voltaje de paso más seguro para los tres casos es muy similar y es al dar un paso en dirección a 17°y 250°a partir del inicio establecido de ángulo (ver Figura g. 3), esto básicamente se ve por que el punto uno se encuentra con un valor similar del ancho uno para los tres casos.

g.1.2 Análisis en el punto dos

El análisis se realiza en un punto ubicado en el centro del lado "b" (-b/2 ; a/2), es decir se encuentra en (-1/2 ; 1), (-1/2 ; 2), y (-1/2 ; 2) para los tres casos del electrodo en esta configuración en los que el lado b sea igual a dos metros. Los potenciales de punto generado para este caso se muestran en la Figura g. 4.

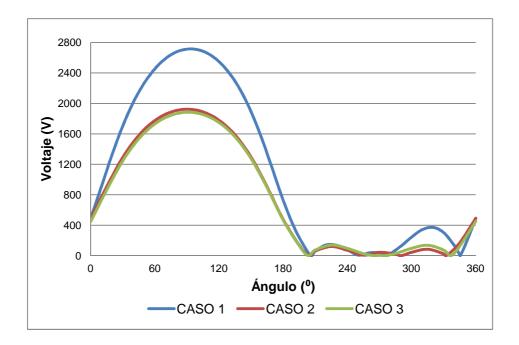


Figura g. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto dos y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

De los datos obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde el centro del lado "b" perpendicularmente hacia afuera del electrodo.

También se comprueba que mientras se dé un paso en el interior del electrodo disminuye notablemente las magnitudes de los potenciales generados en la superficie del suelo. Además se concluye que el voltaje de paso más seguro no es el mismo en los tres casos, sino que este punto involucra el tipo de caso, para lo que es necesario realizar un análisis más detallado, amplio y profundo, el está fuera del alcance que el presente trabajo establece.

g.1.3 Análisis en el punto tres

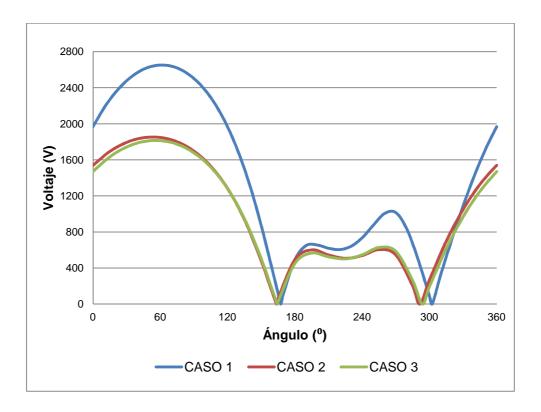


Figura g. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto tres y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

El análisis se realiza en un punto ubicado en la esquina formada entre la diferencia "d" y el ancho uno "b", y en general se ubica en el punto (0 ; a/2), es decir se encuentra en (0 ; 1), (0; 2), y (0 ; 2) para los tres casos del electrodo en esta configuración en los que el lado b sea igual a dos metros. Los potenciales de punto generado se visualizan en la Figura g. 5.

El valor del potencial de paso más elevado coincide para los tres casos con lo que se concluye que el potencial de paso más peligroso que se puede obtener al dar un paso desde la esquina entre el ancho uno y la diferencia "d" es cuando se da un paso hacia la bisectriz del ángulo mayor formado entre las caras de los lados que forman este vértice. Además el voltaje de paso más seguro no coincide en los tres casos, eso se prevé que es debido a que los tres datos tienen distintas relaciones de b para los valores de a, e y f, por lo que se observa que la dirección de paso más seguro para dar desde el punto 3 se encuentra en función de estas relaciones. No se profundiza más el estudio porque está fuera del alcance del presente trabajo.

g.1.4 Análisis en el punto cuatro

Se establece como referencia el punto formado por el centro de la diferencia uno pero ubicado sobre el lado mayor a partir del punto uno, visualizado en la Figura g. 1, y el cual en punto para la ubicación sobre el plano cartesiano sigue la relación (-b; (a-e)/2). Para el análisis de los tres casos, los potenciales generados se tabularon y graficaron y se observan en la Figura g. 6.

Al igual que para el caso anterior, la dirección del valor del potencial de paso más elevado coincide para los tres casos, con lo que se concluye que el potencial de paso más peligroso que se puede obtener al dar un paso partir del punto cuatro, es cuando se da un paso hacia afuera de la malla, perpendicular al lado mayor del electrodo. Además las gráficas para los dos últimos casos es decir para el caso dos y tres son aproximadamente iguales, pero las aberturas que se tiene en los pies del punto donde se generó el potencial más alta se encuentran desplazadas,

por lo que se concluye que para este punto la dirección del potencial más bajo dependerá del las relación de "a" en función de "b, similar al caso anterior, no se profundiza más el estudio porque se encuentra fuera del alcance del presente trabajo.

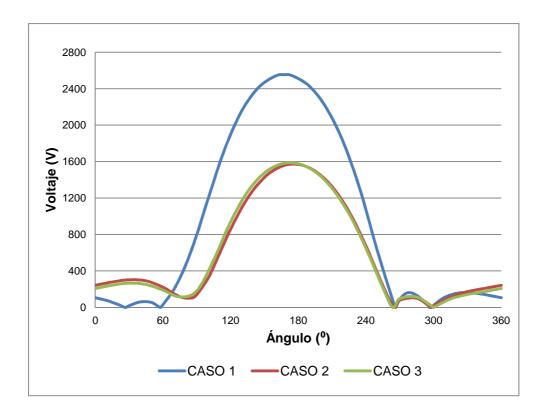


Figura g. 6. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto cuatro y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

g.1.5 Análisis en el punto cinco

El punto cinco se ubica en la intersección entre el centro de la diferencia uno y el ancho uno (-b/2; (a-e)/2). A partir de este punto se encuentra una gráfica con los potenciales de paso generados, y que se puede observar en la Figura g. 7.

Se observa que las tres gráficas son muy similares, exceptuando unos picos que cambian bruscamente la pendiente de la curva, pero son picos mínimos. Es necesario aclarar que estos picos se deben al cambio de diferencia entre los

potenciales generados entre el punto inicial y final, es decir, que si antes de este pico el potencial del punto de llegada era mayor que el potencial del punto de salida, entonces a partir de este pico se debe invertir la relación, es decir, el potencial del punto de llegada es menor que el potencial del punto de salida, pero al tomar en cuenta netamente la magnitud y no la dirección del potencial, la gráfica se expone en la Figura g. 7.

Los potenciales máximos que se encuentran, en el caso 1 en dirección a 334,5° y en los otros dos casos 327°. Se concluye que los ún icos parámetros que influyen en esta dirección son una relación entre el lado a y el lado b, el cual no se establece debido a que es un estudio que no está dentro del presente análisis.

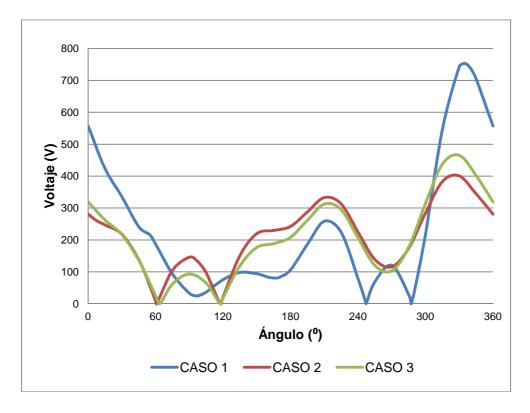


Figura g. 7. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto cinco y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

g.1.6 Análisis en el punto seis

El punto seis se ubica sobre el centro de la diferencia uno (0; (a-e)/2), en este punto se observa que la forma de las curvas es muy similar, además, si se toma como referencia la curva del caso uno, el valor máximo se encuentra, para la referencia, en dirección a los 30° en forma anti-ho rario y en inicio en dirección del eje X positivo (como se muestra en la Figura g. 2) mientras que en las dos gráficas restantes el valor del potencial máximo se encuentra a los 15° es decir disminuye un 4,17% del total posible para poder dar el paso.

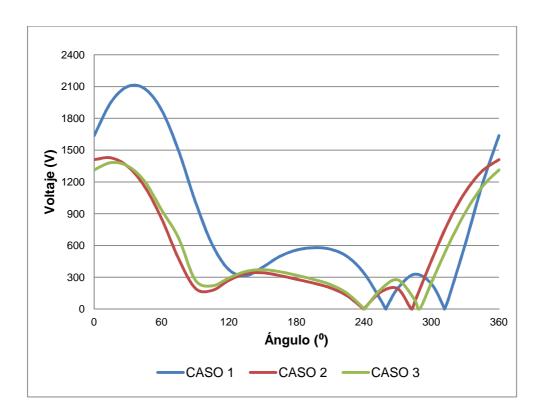


Figura g. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto seis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

En tanto que los potenciales de paso más seguros para los tres casos están dos lugares, como se observa en la Figura g. 8, que se encuentran separados 52,30°, 42,45° y 48,90° respectivamente para cada caso. Se observa que en los tres casos no hay similitud en este punto y lo que se visualiza es la dimensión de la

diferencia uno, a menor sea esta medida, menor será la separación entre los grados, además para encontrar esta separación podría intervenir la relación de "b" para cada uno de los lados. Se concluye que el peso de la simetría afecta la relación de posición de los puntos.

g.1.7 Análisis en el punto siete

Punto siete se forma en la extensión de la diferencia dos sobre el lado mayor (-b; e-a/2). Se observa que la dirección del paso para ubicar los potenciales de toque máximos son coincidentes a los 180°, es decir, desde el lado mayor al dar un paso perpendicular al mismo pero al exterior del electrodo.

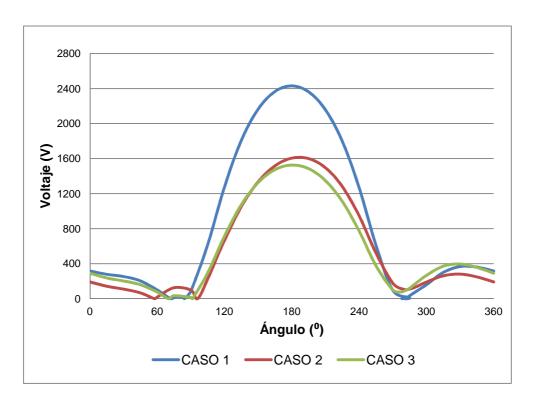


Figura g. 9. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Los puntos donde se ubiquen los potenciales de toque mínimos tendrán una ligera variación del 1,39% del valor posible, esto se debe a la simetría de las alas del electrodo, pese a ello el valor de potencial menos peligroso se ubicará en dos

puntos, a la zona comprendida de un ángulo de 78°± 12°, considerando que esta variación depende mucho del valor obtenido en el caso 2. Los datos obtenidos en este punto en forma gráfica se encuentran en la Figura g. 9.

g.1.8 Análisis en el punto ocho

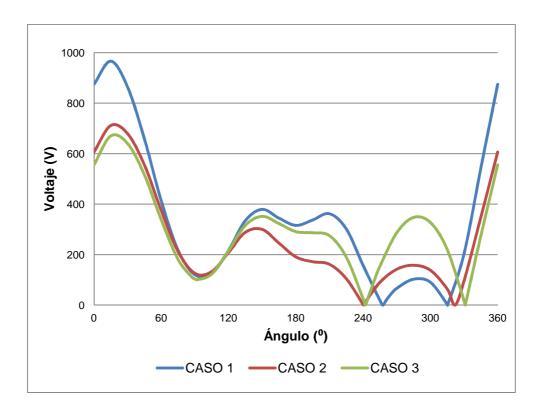


Figura g. 10. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto ocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Punto ocho se ubicará en la intersección entre el centro del ancho uno y ancho dos (-b/2; e-a/2). Se observan que las graficas son similares, además la dirección donde se genera el máximo potencial de paso coincide en los 15° a partir del punto inicial y siguiendo la trayectoria y sentido como muestra la Figura g. 2. Los valores de potenciales obtenidos en este punto se pueden visualizar para los tres casos en la Figura g. 10. La dirección del potencial más seguro variará dependiendo del peso de la simetría que se tenga, mientras más simétricas sean

las alas se la separación de los potenciales más seguros es menor que en las asimétricas, pero en los dos casos varían a partir de una dirección de simetría, 286,6°± 28,9°.

g.1.9 Análisis en el punto nueve

El punto nueve se ubica en el vértice formado entre las dos diferencias (0; e-a/2).

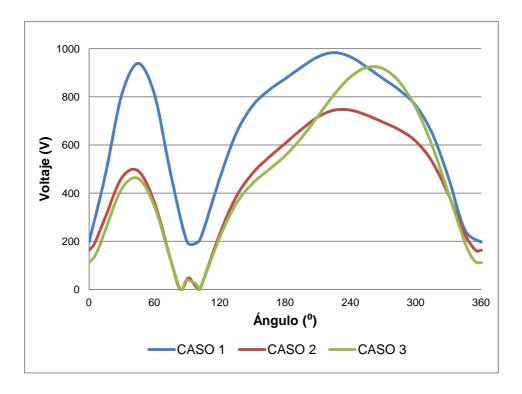


Figura g. 11. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto nueve y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Este punto se vio que es el lugar donde se genera el mayor potencial de punto sobre toda la superficie del electrodo en L, pero al analizar la dirección de paso en la Figura g. 11 se puede observar según los resultados obtenidos que la dirección del valor máximo de potencial de paso coincide su dirección para el caso uno y dos, mientas que para el caso tres no tiene una misma dirección, esto se da debido a que el ala del electrodo uno y dos coincide la diferencia dos, el ancho

dos y el lado menor mientas que para el caso tres solo el valor del ancho dos se duplica en esto incide a que la dirección de potencial de paso cambie su dirección estos valores de 225°a 255°.

g.1.10 Análisis en el punto diez

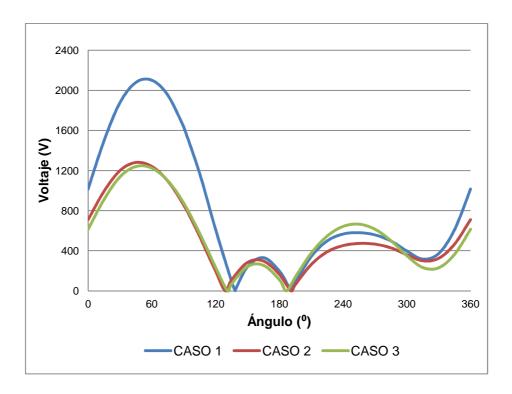


Figura g. 12. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto diez y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Punto 10 se ubicará sobre el centro de la diferencia "c" (c/2; e-a/2). Según los resultados obtenidos se construyó en la Figura g. 12, en la que se puede observar que el potencial se paso máximo es aproximadamente igual en los tres casos y se ubica a los cuando se da un paso en dirección de los 60° según la trayectoria, inicio y sentido de giro expuesto en la Figura g. 2, además que los potenciales más seguros para dar el paso varían mínimamente debido a valor de simetría de cada caso, pero para los tres casos se tienen dos direcciones de paso seguras las

cuales se ubican a 133,75° ± 4,65° y a 188,90° ± 2, 10°. Pero lo que se puede ver que las tres curvas tienen un trazado muy parecido.

g.1.11 Análisis en el punto once

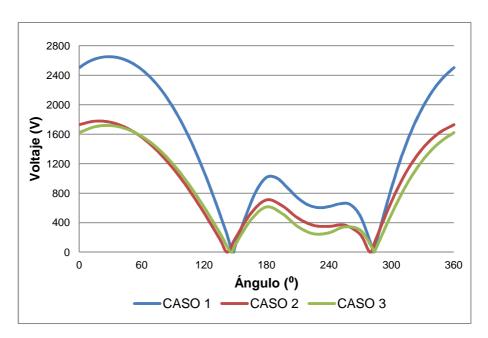


Figura g. 13. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto once y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

En este análisis se tomará en cuenta la posición del punto once que se ubica en el vértice formado entre la diferencia "c" y el ancho dos (C; e-a/2).

Evaluando cada dirección posible se obtiene los valores que tabulados se encuentran en la Figura g. 13, se puede observar en esta gráfica una similitud para los tres caso en cuanto al trazado de las mismas, además la dirección donde se genera el potencial de paso máximo para el caso uno y el tres se asemejan y se ubican a los 15° de inicio del giro y a una dirección anti horaria. Mientras que para el caso dos el mayor potencial se genera al dar un paso a los 30°, esta variación se da debido al cabio de la sim etría realizado para los tres casos. El potencial de paso más seguro se genera en dos puntos en cada caso, y

los cuales para los tres casos se asemejan y son a 144,90° ± 2,6° y a 181,50° ± 2,0°.

g.1.12 Análisis en el punto doce

Punto doce se formará por el valor de la mitad del ancho dos pero sobre el lado mayor (-b; (e-a)/2). Las curvas para estos tres casos son similares y se puede observar que el potencial máximo de paso que se genera se ubica para el caso uno y para el caso tres a los 190° mientras que par a el caso tres se tendrá una variación de -10°. Además se visualiza que el potencial de paso más seguro siempre será al dar un paso en dirección interior de la malla, pero variaran según la relación de uniformidad en dos o cuatro puntos seguro, los dos puntos seguros que se generan se ubican a los 58,05°±8,75°y 96, 8°±2,6°.

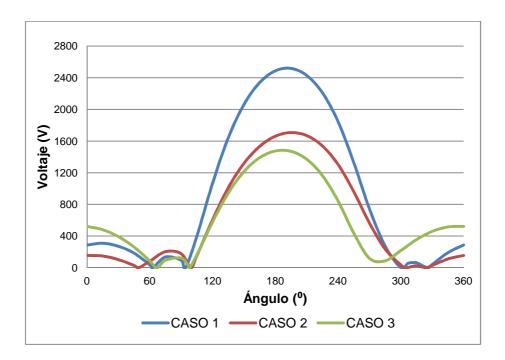


Figura g. 14. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto doce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Mientras que en el caso tres no aparecen dos puntos seguros que en los otros dos casos si se generan los cuales son 302,35°± 2, 35°y 325°± 1,0°. Todos los valores obtenidos en este punto se encuentran en la Figura g. 14.

g.1.13 Análisis en el punto trece

Punto trece se ubicará en la intersección entre el centro del ancho uno y el centro del ancho dos (-b/2; (e-a)/2). Los potenciales generados en este punto según la dirección se encuentran en la Figura g. 15.

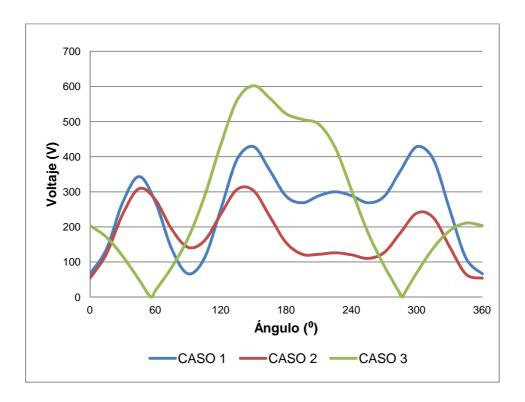


Figura g. 15. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto trece y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Se puede observar que en este punto el mayor potencial de paso se obtiene para el caso dos a los 135°, mientras que para el caso u no y tres la dirección que genera el mayor potencial se asemeja a los 150°, un a característica que se observa y que en los puntos anteriores no se generaba es que la curva de trazado

obtenida ya no es similar en el caso tres que para los otros dos casos y que en esta curva se obtienen 2 lugares seguros donde se obtiene un potencial de paso seguro y se encuentra a los 55,8° y a los 286,45°, mientras que para los dos casos restantes el potencial de paso más seguro se genera al iniciar el ángulo es decir a los 0°.

g.1.14 Análisis en el punto catorce

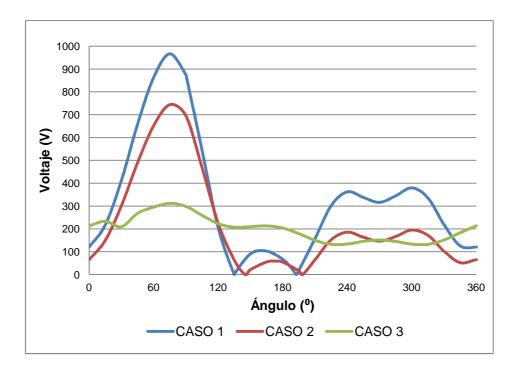


Figura g. 16. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto catorce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Punto catorce se formará por el valor de la mitad del valor del ancho dos sobre el eje Y (0 ; (e-a)/2). La grafica obtenida por los valores de potenciales generados en cada dirección se encuentra en la Figura g. 16. Se puede ver que para el caso tres la gráfica no tiene mucha diferencia en todas las direcciones y que entre el punto máximo y mínimo existe una diferencia de 180 V. Esto se debe a que en este caso la dirección que se tome es decir el punto final del paso siempre se encontrara en el interior de la malla por lo que aquí en esta parte se ve

claramente la forma de funcionamiento de una malla la cual disminuye los potenciales de paso que se generen en la superficie. Para los otros dos casos restantes el punto final del paso en algunos casos llegará al extremo de la periferia mientras que en otros llegará al interior de la malla, en tal caso el mayor potencial de paso para los tres casos se genera a los 75°, mientras que el potencial más seguro para los dos primeros casos se encuentran en dos direcciones a 139,85°± 5,15° y a 195,50° ± 3,0°. Pa ra el tercer caso el potencial de paso más seguro se ubica a los 225° de este punto se concluye que sobre la superficie del electrodo es mejor dar un paso en el interior de la misma pero lo más alejado de cables o jabalinas que formen este electrodo.

g.1.15 Análisis en el punto quince

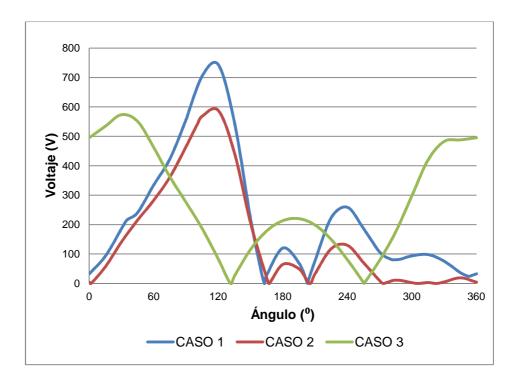


Figura g. 17. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto quince y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Punto quince se ubicará en la intersección entre centro de la diferencia "c" y el centro del ancho dos (c/2; (e-a)/2). Según los valores de los potenciales obtenidos para cada dirección, y visualizados en la Figura g. 17, se puede observar que las direcciones de los valores máximos y mínimos para el caso tres en este punto varían notablemente en relación a los otros dos casos, pero recordemos que este punto se encuentran en el interior de la malla por lo que los potenciales generados son bajos con relación a los valores obtenidos en la periferia del electrodo.

Los valores de potencial máximo se generan a una dirección de 120° para los dos primeros casos mientras que para el tercer caso se genera a los 30°. Los potenciales más seguros en los tres casos se ubican en dos direcciones, para el caso uno y dos se encuentran a 165°± 2,25° y a 204° ± 1,0°. Mientras que para el caso tres se ubica a 131,2° y a 255,5°. Estos cambi os de dirección se dan debido a que afecta notablemente la simetría del electrodo.

g.1.16 Análisis en el punto dieciséis

Punto 16 ubicado sobre el centro del ancho dos (C; (e-a)/2). El valor de potencial más peligroso se genera al dar un paso hacia afuera del electrodo en dirección perpendicular al ancho dos, y el punto más seguro varía según a sea el caso. Para el caso 1 y dos existen 4 puntos seguros mientras que para el caso 3 existen un tres puntos menos peligrosos, con esto se puede ver que la simetría de la afecta en la ubicación del punto donde se genera el potencial de punto menos peligroso.

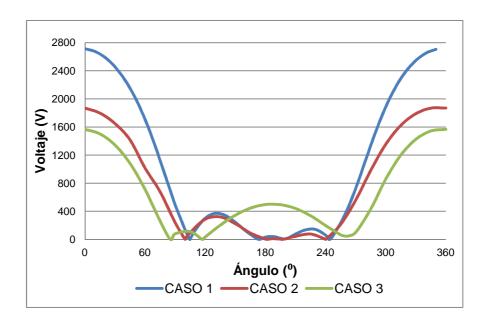


Figura g. 18. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en punto dieciséis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

g.1.17 Análisis en el punto diecisiete

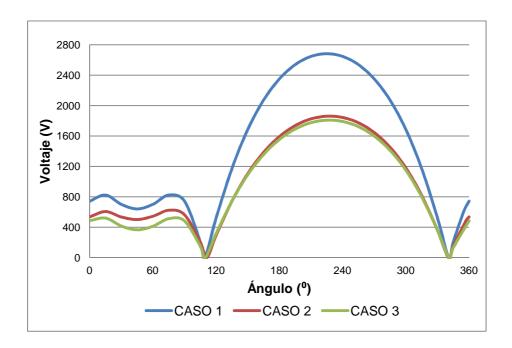


Figura g. 19. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en punto diecisiete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Punto 17 ubicado en la esquina formada entre el lado mayor y el lado menor (-b ; -a/2). Para este punto las tres curvas son muy parecidas, y la dirección donde se genera el potencial más peligroso en los tres casos coincide en la bisectriz del ángulo mayor formado entre el lado mayor y el lado menor, mientras que la dirección donde se ubican los potenciales menos peligrosos a partir del punto diecisiete casi coinciden en los tres casos tienen una ligera variación y estas direcciones son $110^{\circ} \pm 1^{\circ}$ y $340,6^{\circ} \pm 0,1^{\circ}$, el detalle de los potenciales generados a partir de del punto diecisiete en todas la direcciones posibles se muestra en la Figura g. 19.

g.1.18 Análisis en el punto dieciocho

Punto 18 se formará por el centro del ancho uno pero sobre el lado menor (-b/2; -a/2).

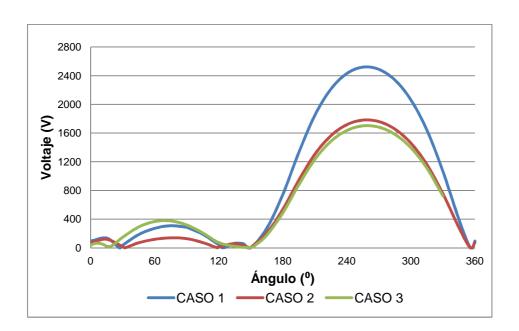


Figura g. 20. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto dieciocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

Para los tres casos la dirección donde se ubica el potencial de paso es a 255º a partir del inicio en el punto en estudio y siguiendo el criterio expuesto en la Figura

g. 2. Además los puntos menos peligrosos varían según el tipo de configuración, y cada uno de estos puntos en mención se muestra en la Figura g. 20.

g.1.19 Análisis en el punto diecinueve

Punto 19 se ubicara sobre el centro del lado menor (0; -a/2). La curva generada por cada una de las direcciones a partir de este punto se encuentra en la Figura g. 21. De esta gráfica se puede ver que el potencial más peligroso se encuentra al dar un paso den dirección de la bisectriz del ángulo hacia fuera de la malla. Mientras que el potencial más seguro no se encuentran en un punto similar pero si muy aproximado, y variara según la configuración sea del electrodo.

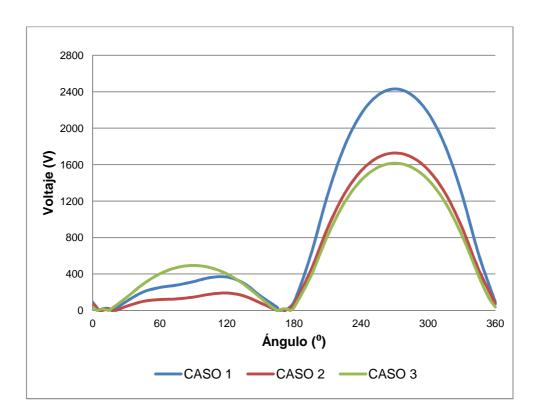


Figura g. 21. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto diecinueve y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

g.1.20 Análisis en el punto veinte

Punto 20 se formará por el centro de la diferencia "c" sobre el lado menor (c/2 ; -a/2). Para el caso dos y tres el potencial más peligroso es exactamente igual y ubicado a los 285º mientras que para el caso 1 este punto se encuentra a los 282,5º. El potencial de menos peligroso se encuentra en distintas posiciones, esto se puede ver en la Figura g. 22.

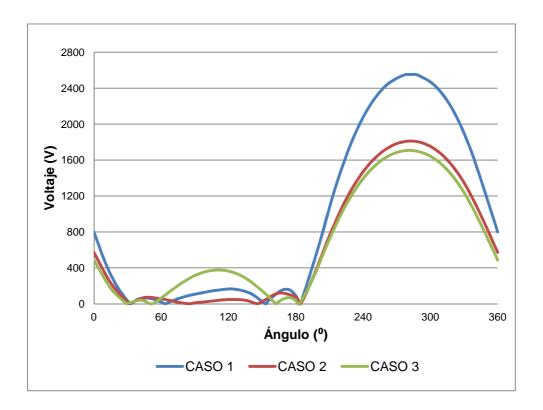


Figura g. 22. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto veinte y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

g.1.21 Análisis en el punto veintiuno

Punto 21 ubicado en la esquina formada entre el lado menor y el ancho dos (C; -a/2). En este punto en mención aproximadamente son coincidentes las direcciones de ubicación los potenciales de paso máximo y minino en los tres casos y se encuentran el primero en dirección a la bisectriz del ángulo mayor formada entre lado menor y el ancho dos, mientras que los puntos más seguros se entran a los 71,8° ±1,3° y el otro a 199,5° ±0,5°.

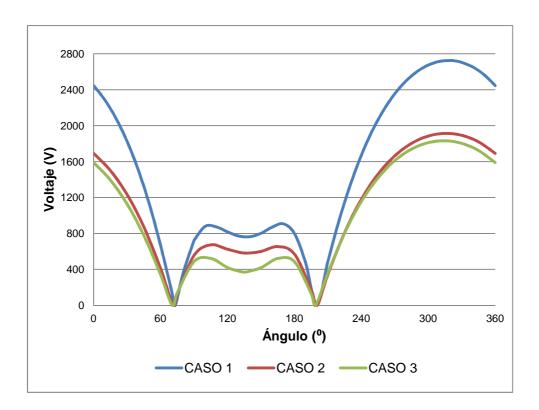


Figura g. 23. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en punto seis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en L sin jabalinas en los vértices, para los tres casos

APENDICE H

Análisis del potencial de paso en electrodos tipo T manteniendo el origen del paso

Esta parte del estudio lo que busca es encontrar la dirección hacia donde resulta más peligroso dar el paso, para esto se mantendrá firme uno de los pies (punto inicial A de la figura 3.8) y modificando la dirección hasta donde llega el otro pie (el punto final B de la figura 3.8), este cambio de dirección se lo realizará mediante la tabulación en 10° en sentido horario (en algunos casos la variación será menos para encontrar los puntos en los que el voltaje de paso sea cero o donde la tendencia de la curva cambie de sentido es decir encontrar los picos), sabiendo que el módulo de la distancia es 1 m. Matemáticamente el procedimiento es idéntico al expuesto en el ítem 3.2.2.1.

Para esta parte del estudio se tomará como referencia 27 puntos, pero de lo cuales por cuestiones de simetría se disminuyen a 16 ya que el punto 1 es igual al punto 1', el punto 2 similar al punto 2', y así sucesivamente tal como se muestra en la Figura h. 1.

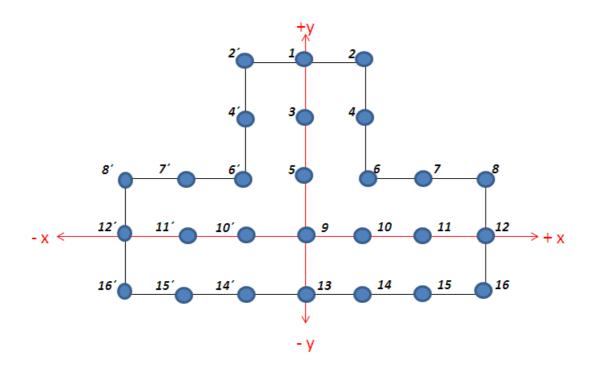


Figura h. 1. Ubicación de 27 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

Cada uno de los puntos será el valor de espacio de inicio del paso (círculo en celeste) y coincidirá con los con el centro de un círculo (círculo en amarillo) de 1m de radio que muestra el punto final del paso, iniciando desde el eje X (flecha en amarillo) en dirección anti horario (flecha de color negro), tal como se muestra en la Figura h. 1.

Aplicando el criterio expuesto en el subcapítulo 3.2.2.1, se encontró los datos de los puntos finales de los cuales se los tabuló para realizar el gráfico del comportamiento de los voltajes paso, de lo cual se expone desde el subcapítulo h.1.1 hasta el subcapítulo h.1.16.

h.1.1 Análisis en el punto uno

Para el estudio en mención se tomó como referencia el punto medio del ancho uno (0; 3a/2), mostrado gráficamente en la Figura h. 1 y que para el caso en estudio será (0; 3).

De los datos obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde punto medio del ancho uno en dirección perpendicular a este lado pero hacia afuera de la malla. Además el voltaje de paso más seguro se dan en dos direcciones, el primero a dar un paso en dirección 197,4° y a los 342,6° a partir del punto de referencia (ver Figura h. 2), es decir el paso más peligroso se genera al ir a dirección a la intersección de la mediatriz de cualquiera de las alturas con la prolongación de los anchos dos o tres.

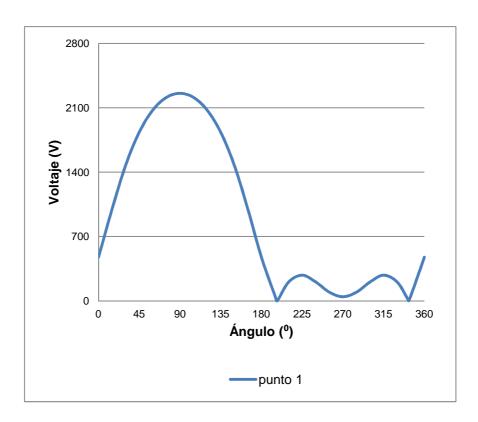


Figura h. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto uno y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.2 Análisis en el punto dos

El análisis se realizará en un punto ubicado en la esquina formado por el ancho uno y la altura uno o dos se esquematiza en la Figura h. 1 como el punto 2 con coordenadas (a/2 ;3a/2) y el punto 2´ ubicado en (-a/2 ;3a/2), pero solo se tomará como referencia al punto dos. Los potenciales de punto generado para este caso se muestran en la fueron los mostrados en la Figura h. 3.

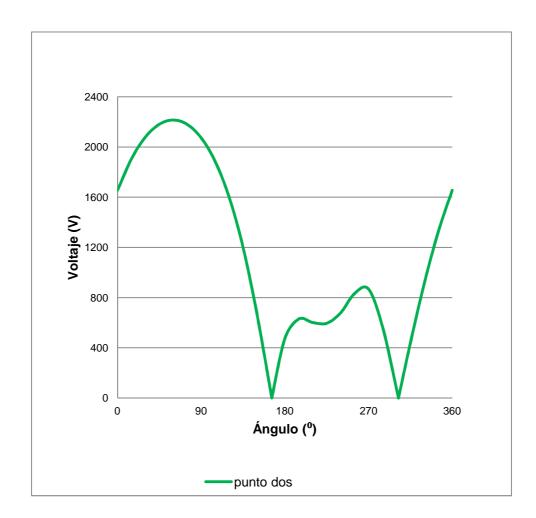


Figura h. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto dos y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

De los datos obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde esquina entre el lado "b" y la altura "h" se encuentra a los 60º según la dirección del ángulo establecido.

También se comprueba que mientras se dé un paso en el interior del electrodo disminuye notablemente las magnitudes de los potenciales generados en la superficie del suelo además que existen dos direcciones donde el potencial que se genera se anula y esta direcciones se encuentran fuera del perímetro establecido de este electrodo y esto se encuentra a 165,9º y a 302,2º.

h.1.3 Análisis en el punto tres

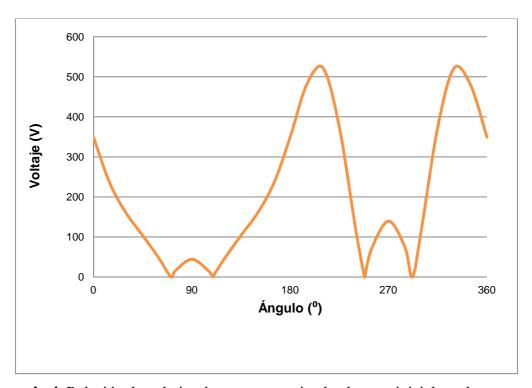


Figura h. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto tres y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

El análisis se realizará en un punto ubicado en la intersección de las mediatrices del ancho uno y la altura uno, y en general se ubica en el punto (0; a), es decir se encontrará en (0; 2) en la configuración como referencia. Los potenciales de punto generado se visualizan en Figura h. 4.

En la grafica anterior se puede ver el efecto que causa la simetría, existen dos valores máximos ubicados 210° y 330°. Además el voltaje de paso más seguro se tienen en cuatro puntos, 70,9°, 109,1°, 248,1° y 291,9°.

h.1.3 Análisis en el punto cuatro

Para este análisis se establecerá como referencia el punto ubicado sobre el medio de la altura uno, visualizado en la Figura h. 1, y el cual en punto para la ubicación sobre el plano cartesiano sigue la relación (a/2; a).

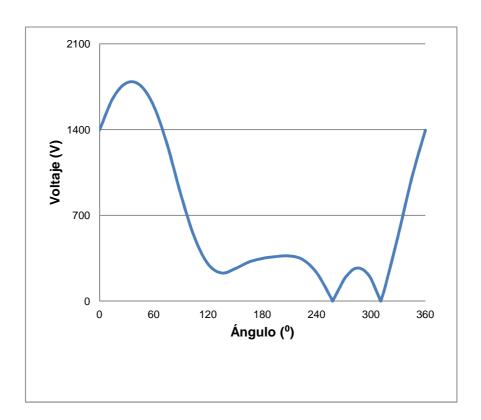


Figura h. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto cuatro y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

Para el análisis los potenciales generados fueron tabulados y graficados para poder ser observados en la Figura h. 5. El potencial de paso más elevado se genera a los 30°, y el menos peligrosos se generan en dos direcciones, la primera

a 257,5 ° y 310,6 °. Esta última dirección se encuentra fuera del perímetro de la malla por lo que se ve que no necesariamente se debe dar un paso hacia el exterior de la malla para encontrar potenciales elevados.

h.1.5 Análisis en el punto cinco

El punto cinco se encuentra al intersecar la mediatriz del ancho uno y la prolongación del ala uno en dirección hacia la altura dos (0; a/2), en este punto se puede observar una curva de los potenciales generados según el ángulo de dirección en la Figura h. 6. Como este es un punto que se encuentra sobre el eje de simetría se observa la curva tiene esa característica especial por la simetría en mención y se visualizan dos puntos donde se generan los potenciales máximos los cuales son 15° y 165° mientras que los potenciales mínimos se generaran también en dos direcciones a 219,6° y 320,4° se observa que si la dirección se aleja de las alas los potenciales aumentan, caso contrario disminuyen.

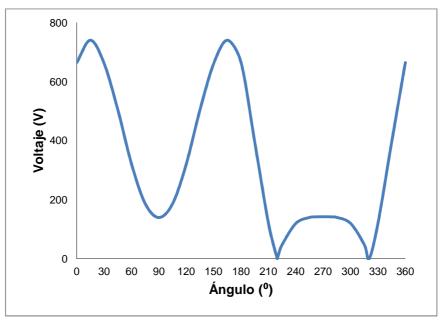


Figura h. 6. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto cinco y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.6 Análisis en el punto seis

El punto seis se encuentra al intersecar la mediatriz del ancho dos y la prolongación de la altura uno (0; a/2), en este punto se puede observar una curva de los potenciales generados según el ángulo de dirección en la Figura h. 7. Como este es un punto que se encuentra sobre el eje de simetría se observa la curva tiene esa característica especial por la simetría en mención y se visualizan dos puntos donde se generan los potenciales máximos los cuales son 15° y 165° mientras que los potenciales mínimos se generaran también en dos direcciones a 219,6° y 320,4 se observa que si la dirección se aleja de las alas los potenciales aumentan, caso contrario disminuyen.

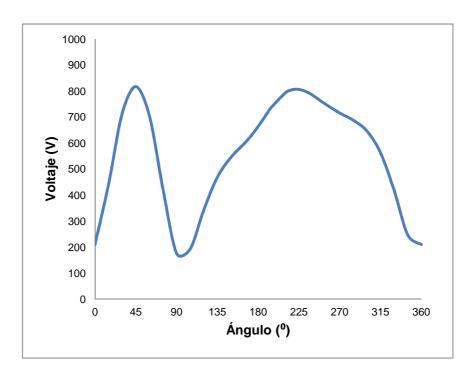


Figura h. 7. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.7 Análisis en el punto siete

Punto seis se formará la esquina la altura uno y el ala uno (a ; a/2). Los resultados para cada dirección se los tabula y gráfica y se encuentra la Figura h. 8. En este punto se observa que la dirección del paso más peligrosa se genera al dar un paso en la dirección de los 60 °. Mientras que los potenciales más seguros se ubican a los 137,3° y a 193,7° en este caso tambié n se observa que al dar un paso al exterior de la malla no genera un potencial peligroso, por el contrario se genera la dirección con potencial más seguro.

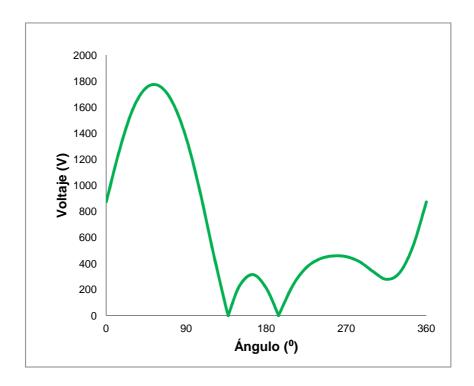


Figura h. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.8 Análisis en el punto ocho

Punto ocho se ubicará en la intersección entre el ala uno y el ancho tres (3a/2; a/2). Los potenciales generados en este punto según la dirección se encuentran en la Figura h.9. Se puede observar que en este punto el mayor potencial de paso

se obtiene a los 30°, mientras que los potenciales más seguros se obtienen en dos direcciones diferentes la primera a los 147,1 ° y la segunda a los 182,6 °, además se observa que durante el intervalo de el valor de las direcciones más seguras los potenciales que se generan son relativamente bajos en relación a los que se tiene cercanos al potencial ms alto.

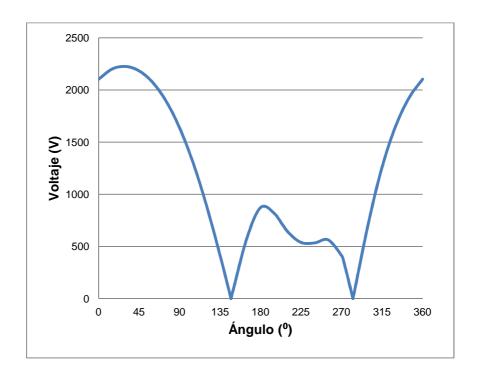


Figura h.9. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto ocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.9 Análisis en el punto nueve

Este punto se ubicará en la intersección entre la mediatriz del ancho uno y la mediatriz del ancho dos (0; 0) en que para el caso en referencia que se muestra en la Figura h. 1 coincide con el eje de coordenadas, y los potenciales generados en este punto se los esquematiza en la Figura h.10 en la cual se observa que las direcciones de los valores máximos son a los 240° y 300° estos potenciales son de menor magnitud que en los puntos anteriores, y los potenciales mínimos se encuentran en dos direcciones a los 0° y a los 180°, estos últimos no son seguros

es decir en los cuales el potencial es cero pero disminuye notablemente. Como se observa estos valores se generan manteniendo un sistema de simetría.

.

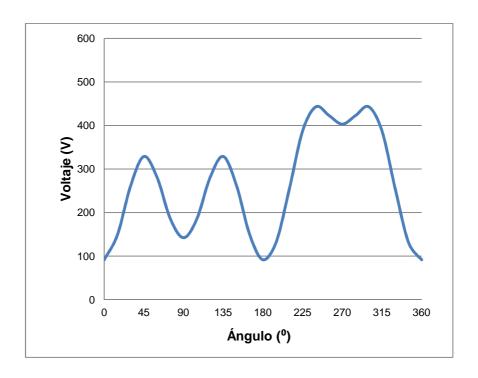


Figura h.10. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto nueve y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.10 Análisis en el punto diez

Punto diez ubicado sobre la intersección de la prolongación de la altura uno y la mediatriz del ancho tres (a/2;0). El valor de potencial más peligroso se genera al dar un paso en dirección a los 80°, y la dirección para donde se generan los potenciales más seguros es a la 136,8° y a los 104,5°, la generación de potenciales en su totalidad sobre la superficie del suelo se puede observar en la Figura h.11.

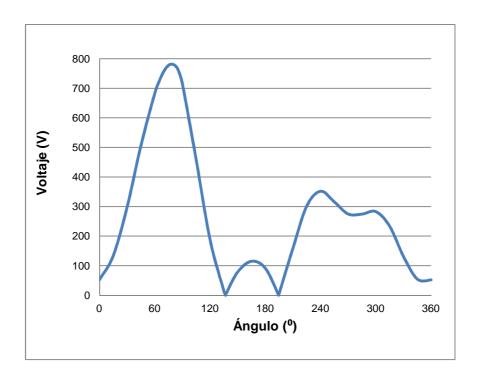


Figura h.11. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto diez y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.11 Análisis en el punto once

En este análisis se tomará en cuenta la posición del punto once que se ubica en la intersección de las mediatrices del ala uno y el ancho tres (a; 0). Evaluando cada dirección posible se obtiene los valores que tabulados se encuentran en la Figura h.12, se puede observar en esta gráfica que la dirección donde se genera el potencial de paso máximo se da a los 120º de inicio del giro y a una dirección anti horaria. Mientras que el potencial más seguro se genera en tres direcciones diferentes a los 4,6º a los 167,4º y a los 196,3º.

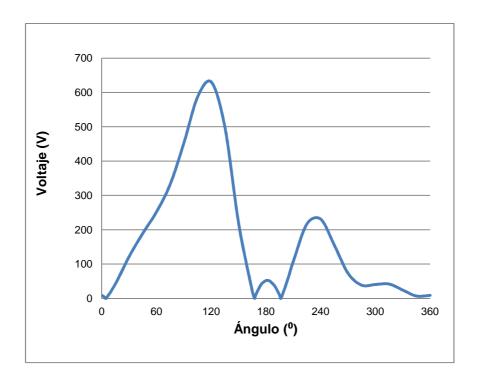


Figura h.12. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto once y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.12 Análisis en el punto doce

Punto doce se ubicará sobre el punto medio del ancho tres (3a/2; 0). Los potenciales generados en este punto según la dirección se encuentran en la Figura h.13. Se puede observar que en este punto el mayor potencial de paso se obtiene al dar un paso perpendicular de al ancho tres pero saliendo del electrodo, en tanto que esta parte del análisis la dirección que genera el mayor potencial se ubica en tres puntos diferentes (104,5°, 180° y 243,9°), de lo que se puede observar q en este punto el potencial máximo no se ve afectado por la configuración y sigue la tendencia de encontrarse en dirección de la bisectriz del ángulo que se forma en el punto con relación al electrodo.

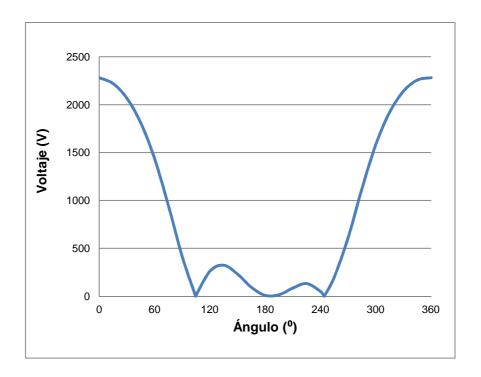


Figura h.13. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto doce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.13 Análisis en el punto trece

Punto trece ubicado sobre el punto medio del lado base (0 ; -a/2). El potencial más peligroso se genera al dar un paso en dirección a los 270° con lo que este punto también genera los potenciales peligrosos según el criterio general de que el potencial más peligroso se da en dirección a la bisectriz del ángulo que se forman por los lados del punto y hacia afuera de la malla. Mientras que el potencial más seguro se genera en dos direcciones a los 15° y a los 165°, todos los potenciales generados según las direcciones se visualizan en la Figura h.14.

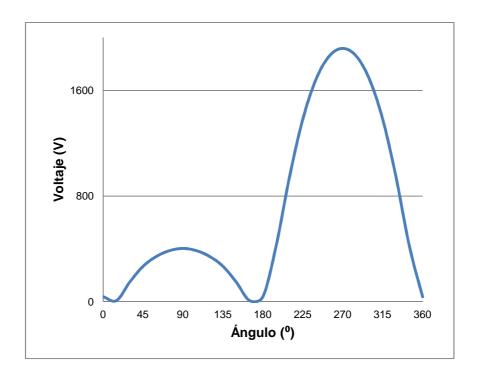


Figura h.14. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto trece y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.14 Análisis en el punto catorce

La ubicación del punto catorce se formara por la intersección de la extensión del la altura dos y el lado base (a/2 ; -a/2). La dirección donde se genera el potencial máximo es similar al caso anterior, mientras q los potenciales mínimos se obtienen en una dirección alrededor de 160° y de 182°, cada uno de estos puntos en mención se muestran en la Figura h.15.

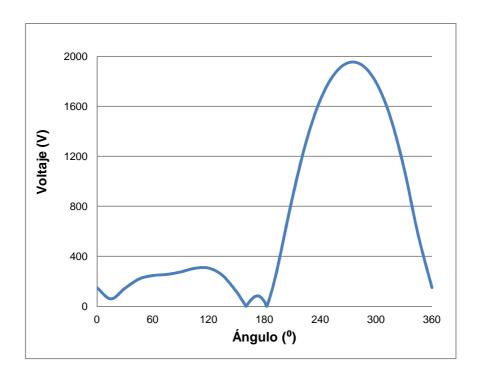


Figura h.15. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto catorce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.15 Análisis en el punto quince

El punto quince se ubicará sobre la intersección del lado base con la mediatriz del ala uno (a; -a/2). La curva generada por cada una de las direcciones a partir de este punto se encuentra en la Figura h.16. De esta gráfica se puede ver que el potencial más peligroso se encuentra al dar un paso en dirección a los 285°, en tanto que el potencial más seguro 62,5°, 145,9° y 187,3°. Una característica de la figura generada es que a medida que la dirección hacia el ancho uno los potenciales aumentan.

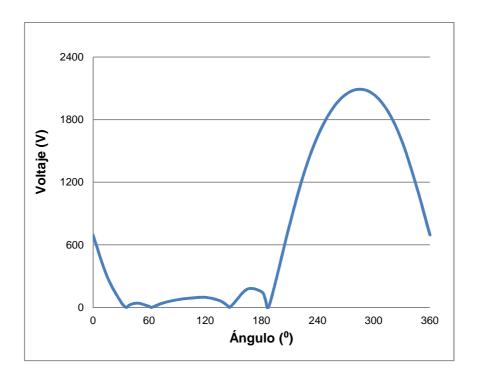


Figura h.16. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto quince y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

h.1.16 Análisis en el punto dieciséis

Punto dieciséis en la esquina formada por el lado base y el ancho dos, (3a/2; -a/2). El potencial más peligroso es exactamente igual y ubicado a los 315°. El potencial de menos peligroso y más seguro se genera al dar un paso en dos direcciones a los 72,8° y a los 201,1°, esto se puede ver en la Figura h.17.

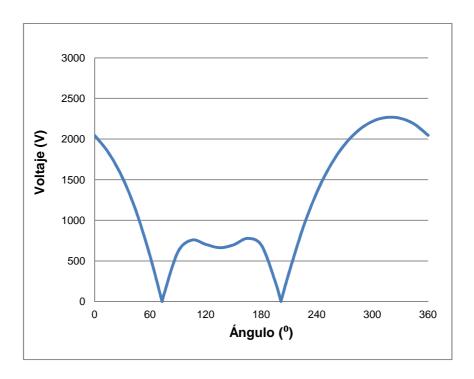


Figura h.17. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto dieciséis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en T sin jabalinas en los vértices

APÉNDICE I

Análisis del potencial de paso en electrodos tipo C Manteniendo el origen del paso

Esta parte del estudio lo que busca es encontrar la dirección hacia donde resulta más peligroso dar el paso, para esto se mantendrá firme uno de los pies (punto inicial A de la figura 3.8) y modificando la dirección hasta donde llega el otro pie (el punto final B de la figura 3.8), este cambio de dirección se lo realizará mediante la tabulación en 10° en sentido horario (en algunos casos la variación será menos para encontrar los puntos en los que el voltaje de paso sea cero o donde la tendencia de la curva cambie de sentido es decir encontrar los picos), sabiendo que el módulo de la distancia es 1m. Matemáticamente el procedimiento es idéntico al expuesto en el ítem 3.2.2.1.

Para esta parte del estudio se tomará como referencia 33 puntos, pero de lo cuales por cuestiones de simetría se disminuyen a 18 ya que el punto 1 es igual al punto 1, el punto 2 similar al punto 2, y así sucesivamente tal como se muestra en la Figura i. 1.

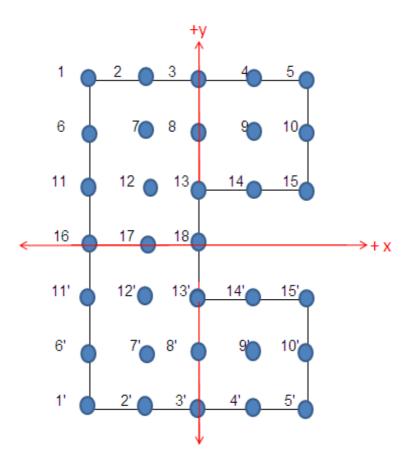


Figura i. 1. Ubicación de 33 puntos de estudio sobre un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

Cada uno de los puntos será el valor de espacio de inicio del paso (círculo en celeste) y coincidirá con los con el centro de un círculo (círculo en amarillo) de 1m de radio que muestra el punto final del paso, iniciando desde el eje X (flecha en amarillo) en dirección anti horario (flecha de color negro), tal como se muestra en la Figura g.2.

Aplicando el criterio expuesto en el subcapítulo 3.2.2.1, se encontró los datos de los puntos finales de los cuales se los tabuló para realizar el gráfico del comportamiento de los voltajes paso, de lo cual se expone desde el subcapítulo i.1 hasta el subcapítulo i.18.

i.1.1 Análisis en el punto uno

Para el estudio en mención se tomó como referencia el punto ubicado en la esquina entre la altura y el lado superior (-a; 3a/2), mostrado gráficamente en la Figura i. 1 y que para el caso en estudio será (-2; 3).

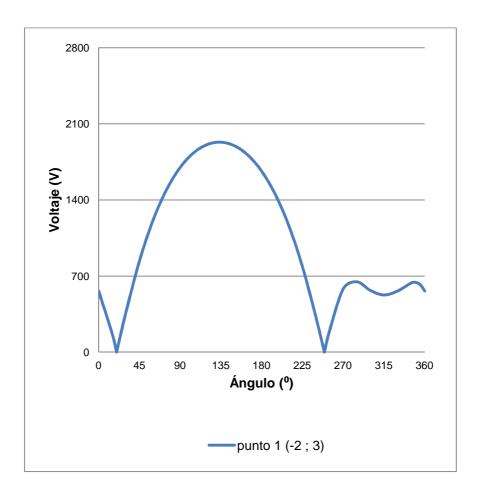


Figura i. 2. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto uno y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

De los resultados obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde el punto en mención en dirección a la bisectriz del ángulo formado en este punto hacia el exterior del electrodo. Además el voltaje de paso más seguro se dan en dos direcciones, el primero a dar un paso en dirección 19,7° y a los 249,1° a partir del pun to de referencia (ver Figura i. 2), de estos resultados se observa que debido a la forma especial que tiene este tipo

de electrodos el potencial de paso seguro desde el punto uno se da en una dirección fuera del área del electrodo.

i.1.2 Análisis en el punto dos

El análisis se realizará en un punto ubicado en la esquina formado por el ancho uno y la altura uno o dos se esquematiza en la Figura i. 1 como el punto 2 con coordenadas (-a/2 ;3a/2) y el punto 2´ ubicado en (-a/2 ;-3a/2).

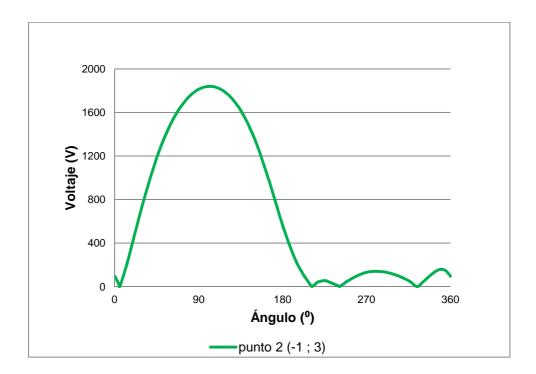


Figura i. 3. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto dos y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

De los dos puntos en mención solo se tomará como referencia al punto dos. Los potenciales de punto generados para este caso se muestran en la Figura i. 3.

De los resultados obtenidos se concluye que el voltaje de paso más peligroso que se puede tener es al dar un paso desde un punto ubicado sobre el lado superior a un cuarto de distancia a partir de la esquina entre el lado "b" y la altura "c" se encuentra a los 105º según la dirección del ángulo establecido.

También se comprueba que mientras se dé un paso en el interior del electrodo disminuye notablemente las magnitudes de los potenciales generados en la superficie del suelo además que existen cuatro direcciones donde el potencial que se genera se anula y de estas direcciones una se encuentran fuera del perímetro establecido de este electrodo, las cuatro direcciones son a 5,7° y a 211,6° 241° 324°.

i.1.3 Análisis en el punto tres

El análisis se realizará en un punto medio del lado superior y en general se ubica en el punto (0 ; 3a/2), es decir se encontrará en (0 ; 3) en la configuración como referencia. Los potenciales de punto generado se visualizan en Figura i. 4.

En la Figura i. 4 se puede ver el efecto de la forma particular de este electrodo, existen un único valor de potencial máximo el cual se genera a los 90° es decir perpendicular al lado superior en hacia afuera del electrodo. Además el voltaje de paso más seguro se tiene en cuatro puntos, 2,4, 180°, 209,2° y 297,5°. De esta parte se puede concluir que la particularidad en la distribución de electrodos independientes para formar este tipo de configuración afecta a la dirección para la generación del potencial más seguro que se obtiene a partir del punto tres.

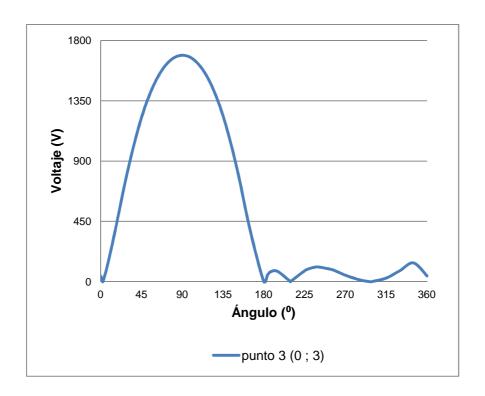


Figura i. 4. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto tres y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.4 Análisis en el punto cuatro

Para este análisis se establecerá como referencia el punto ubicado en la intersección del lado superior y la mediatriz del lado convexo dos, visualizado en la Figura i. 1, y el cual para la ubicación sobre el plano cartesiano sigue la relación (a/2; 3a/2). Para el análisis los potenciales generados fueron tabulados y graficados para poder ser observados en la Figura i. 5. El potencial de paso más elevado se genera a los 75°, y el menos peligroso se genera en cuatro direcciones, la primera a 176,9°, 212,2°, 258,8° y 330,5. La primera dirección se encuentra fuera del perímetro del electrodo por lo que se ve que no necesariamente se debe dar un paso hacia el exterior del electrodo para encontrar potenciales elevados.

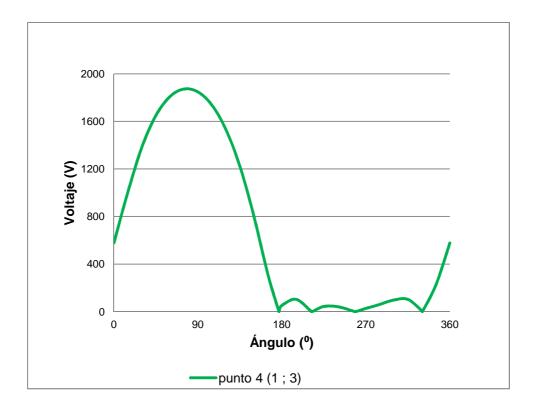


Figura i. 5. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto cuatro y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.5 Análisis en el punto cinco

El punto cinco se encuentra en el vértice formado por el lado superior y el ancho uno (a; 3a/2), en este punto se puede observar una curva de los potenciales generados según el ángulo de dirección en la Figura i. 6. Para este caso en particular que se tomo como referencia, las coordenadas sobre el plano cartesiano serian (2; 3), y se observa que la dirección donde se genera el potencial de paso más peligroso es a 45°, es decir en dirección a la bisectriz del ángulo mayor formado entre los lados que forman este vértice en estudio, mientras que los potenciales mínimos se generaran en dos direcciones a 160,3° y 190,4, el primero fuera del perímetro del electrodo y el otro en el interior del mismo pero las dos direcciones muy cercanas al lado superior.

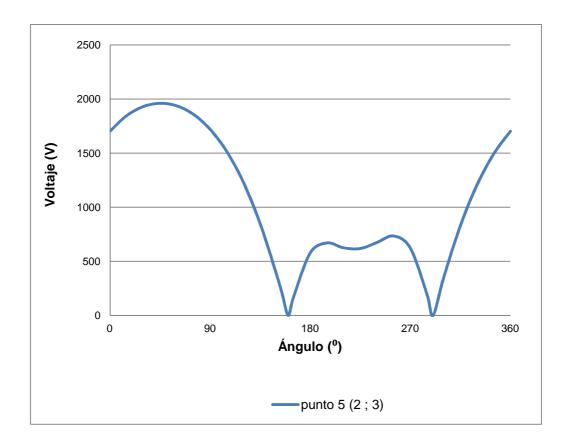


Figura i. 6. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto cinco y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.6 Análisis en el punto seis

El punto seis se encuentra al intersecar la altura con la mediatriz del ancho uno (a/2; a), en este punto se puede observar una curva de los potenciales generados según el ángulo de dirección en la Figura i. 1. Se visualiza que en una dirección de 165º se genera el potencial máximo mientras que los potenciales mínimos se generaran en custro direcciones diferentes las cuales son 33,5º, 56º, 261,5º, y 310º, de los cuales es tercero se genera hacia afuera del perímetro del electrodo.

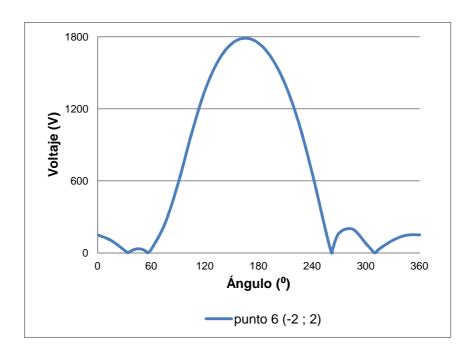


Figura i. 7. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.7 Análisis en el punto siete

Punto siete se formará en el punto medio de la prolongación del lado convexo dos desde el lado interior uno hasta la altura esquina la altura (a/2; a). Los resultados para cada dirección se los tabula y gráfica y se encuentra la Figura i. 8. En este punto se observa que la dirección del paso más peligrosa se genera al dar un paso en la dirección de los 315º, pero un valor muy aproximado (cercano al 2% menor al valor del potencial máximo) a este potencial máximo también se encuentra a la dirección de 222º. Mientras que el potencial menos peligroso se ubica a los 5°.

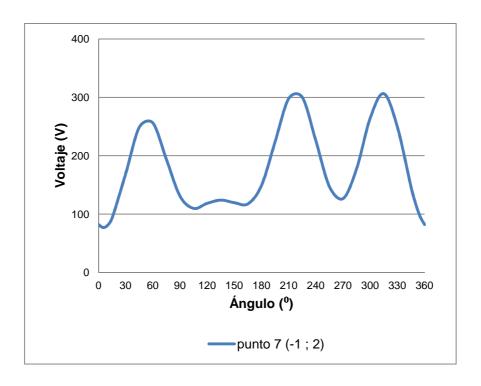


Figura i. 8. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto siete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.8 Análisis en el punto ocho

Punto ocho se ubicará en la intersección de las mediatrices del lado superior y el ancho uno (0; a). Los potenciales generados en este punto según la dirección se encuentran en la Figura i. 9. Se puede observar que en este punto el mayor potencial de paso se obtiene a los 285°, mientras que los potenciales más seguros se obtienen en dos direcciones diferentes la primera a los 157° y la segunda a los 221,4°.

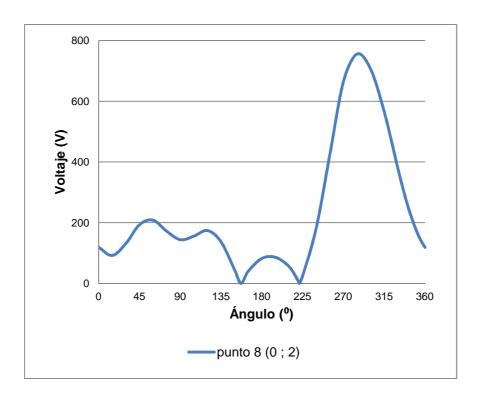


Figura i. 9. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto ocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.9 Análisis en el punto nueve

Este punto se ubicará en la intersección entre las mediatrices generadas en el ancho uno y el lado convexo dos (a/2; a) en que para el caso en referencia que se muestra en la Figura i. 1 coincide con el eje de coordenadas, y los potenciales generados en este punto se los esquematiza en la Figura i. 10 en la cual se observa que las direcciones de los valores máximos son a los 250º estos potenciales son de menor magnitud que en los puntos anteriores, y los potenciales mínimos se encuentran en dos direcciones a los 5,5º, 98,5º, 148º y a los 198,6º, es estas direcciones coinciden desde el punto en estudio en las direcciones hacia el punto medio del ancho uno el primero, el segundo hacia la intersección entre el lado superior y la mediatriz de lado convexo dos, la tercera en dirección al punto medio del lado superior y la ultima dirección es muy cercana a la dirección hacia la intersección de la altura con la prolongación del lado

convexo dos, en la gráfica Figura i. 1 estas direcciones van desde el punto 9 hacia los puntos 10, 4, 3, y 11 respectivamente.

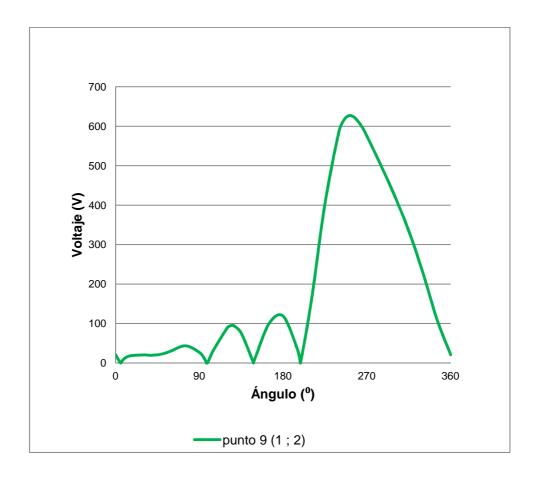


Figura i. 10. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto nueve y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.10 Análisis en el punto diez

Punto diez ubicado sobre el punto medio del ancho uno, y que de forma general en el plano cartesiano tiene unas coordenadas (a; a). El valor de potencial más peligroso se genera al dar un paso en dirección a los 15°, y la dirección para donde se generan los potenciales más seguros es a los 126,5°, 150,2°, 184,3° y a los 267,6°, la generación de potenciales en su totalidad sobre la superficie del suelo se puede observar en la Figura i. 11, este caso los potenciales más seguros

todos se forman hacia el interior del perímetro del electrodo. Una particularidad que se ve es que en las direcciones que se dirigen hacia el lado inferior se forma un aumento nuevamente del voltaje de paso es decir desde 184,3º hasta los 267,6º.

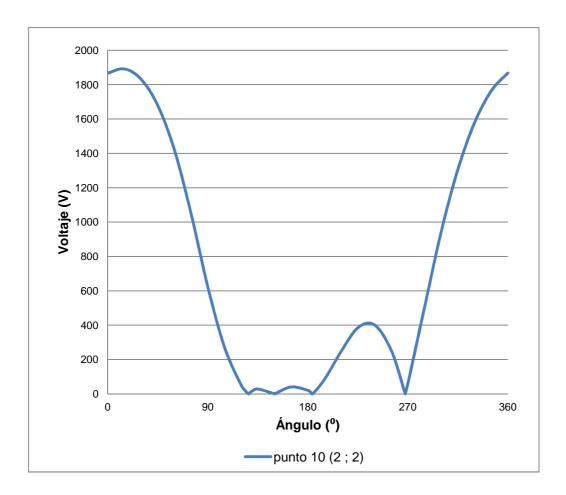


Figura i. 11. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto diez y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.11 Análisis en el punto once

En este análisis se tomará en cuenta la posición del punto once que se ubica en la intersección de la altura con la prolongación del lado convexo dos (-a; a/2).

Evaluando cada dirección posible se obtiene los valores que tabulados se encuentran graficados en la Figura h.12, se puede observar en esta gráfica que la dirección donde se genera el potencial de paso máximo se da a los 180º de inicio del giro y a una dirección anti horaria. Mientras que el potencial más seguro se genera en dos direcciones diferentes a los 266º y a los 300,3º. Se observa que las direcciones hacia el lado inferior desde la altura (punto 1') hasta la intersección del lado inferior con la prolongación del lado interior (punto 3') son un grupo de potenciales generados relativamente bajos y a un promedio de 6º fuera de este parámetro se encuentran los puntos más seguros.

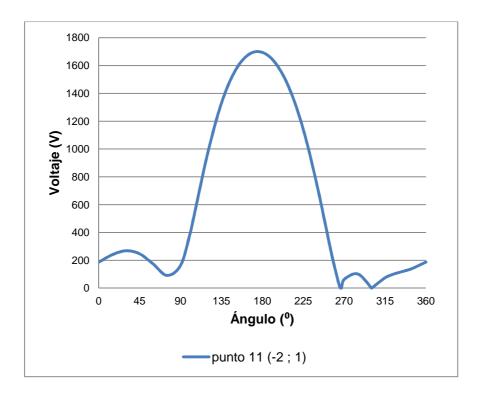


Figura i.12. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto once y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.12 Análisis en el punto doce

Punto doce se ubicará sobre el punto medio de la prolongación del lado convexo dos desde el lado interno hasta la altura (-a/2; a/2). Los potenciales generados en este punto según la dirección se encuentran en la Figura h.13. Se puede observar que en este punto el mayor potencial de paso se obtiene al dar un paso en

dirección a los 345°, además los potenciales de menor magnitud que se generan 40,5° y a los 117,8°. De los resultados obtenidos en este punto se puede concluir que los potenciales son relativamente bajos en relación a los potenciales generados a partir de cualquier punto ubicado en la periferia del electrodo pero de este grupo los potenciales más elevados se generan en dirección hacia la parte inferior del electrodo muy cercano al punto seis hasta el punto 13 de la Figura i. 1.

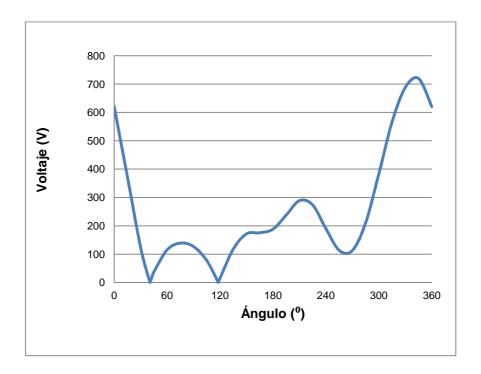


Figura i.13. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto doce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.12 Análisis en el punto trece

Punto trece ubicado sobre el vértice formado entre el lado interior y el lado convexo dos (0; a/2). El potencial más peligroso se genera al dar un paso al interior del perímetro del electrodo específicamente en dirección al vértice entre la altura y el lado superior (punto 1), mientras que los potenciales más bajos se generan a los 6,6°, 256,1°, 294,9° y a los 351,1°, todos los potenciales generados según las direcciones se visualizan en la Figura h.14.

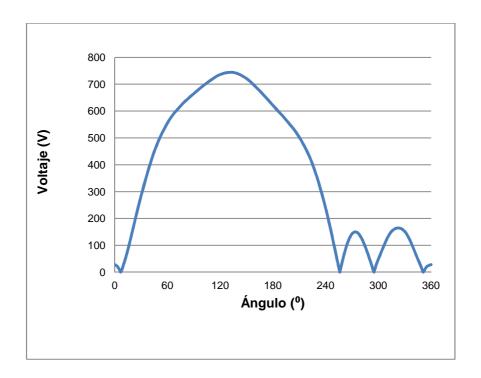


Figura i.14. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto trece y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.14 Análisis en el punto catorce

La ubicación del punto catorce está sobre el punto medio del lado convexo dos (a/2; a/2). La dirección donde se genera el potencial máximo es a los 330°, esto se debe a la particularidad de la distribución de estos electrodos, mientras que los potenciales más seguros se encuentran a los 182,3° y a los 232,8° a partir del origen de este punto de referencia, cada uno de estos puntos en mención se muestran en la Figura h.15.

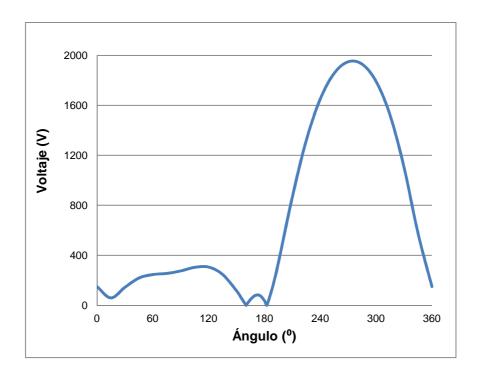


Figura i.15. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto catorce y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.15 Análisis en el punto quince

El punto quince se ubicará sobre el vértice formado entre el ancho uno y el lado convexo dos (a; a/2). La curva generada por cada una de las direcciones a partir de este punto se encuentra en la Figura h.16. De esta gráfica se puede ver que el potencial más peligroso se encuentra al dar un paso en dirección a los 0°, en tanto que el potencial más seguro se obtiene a los 86,9°, y a los 229,2°. Una característica de la figura generada es que hay dos comportamientos diferentes en esta configuración a partir del inicio en el punto 15, una desde los 90° hasta los 270° medidos en sentido anti horario y la otra será las direcciones opuestas a las primeras, las primeras dan una curva con potenciales relativamente bajos en relación a la curva generada por el segundo grupo de direcciones.

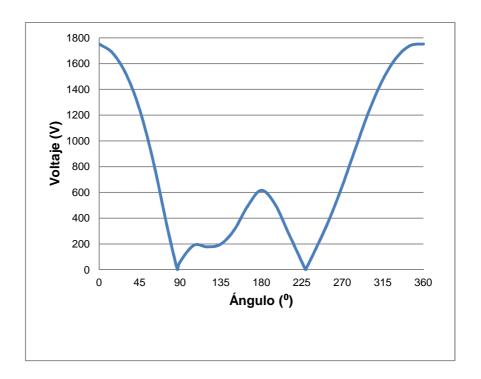


Figura i.16. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto quince y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.16 Análisis en el punto dieciséis

Punto dieciséis se encuentra sobre el punto medio de la altura, este es un punto que forma parte del eje de simetría del electrodo (a; 0). El potencial más peligroso se genera al dar un paso al exterior del electrodo de manera perpendicular a la altura mientras que los potenciales más seguros se obtienen a los 75° y a los 285°. En la gráfica se muestra la simetría existente desde los 180°, tanto hacia la derecha como a la izquierda esto se puede ver en la Figura i.17.

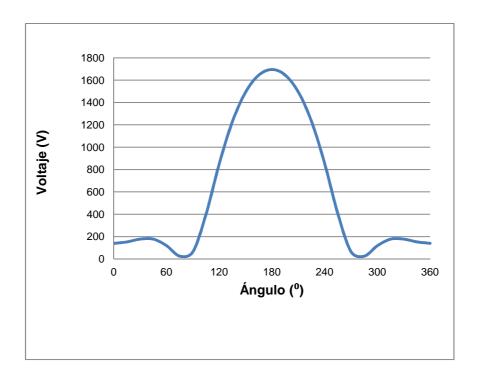


Figura i.17. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto dieciséis y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.17 Análisis en el punto diecisiete

Este punto se ubica en el punto medio de la separación existen entre los puntos medios de la altura y del lado interior (-a/2; 0), en este lugar la dirección a la cual se genera el potencial más peligroso es hasta el punto medio del lado interior, mientras que se generan cuatro potenciales seguros a las direcciones de 70,7°, 117,4°, 242,6° y a los 289,3°, se observa en la Figura i.18, que el eje a partir del los 180° se encuentra una simetría en la gráfica.

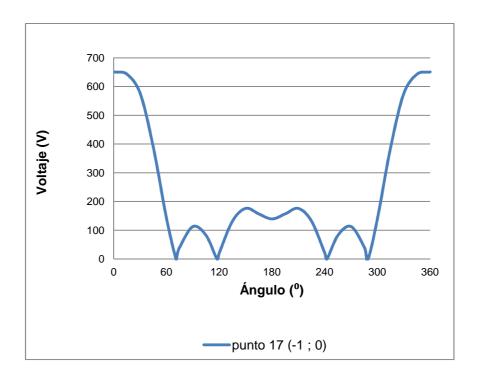


Figura i.18. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto diecisiete y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

i.1.18 Análisis en el punto dieciocho

Este punto se ubica sobre el centro del lado interno, y los potenciales generados a partir de este punto en todas las direcciones se muestran en la Figura i.19, en la cual se observa que el potencial mas levado que se obtiene es al dar un paso en dirección al interior del electrodo perpendicularmente al lado interior, pese a eso se genera un potencial pico relativamente alto alrededor de un 18% menor que el potencial máximo en dirección opuesta a la primera especificada. Mientras que los potenciales más seguros se obtienen a los 60° y a los 300°.

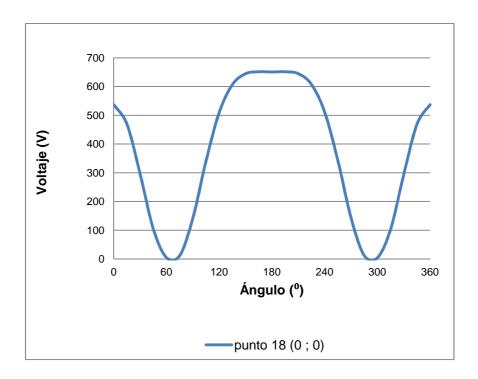


Figura i.19. Relación de voltajes de paso manteniendo el punto inicial en el punto dieciocho y modificando la dirección del punto final en un electrodo con perímetro en C sin jabalinas en los vértices

De todos los potenciales obtenidos en todos los puntos de referencia se concluye que los potenciales más peligrosos se generan al dar un paso al exterior de los lados superior, altura y lado inferior hacia afuera del perímetro del electrodo, pero de estos el de mayor magnitud se encuentra en el punto 5 en dirección a la bisectriz del ángulo mayor formado entre el ancho uno y el lado superior, o su equivalente desde el punto 5'.

Además que no siempre los potenciales de paso mayores son los que se dan al dar un paso al exterior del perímetro del electrodo, en este caso se observa que los potenciales más peligrosos que se generan a partir del lado interior del electrodo tipo C son los que se dan hacia el interior del perímetro del electrodo.

APÉNDICE J

Análisis de potenciales en electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno en base a un rectángulo sin jabalinas en los vértices

En este análisis se tomó como referencia para el reticulado interno rectangular un rectángulo de dimensiones de tres metros de base y dos metros altura, como se muestra en la Figura j. 1.

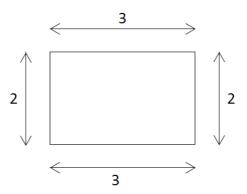


Figura j. 1. Modelo básico de un rectángulo empleado en el reticulado interno de electrodos con perímetro cuadrado

Se analizó en este tipo de configuración los esquemas de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado interno sin jabalinas, con jabalinas en los vértices y con jabalinas en las uniones perimetrales.

Las jabalinas como se demostraron en los capítulos desde el Capitulo 3 hasta el Capitulo 7 tienen influencia únicamente en la magnitud de los potenciales generados mas no en la ubicación de los mismos por lo que en esta parte se emplearon jabalinas de 240 cm.

Se modificó la longitud de los lados de perímetro cuadrado que en referencia será de magnitud "a", tal como se muestra en la Figura j. 2.

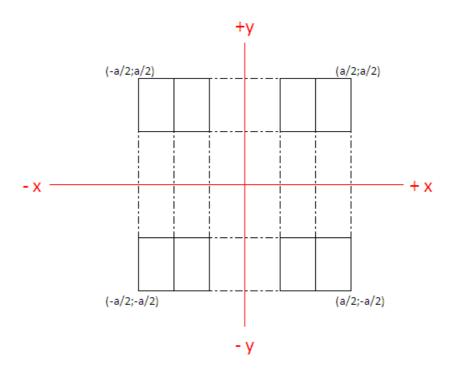


Figura j. 2. Esquema de un electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno rectangular

Para este esquema el lado del perímetro es múltiplo de la longitud de la base y altura del rectángulo del reticulado. Es por esta razón la longitud de los lados del perímetro cuadrado del electrodo en estudio variará en pasos de seis metros hasta llegar a una dimensión de 42 metros del lado de malla.

j.1 Electrodos con perímetro cuadrado con reticulado rectangular interno y sin jabalinas

Los potenciales de punto generados en la superficie de este electrodo se observa en la Figura j. 3.

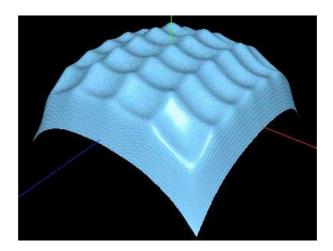


Figura j. 3. Potenciales de punto generados en el suelo sobre la superficie del electrodo con perímetro cuadrado con reticulado interno rectangular sin jabalinas en los vértices de 12 m de lado

El análisis sobre el primer caso se verifica que el potencial de toque es inversamente proporcional al potencial de punto, y la ubicación del potencial de toque mínimo dependerá del numero de cuadriculas internas que se encuentren formando el electrodo, en el caso de que la mitad del total de cuadriculas internas sea par el potencial de toque se encuentra en el centro del electrodo, mientras que si la mitad de este numero de cuadriculas es impar existen dos lugares donde el potencial de toque mínimo se genera, los cuales se ubican en las esquinas del ancho común de los dos cuadriculas internas, para ilustrar estos puntos a manera de ejemplo se muestra un electrodo con perímetro cuadrado de 6 m con cuadricula rectangular de 2 x 3 m sin jabalinas en los vértices. Mientras que el potencial de toque máximo se encuentra en las esquinas del perímetro del electrodo.

El modelo matemático para la ubicación de estos potenciales se expresa en la ecuación [3. 1] y [3. 2] asumiendo que los anchos de los rectángulos que forman el reticulado interno son paralelos al eje X.

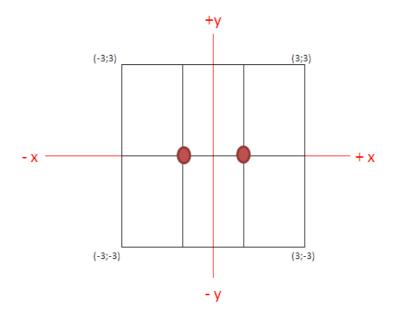


Figura j. 4. Ubicación de los potenciales de toque mínimos generados sobre la superficie del suelo de un electrodo con perímetro cuadrado de 6 m con cuadricula rectangular de 2 x 3 m sin jabalinas en los vértices

$$Vt_{m\acute{a}x} = \left(\pm \frac{a}{2} ; \pm \frac{a}{2} \right)$$
 [J. 1]

$$Vt_{min} = \begin{cases} (0; 0) & si 1/2 \# de \ cuadrilas \ es \ par \\ (\pm \frac{a}{2}; 0) & si 1/2 \# de \ cuadrilas \ es \ impar \end{cases}$$
[J. 2]

Gráficamente la relación de los potenciales máximos y mínimos para varias magnitudes de lado, se muestra en la Figura j. 5.

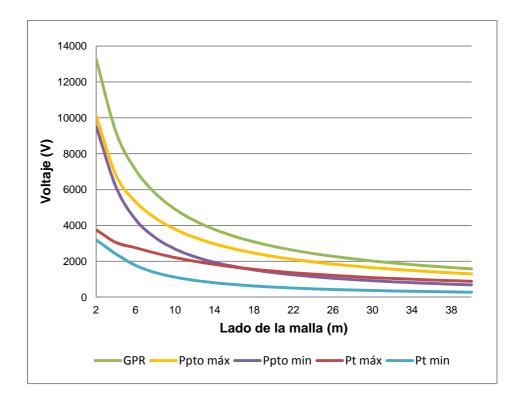


Figura j. 5. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado rectangular sin jabalinas

j.2 Electrodos con perímetro cuadrado con reticulado rectangular interno y con jabalinas en los vértices

Esta configuración tiene un comportamiento de los potenciales de punto sobre la superficie del suelo, similar al expuesto en la Figura j. 6, Analizando este tipo de configuración se encontró que los potenciales máximos y mínimos mantienen idéntica ubicación al del esquema de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado rectangular interno y sin jabalinas en los vértices, solo disminuye la magnitud de los potenciales obtenidos.

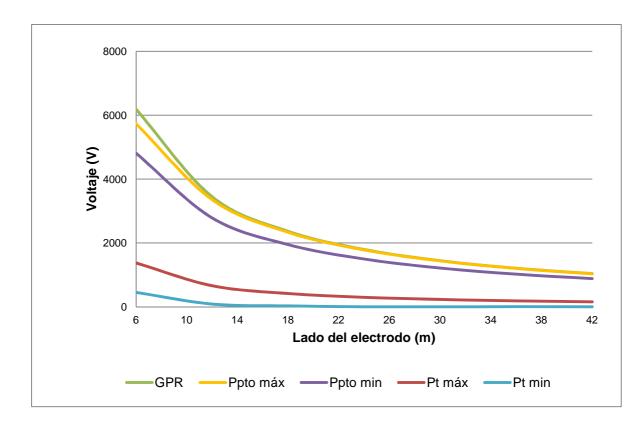


Figura j. 6. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado rectangular con jabalinas de 240 cm en los vértices

j.3 Electrodos con perímetro cuadrado con reticulado rectangular interno y con jabalinas en las uniones perimetrales

Mantiene análoga relación para la ubicación de los potenciales de toque máximos y mínimos generados que los casos anteriores, la magnitud de los potencias disminuye y se muestra en la Figura j. 7.

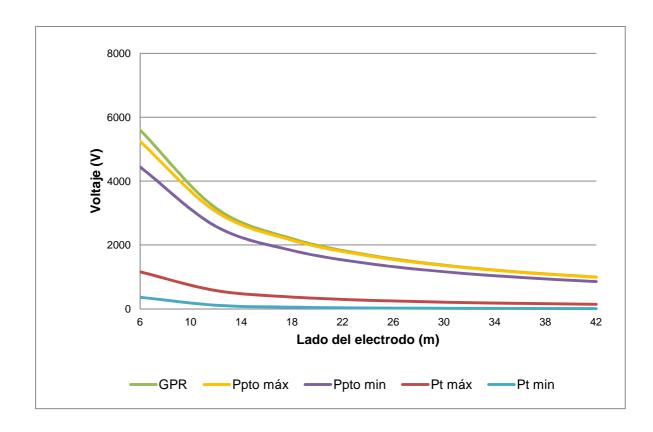


Figura j. 7. Potenciales máximos y mínimos en varias medidas de electrodos con perímetro cuadrado con reticulado rectangular con jabalinas de 240 cm en las uniones perimetrales

Del análisis realizado si se compara con el reticulado en base a un cuadrado se concluye que los resultados obtenidos son similares, pero se debe tomar en cuenta la ubicación de las bases para relacionar con el reticulado cuadrado.