



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA**

**AUTOR: PARDO ROMERO WILSON ANTONIO**

**TEMA: “DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA Y  
APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS PARA PROTECCIÓN  
DE PERSONAS Y EQUIPOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS  
FUERZAS ARMADAS-ESPE CAMPUS GENERAL RODRÍGUEZ  
LARA”**

**DIRECTOR: ING. WASHINGTON FREIRE**

**CODIRECTOR: ING. PABLO MENA**

**Latacunga, mayo del 2014**

**UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS - ESPE**  
**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**CERTIFICADO**

ING. WASHINGTON FREIRE (DIRECTOR)

ING. PABLO MENA (CODIRECTOR)

**CERTIFICAN:**

Que el trabajo titulado “DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA Y APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS PARA PROTECCIÓN DE PERSONAS Y EQUIPOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE CAMPUS GENERAL RODRÍGUEZ LARA” realizado por PARDO ROMERO WILSON ANTONIO, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, SI recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN documento empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat. Autorizan a PARDO ROMERO WILSON ANTONIO que lo entregue al Ing. Wilson Sánchez O., en su calidad de Director de la Carrera.

Latacunga, mayo del 2014

---

Ing. Washington Freire  
DIRECTOR

---

Ing. Pablo Mena  
CODIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS - ESPE  
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD**

Yo, PARDO ROMERO WILSON ANTONIO

**DECLARO QUE:**

El proyecto de grado denominado **“DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA Y APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS PARA PROTECCIÓN DE PERSONAS Y EQUIPOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE CAMPUS GENERAL RODRÍGUEZ LARA”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, mayo del 2014

---

Wilson Pardo Romero

CC: N°.- 0705278828

**UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS-ESPE  
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, PARDO ROMERO WILSON ANTONIO

**AUTORIZO:**

Autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS-ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “**DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA Y APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS PARA PROTECCIÓN DE PERSONAS Y EQUIPOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE CAMPUS GENERAL RODRÍGUEZ LARA**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, mayo del 2014

---

Wilson Pardo Romero

CC: N°.- 0705278828

## **DEDICATORIA**

Dedicado a quienes creen y más a quienes no creen en mí, para que el título que adquiero sea constancia y ejemplo, de que en la vida, cumplir cualquier meta es posible, si se tiene claro que los únicos obstáculos que juegan en nuestra contra somos nosotros mismos y la cantidad de empeño que ponemos para lograr vencernos.

## **AGRADECIMIENTO**

A quienes aportaron desde la más mínima cantidad de dinero y otros bienes para mi estadía en la universidad, a los profesores que me inculcaron el deseo por seguir aprendiendo, a mi director y codirector de tesis por su seguimiento e interés en el presente proyecto.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CARÁTULA.....</b>	<b>i</b>
<b>CERTIFICADO .....</b>	<b>ii</b>
<b>DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 ALCANCE .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1 TÉRMINOS Y ABREVIACIONES UTILIZADOS EN LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA A DISEÑAR.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3 PARTES BÁSICAS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>6</b>

<b>2.1.4 TIPOS DE SOBREVOLTAJE Y SEÑALES PERJUDICIALES PARA EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.5 INFLUENCIA DE CORRIENTES PELIGROSAS EN LAS PERSONAS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.6 TIPOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.7 INFLUENCIA DE APARATOS ELECTRÓNICOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.8 FILTROS, SUPRESORES Y BLINDAJES Y SU RELACIÓN CON LOS SPT.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.9 FACTORES NATURALES DEL TERRENO QUE INFLUYEN EN LA PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.10 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.11 INCIDENCIA DE LA SEPARACIÓN Y LA PROFUNDIDAD DE ELECTRODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.12 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN GRANDES AREAS .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.13 EQUIPOTENCIALIDAD.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.14 SELECCIÓN DE SPT PARA DIFERENTES TIPOS DE CARGA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.15 ESQUEMAS DE INTERCONEXIÓN O UNIÓN DE DIFERENTES SPT .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA MALLA A TIERRA.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.1 PARÁMETROS DE LOS CONDUCTORES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL SPT.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.2 VALORES DE RESISTENCIA REQUERIDOS EN LOS DIFERENTES TIPOS DE MALLAS.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.3 INDICADORES DE CALIDAD PARA UNA MALLA A TIERRA.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.4 ESQUEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA (ECT).....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.5 IMPORTANCIA DE LA UBICACIÓN DE LAS MALLAS DEL SISTEMA .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.6 ÁREA DISPONIBLE .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.7 VARIOS VOLTAJES DE DISTRIBUCIÓN EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.8 INCIDENCIA DE LA LONGITUD DE LA VARILLA .....</b>	<b>40</b>



2.2.9 VALOR DE $D_f$ .....	40
2.2.10 VALOR DE $S_f$ PARA UNA MALLA DE PROTECCIÓN .....	40
2.2.11 CAPA SUPERFICIAL.....	41
2.3 FUNDAMENTO TEÓRICO DE APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	41
2.3.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPCR) .....	42
2.3.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	42
2.3.3 EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE LA INCIDENCIA DE DESCARGA O RIESGO DE EXPOSICIÓN EN UNA INSTALACIÓN .....	44
2.3.4 ÍNDICE DE RIESGO.....	45
2.3.5 APANTALLAMIENTO ELÉCTRICO TIPO FRANKLIN.....	47
2.3.6 ZONAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	48
2.3.7 MÉTODOS PARA MARCAR LA ZONA A PROTEGER CON UN PARARRAYOS .....	49
2.3.8 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN PARARAYOS .....	52
2.4 PARÁMETROS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS .....	56
 CAPÍTULO 3.....	 57
RECOPIACIÓN DE DATOS DE DISEÑO.....	57
3.1 LEVANTAMIENTO DE DIAGRAMAS Y PLANOS DEL CAMPUS.....	57
3.1.1 DATOS DE LA ETAPA 1 DEL CAMPUS GRAL. RODRÍGUEZ L.....	57
3.1.2 DIAGRAMAS UNIFILARES Y PLANOS DEL PROYECTO ESPE - CAMPUS GRAL. RODRÍGUEZ LARA.....	58
3.1.3 DATOS OBTENIDOS DE LOS LITERALES ANTERIORES.....	59
3.2 MEDICIONES Y PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO (MÉTODO DE WENNER) .....	61

<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>63</b>
<b>DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1 DISEÑO DE LA MALLA A TIERRA PARA LA CÁMARA CT-03 (PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN).....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.1 CONSTANTES Y VARIABLES EMPLEADAS EN EL DISEÑO.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.2 CÁLCULOS EN EL DISEÑO DE UNA MALLA A TIERRA .....</b>	<b>66</b>
<b>4.2 DIMENSIONAMIENTO DE APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS BLOQUE DE AULAS C-D.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.1 DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE PROTECCIÓN.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA EVALUAR LA ZONA DE PROTECCIÓN .....</b>	<b>78</b>
<b>4.3 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN REQUERIDO POR EL EDIFICIO.....</b>	<b>79</b>
<b>4.4 ÁNGULO DE PROTECCIÓN.....</b>	<b>79</b>
<b>4.5 SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL PARARRAYOS.....</b>	<b>79</b>
<b>4.6 ZONA A PROTEGER Y SUS MEDIDAS .....</b>	<b>80</b>
<b>4.7 CÁLCULO DE LAS ALTURAS DEL PARARRAYOS.....</b>	<b>81</b>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>84</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>84</b>
<b>5.1 DIMENSIONES DE LAS MALLAS A TIERRA EMPLEADAS PARA TODO EL PROYECTO .....</b>	<b>84</b>
<b>5.2 DIMENSIONES, UBICACIONES Y TIPOS DE APANTALLAMIENTO SEGÚN EL DISEÑO .....</b>	<b>86</b>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>88</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROYECTO .....</b>	<b>88</b>
<b>6.1 SIMULACIÓN DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MEDIANTE EL SOFTWARE ETAP 12.00 .....</b>	<b>88</b>

6.1.1 ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO PARA EL BLOQUE DE AULAS AB, SIN CONSIDERAR AL RESTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. (TRANSFORMADOR CT -06).....	89
6.1.2 ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO PARA EL BLOQUE DE AULAS AB, CONSIDERANDO TODO EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. (TRANSFORMADOR CT -06) - Figura 6. 2.....	89
6.2 SIMULACIÓN DE SPT MEDIANTE EL SOFTWARE ETAP 12.00.....	91
6.2.1 VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE LA MALLA TE-6 UPS1 POR EL MÉTODO IEEE (DEFAULT) .....	91
6.2.2 VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE LA MALLA TE-6 UPS1 POR EL MÉTODO IEEE CON LOS VALORES REALES DEL SISTEMA...	92
6.2.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS UNIDOS O SEPARADOS MEDIANTE EL MÉTODO FEM DEL SOFTWARE ETAP .....	93
6.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE MEJORAN NOTABLEMENTE EL DISEÑO DE UNA MALLA .....	99
6.4 ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE UNA CAPA SUPERFICIAL .....	100
6.5 ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE PARARRAYOS SEGÚN EL MÉTODO DE LAS ESFERAS RODANTES .....	100
6.6 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APU) PARA LA OBTENCIÓN DE COSTOS .....	102
6.6.1 SPT A IMPLEMENTAR Y LA EVALUACIÓN DE SU COSTO.....	102
6.6.2 SISTEMAS DE APANTALLAMIENTOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS A IMPLEMENTAR Y LA EVALUACIÓN DE SU COSTO .....	103
6.6.3 COSTO DEL PROYECTO .....	104
6.6.4 FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ESTUDIO.....	104
 CAPÍTULO 7.....	 105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
7.1 CONCLUSIONES .....	105
7.2 RECOMENDACIONES .....	106

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>108</b>
<b>NETGRAFÍA.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>112</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2. 1: Términos y abreviaciones empleadas en el presente diseño .....</b>	<b>5</b>
<b>Tabla 2. 2: Valores típicos de Df.....</b>	<b>13</b>
<b>Tabla 2. 3: Efectos físicos del choque eléctrico.....</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 2. 4: Corrosión Vs. Resistividad.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2. 5: Conductor del electrodo de tierra en instalaciones de C.A.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 2. 6: Dimensiones de los conductores de puestas a tierra .....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 2. 7: Conductores de cobre reales utilizados para puesta a tierra.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 2. 8: Constantes para los materiales de los conductores.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 2. 9: Valores de referencia para la resistencia de puestas a tierra .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 2. 10: Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 2. 11: Valores aconsejables para la resistencia de puesta a tierra .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 2. 12: Acabados superficiales .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 2. 13: Valores GFD aproximados alrededor del mundo en donde se relaciona con el nivel isocerámico por año .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 2. 14: Ventanas de protección típicas .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 2. 15: Cálculo del índice de riesgo. Coeficiente “a”.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 2. 16: Cálculo del índice de riesgo. Coeficiente “c” .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 2. 17: Colocación del dispositivo captor en función del nivel de Protección .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 2. 18: Requisitos mínimos para materiales de clase I .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 2. 19: Requisitos mínimos para materiales de clase II.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 3. 1: Distribución de potencia del bloque de aulas A-B .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 3. 2: Distribución de potencia de la Biblioteca .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 3. 3: Distribución de potencia de las Residencias.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 3. 4: Impedancias porcentuales típicas de los transformadores de acuerdo a su potencia nominal .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 3. 5: Características técnicas del Sistema eléctrico .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 3. 6: Abastecimiento de las dependencias (Necesidad de SPT y apantallamientos eléctricos contra descargas atmosféricas).....</b>	<b>60</b>
<b>Tabla 3. 7: Datos obtenidos en las mediciones.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 4. 1: Constantes y variables de diseño .....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 5. 1: Parámetros de construcción de las configuraciones de malla empleadas en el proyecto .....</b>	<b>84</b>
<b>Tabla 5. 2: Resultados de las mallas propuestas en la Tabla 3. 6, de acuerdo al color y parámetros de la Figura 5. 1 .....</b>	<b>85</b>
<b>Tabla 5. 3: Tierras para los pararrayos según la dependencia a proteger .....</b>	<b>86</b>
<b>Tabla 5. 4: Altura de pararrayos según la dependencia a proteger de acuerdo al ANEXO F .....</b>	<b>87</b>

<b>Tabla 6. 1: Variables y operaciones en ellas, para mejorar la resistencia calculada de la malla.</b> .....	99
<b>Tabla 6. 2: Análisis de las mallas a implementar</b> .....	102
<b>Tabla 6. 3: Análisis de la malla a implementar para el generador de emergencia</b> .....	103
<b>Tabla 6. 4: Costo de la implementación de todos los sistemas de mallas a tierra</b> .....	103
<b>Tabla 6. 5: Análisis de los apantallamientos y sus SPT a implementar para diferentes edificaciones</b> .....	103
<b>Tabla 6. 6: Costo total final</b> .....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2. 1: Partes básicas de una puesta a tierra</b> .....	6
<b>Figura 2. 2: Cortocircuito simétrico</b> .....	11
<b>Figura 2. 3: Cortocircuito asimétrico</b> .....	11
<b>Figura 2. 4: Falla asimétrica (Factor de potencia y factor de asimetría)</b> .....	12
<b>Figura 2. 5: Valores característicos de la corriente de cortocircuito</b> .....	14
<b>Figura 2. 6: Voltaje de paso en una persona</b> .....	16
<b>Figura 2. 7: Voltaje de toque en una persona</b> .....	16
<b>Figura 2. 8: Tensión de transferencia</b> .....	17
<b>Figura 2. 9: Esquema del método de Wenner</b> .....	24
<b>Figura 2. 10: Zona de influencia de un electrodo y capas superficiales de la tierra</b> .....	24
<b>Figura 2. 11: Ubicación de electrodos y variación en las mediciones</b> .....	25
<b>Figura 2. 12: Perfiles (A,B,C,D,E y F) sugeridos en un area cruzada por una línea de transmisión</b> .....	26
<b>Figura 2. 13: SPT en grandes áreas</b> .....	28
<b>Figura 2. 14: Clasificación de los sistemas de tierra físicamente separados</b> .....	29
<b>Figura 2. 15: Clasificación de los sistemas de tierra físicamente conectados</b> .....	30
<b>Figura 2. 16: Representación esquemática de equipos puestos a tierra en un sistema mallado</b> .....	32
<b>Figura 2. 17: Sistemas de distribución con interconexión de sus diferentes SPT (sin incluir fases y neutro)</b> .....	33
<b>Figura 2. 18: Regímenes de conexión a tierra</b> .....	38
<b>Figura 2. 19: Descarga nube – tierra</b> .....	43
<b>Figura 2. 20: Cálculo del índice de riesgo. Mapa isocerámico - Coeficiente “b”</b> .....	46
<b>Figura 2. 21: Zona protegida cónica</b> .....	50
<b>Figura 2. 22: Aplicación esquemática del método de la esfera rodante en una superficie muy irregular</b> .....	50
<b>Figura 2. 23: Radio de la esfera rodante, altura del pararrayo y ángulo de protección</b> .....	51
<b>Figura 2. 24: Instalación de varillas pararrayos</b> .....	52

<b>Figura 2. 25: Esfera rodante área de protección entre pararrayos</b> .....	53
<b>Figura 2. 26: Curvatura de los conductores</b> .....	54
<b>Figura 4. 1: Dimensiones elegidas para el área de la malla (m)</b> .....	71
<b>Figura 4. 2: Nivel Vs. Ángulo de protección</b> .....	79
<b>Figura 4. 3: Forma geométrica a proteger</b> .....	80
<b>Figura 4. 4: Dimensiones del contorno del edificio – Vista superior</b> .....	80
<b>Figura 4. 5: Altura del edificio a proteger y forma de dimensionar sus apantallamientos</b> .....	82
<b>Figura 5. 1: Descripción por colores de las mallas según la Tabla 5. 1</b> .....	84
<b>Figura 6. 1: Diagrama del sistema de distribución del transformador CT-06 sin considerar el resto del sistema de distribución</b> .....	89
<b>Figura 6. 2: Diagrama del sistema de distribución de la Universidad De Las Fuerzas Armadas – ESPE Latacunga</b> .....	90
<b>Figura 6. 3: Malla TE-6 UPS1 dimensionada en ETAP</b> .....	91
<b>Figura 6. 4: Resultados obtenidos mediante simulación por default para la malla TE-6 UPS1</b> .....	91
<b>Figura 6. 5: Resultados obtenidos mediante la opción Grd Study case editor</b> ...	93
<b>Figura 6. 6: SPT de servicio y pararrayos del bloque de aulas AB</b> .....	94
<b>Figura 6. 7: Dos varillas de tierra pararrayos conectadas (bloque de aulas AB) dimensionadas en ETAP</b> .....	94
<b>Figura 6. 8: Resultado obtenido mediante simulación</b> .....	95
<b>Figura 6. 9: Dos varillas de tierra pararrayos separadas (bloque de aulas AB) dimensionadas en ETAP</b> .....	95
<b>Figura 6. 10: Resultado de la presente simulación</b> .....	96
<b>Figura 6. 11: Voltaje de paso que excede el voltaje tolerable</b> .....	96
<b>Figura 6. 12: Voltaje de toque que excede el voltaje tolerable</b> .....	97
<b>Figura 6. 13: Voltaje absoluto disipado por la malla</b> .....	97
<b>Figura 6. 14: Malla a tierra de pararrayos y TE-6 UPS1 sin cerrar su lazo de unión (Resultado correcto)</b> .....	98
<b>Figura 6. 15: Malla a tierra de pararrayos y TE-6 UPS1 que forman un lazo cerrado (Resultado correcto)</b> .....	98
<b>Figura 6. 16: Zona de protección para un edificio</b> .....	101
<b>Figura 6. 17: Zona de protección para un edificio que por su gran longitud necesita de varios pararrayos, o de un pararrayos de gran altura.</b> .....	101
<b>Figura 6. 18: Zona de protección para un edificio que por su gran altura necesita varios pararrayos o un pararrayos de mayor altura.</b> .....	101
<b>Figura 6. 19: Varios pararrayos para proteger varios edificios y zonas aledañas</b> .....	102

## RESUMEN

En el proyecto se expresa las definiciones y los procedimientos necesarios para el diseño de sistemas de puesta a tierra y apantallamientos eléctricos, basados en un conjunto de normas aplicables regidas por la empresa eléctrica Cotopaxi S.A. Mediante el levantamiento de diagramas unifilares (tipo de carga, forma de distribución eléctrica), plano topográfico, plano masa, ubicación y estructura de las edificaciones a proteger, se procede a seleccionar la posición de las mallas a tierra para medir la resistencia del suelo en dichas ubicaciones.

Según los resultados del levantamiento más los resultados de las mediciones, se realiza el diseño de todas las mallas puestas a tierra y los apantallamientos eléctricos que se requieran en el campus de la Universidad De Las Fuerzas Armadas – ESPE Extensión Latacunga. Con la culminación del diseño, éste será analizado mediante un software certificado para determinar si las diferentes formas de conexión recomendadas son correctas, además se presentará una simulación de flujo eléctrico y el cálculo de las corrientes de cortocircuito en una proyección de lo que sería el diagrama unifilar del campus, los resultados de la simulación servirán para identificar si el presente diseño se encuentra bien dimensionado o si éste no cumple con las expectativas deseadas. Por medio de un análisis de resultados se realizarán de ser necesarias las respectivas correcciones en el diseño, para así proceder analizar el costo que representaría la implementación del proyecto.

**Palabras clave:** Puesta a tierra, resistencia, malla, apantallamiento, pararrayo.



## SUMMARY

In this project expressed necessary definitions and procedures for the design of grounding system and electrical shields, based on grouping applicable standards governed by the electric company Cotopaxi S.A. By lifting of unifilar diagrams (load type, electrical distribution form), topographic plane, mass plane, location and buildings's structure to be protect, is proceed to select the position of the ground grid to measure the soil resistance in those locations

According to the lifting results more the measurements results, be perform the design of all ground grids and the electrical shields as required in the campus of the university of the armed forces - ESPE Latacunga extensión. With the completion of the design, this will be analyzed by a certificated software for determine if the different forms of recomendaded connections are correct, also will be show a electrical flow simulation and the calculation of the short circuit currents in a projection what will be the unifilar diagram of the campus, the results of simulation will serve for identify if the present design is found properly sized or if this not satisfy the desired expectations. Through an analysis of results will be made if necessary the corresponding corrections in the design, and proceed to analyze the cost would represent the implementation of the project.

**Keywords:** Ground, resistance, grid, shielding, lighting rod

## CAPÍTULO 1

### GENERALIDADES

Actualmente la energía eléctrica está presente en casi todas las actividades cotidianas que realizan las personas, debido a esto la tendencia a tener un contacto físico directo o indirecto con la corriente eléctrica es evidente, más aun para quienes trabajan con electricidad la mayor parte del tiempo, como estudiantes en laboratorios modernos, personal de las empresas eléctricas o los trabajadores del sector industrial. Todo ser humano puede estar en potencial peligro, ocasionado por fallas en un sistema eléctrico, descuidos humanos e incluso imprevistos de procedencia natural como lo son las descargas atmosféricas.

Garantizar la seguridad total de las personas es casi imposible; pero se puede disminuir en gran parte el riesgo de accidentes eléctricos mediante varios métodos, uno de ellos es la implementación de un sistema de puestas a tierra que tiene como objetivo principal la protección de vidas humanas y luego el factor económico que se centra en proteger equipos eléctricos y electrónicos, que podrían representar un valor significativo dependiendo de su costo.

Las funciones básicas y principales a la vez, en un sistema de puesta a tierra son dos:

- Proveer un trayecto de baja resistencia para disipar de manera segura cualquier carga o potencial no deseado.
- Servir como “punto de referencia” aproximadamente igual al potencial de la tierra para equipo sensitivo.

Según lo anteriormente mencionado un sistema de puesta a tierra con una resistencia baja mantendrá el equipo a un potencial muy cerca a cero de la tierra, reduciendo cualquier diferencia de voltaje entre equipos o personas y “tierra”.

## 1.1 ANTECEDENTES

Una de las formas de protección eléctrica como los sistemas de puestas a tierra en sus inicios, fueron prohibidos por falta de investigación. En la actualidad la ciencia en sistemas de puestas a tierra ha evolucionado, de tal manera que ahora son un requisito indispensable en toda instalación eléctrica, e incluso se ha establecido una normativa internacional para contribuir en el diseño e instalación de este tipo de sistemas, que sirven como elemento de protección para equipos y personas permitiendo:

- Contribuir en la descarga de perturbaciones eléctricas mediante la instalación de filtros pasivos en paralelo para una carga no lineal.
- Colaborar en la protección de equipos ante sobre voltaje y transitorios, junto con dispositivos Supresores de Picos Transitorios de sobretensión (SPT), ya que el daño al equipo sensitivo de telecomunicaciones causado por rayos u otros tipos de sobrevoltajes puede resultar en la pérdida de millones de dólares por daños y tiempo de inactividad.
- En conjunto con un blindaje en el cableado eléctrico disminuyen las descargas electrostáticas, descargas electromagnéticas, y ruido eléctrico en equipos eléctricos y de telecomunicaciones.
- Ofrecer paz mental. Cuando la resistencia de aterramiento está baja, el equipo, el personal y las inversiones financieras están protegidos.

Otro aspecto importante en un sistema de protección eléctrico son los apantallamientos contra rayos, que junto con un sistema de puesta a tierra garantizan que al presentarse un rayo en una edificación, no se produzcan daños en la misma (desprendimiento de material o incendios), como tampoco daños a personas y equipos. La importancia de un buen sistema de puesta a tierra se debe analizar y diseñar individualmente, basándose en condiciones específicas del suelo donde se va a instalar y del sitio para el que se va a implementar.

Para ser efectivo, un sistema de puesta a tierra debe ser estable y confiable en todas las condiciones ambientales adversas, debe ser libre de mantenimiento, y tener una esperanza de vida larga sin costos recurrentes.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar sistemas de puestas a tierra y apantallamientos eléctricos para protección de personas y equipos de la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga- Campus Gral. Rodríguez Lara.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Levantamiento de un diagrama unifilar de la ESPE-L
- Diseño de puestas a tierra y apantallamientos eléctricos
- Simulación de flujos en el sistema eléctrico de distribución
- Estudio técnico - económico para la implementación del proyecto a realizar.

## **1.3 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN**

La seguridad humana en instalaciones eléctricas es un requisito primordial. Cualquier institución seria debe interesarse por la seguridad de personas ante cualquier eventualidad que signifique un riesgo para la salud, y mucho más si éste es mortal. Un riesgo que fácilmente podría causar la muerte a pesar de ser inusual, son las descargas atmosféricas. En cuanto a equipos, como forma de protección es importante cuidar el aislamiento de estos, que se podría ver afectado por variaciones de voltaje de diversos orígenes o por fallas eléctricas.

En los laboratorios de la institución:

- Una señal eléctrica de alimentación es comúnmente afectada por causas como ruido eléctrico, descargas electromagnéticas, descargas electrostáticas y componentes armónicos, que interfieren con el funcionamiento de los equipos eléctricos, electrónicos y la fuente que los alimenta. Como ejemplo: Una señal limpia es de gran importancia para la alimentación de equipos electrónicos que si no trabajan con su voltaje nominal podrían variar su funcionamiento y como consecuencia los resultados en las prácticas de los estudiantes. Un buen sistema de puestas a tierra en conjunto con otros métodos como la instalación de filtros pasivos en paralelo y blindaje en el cableado reducirían la deformación de las señales eléctricas.
- Los equipos eléctricos de potencia empleados en el laboratorio de alto voltaje necesitan de una señal de referencia para su funcionamiento, además de un punto de descarga para las cargas eléctricas estáticas que se alojan en ellos luego de haber sido ocupados en las prácticas, ya que los estudiantes suelen estar expuestos al contacto directo con estos equipos.

En la actualidad en nuestro país el sistema de educación superior exige que las universidades cumplan con diversos requisitos, entre ellos se destacan la seguridad y el medio ambiente, Un sistema de puestas a tierra cubre en gran parte lo referente a seguridad eléctrica.

## **1.4 ALCANCE**

El proyecto presentará una investigación ordenada en cuanto a tipos de puestas a tierra y apantallamientos eléctricos, detallando cuales se emplearán en el diseño del sistema eléctrico del Campus General Rodríguez Lara. Con la culminación de éste trabajo la institución educativa contará con la protección eléctrica, dada por conexiones a tierra, que servirá como pauta y clara referencia para futuras modificaciones e implementación de sistemas puestos a tierra en las instalaciones eléctricas de la institución.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1 SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA

##### 2.1.1 TÉRMINOS Y ABREVIACIONES UTILIZADOS EN LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA A DISEÑAR

Para resumir el presente proyecto se creó la siguiente tabla:

**Tabla 2. 1: Términos y abreviaciones empleadas en el presente diseño**

<b>Abreviación</b>	<b>Término y su definición</b>
<b>TS</b>	Puesta a tierra de la red
<b>TR</b>	Puesta a tierra de pararrayos
<b>TP</b>	Puesta a tierra de protección
<b>TE</b>	Puesta a tierra especial
<b>SPT</b>	Sistema de puesta a tierra
<b>SPTS</b>	Sistema de puesta a tierra de la red
<b>SPTR</b>	Sistema de puesta a tierra para rayos
<b>SPTP</b>	Sistema de puesta a tierra de protección
<b>SPTE</b>	Sistema de puesta a tierra especial

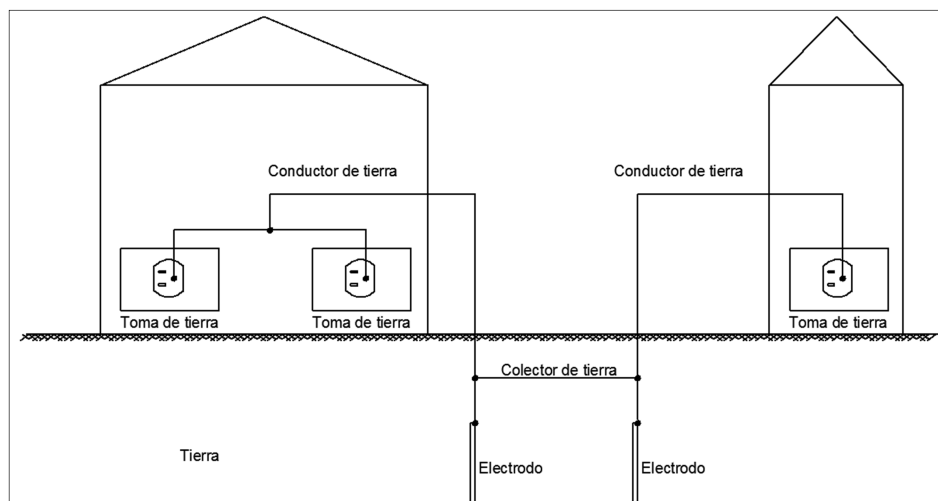
**Elaborado por: Wilson Pardo**

##### 2.1.2 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Una puesta a tierra es la conexión conductora, por medio de la cual un circuito eléctrico o conjunto de elementos metálicos que proporcionan un contacto eléctrico conductivo se conectan a tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de tierra. Para considerar un SPT como

tal, éste debe cumplir cierta normativa, comúnmente establecida por la empresa de suministro de energía eléctrica.

### 2.1.3 PARTES BÁSICAS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA



**Figura 2. 1: Partes básicas de una puesta a tierra**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

#### a. TOMA DE TIERRA

Es un punto físico donde se conectan los equipos y sirve para evitar el paso de corriente al personal por algún fallo de aislamiento.

#### b. CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA

**b.1 Conductor a tierra.-** Es el aparato mecánico de conexión para partes puestas a tierra de un circuito eléctrico, dicha conexión se da entre el punto físico a ser aterrizado y el electrodo de tierra. Es capaz de soportar durante un tiempo específico corrientes eléctricas en condiciones anormales como las de un cortocircuito, pero no se requiere para conducir corriente eléctrica en condiciones normales del circuito eléctrico.

**b.2 Colector de tierra.-** Es un conductor puesto a tierra que se encarga de la comunicación del sistema exterior con la barra equipotencial, para de ahí distribuirse a los equipos. Su selección se realiza teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Magnitud de la corriente inicial asimétrica de falla a tierra.
- Duración de la corriente de falla a tierra.
- Elevación máxima permisible de temperatura.

Estos conductores también se encargan de unir las masas al neutro de la red o a otras masas, a ciertos elementos metálicos distintos de las masas o a un relé de protección (Diferencial entre tierra y el sistema).

### **c. MALLA DE TIERRA**

Es un conjunto de conductores que permiten conectar un sistema a un medio de referencia.

### **d. TIERRA** (UTE Servicios al cliente, 2010)

Cuerpo capaz de mantener estable su potencial, sin importar la cantidad de cargas eléctricas que se le inyecten, absorbiendo y disipando las corrientes indeseables, brindando protección y limitando los problemas de ruido y diafonía, adicionalmente sirve de referencia eléctrica (voltaje cero).

### **e. ELECTRODO O PICAS**

Partes metálicas enterradas (como preferencia un material con buena conductividad eléctrica)



**e.1 Naturaleza de los electrodos** <sup>(UTE Servicios al cliente, 2010)</sup>.- Los electrodos pueden ser artificiales o naturales. Se entiende por electrodos artificiales los establecidos con el objeto de obtener la puesta a tierra, y por electrodos naturales las masas metálicas que puedan existir enterradas. Los cuerpos que pueden ser considerados como electrodos son:

- Los electrodos simples como barras, tubos, placas, cables, pletinas u otros perfiles, preferentemente de cobre.
- Los anillos de tierra o mallas metálicas, formados por electrodos simples o por la combinación de ellos.

Los electrodos deben estar constituidos por metales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno, metales como el cobre, el hierro o acero galvanizado, hierro sin galvanizar con protección catódica o fundición de hierro.

**e.2 Estructuras o sistemas metálicos subterráneos cercanos considerados como electrodos** <sup>(RUELSA, 2007)</sup>.- Una puesta a tierra comúnmente puede estar formada por el siguiente tipo de electrodos:

- **Estructura metálica del inmueble:** Para usar la estructura metálica de un edificio, su impedancia a tierra debe ser baja. Para lograr esto, se deben unir las columnas a las partes metálicas de la cimentación con conductores según los calibres de los conductores de puesta a tierra normalizados, y en caso de haber sellos por películas plásticas se deben unir estos.
- **Electrodo empotrado en concreto:** En las estructuras nuevas, se utiliza el acero del concreto armado como varilla de tierra principal, siempre y cuando la cimentación se haya diseñado con ese objetivo con los cables de tierra adecuados soldados a las varillas. Se debe recalcar, que el concreto tiene una estructura química ligeramente alcalina e higroscópica (calidad de conservar una mayor cantidad de humedad en el volumen en que están contenidas - efectos de una

esponja). La combinación de estas características provee iones libres que permiten al concreto presentar una resistividad consistentemente de unos 30  $\Omega$ -m.

- **Anillo de tierra:** Se emplea para circundar áreas grandes y proveer un plano equipotencial alrededor de edificios y equipos.

### **e.3 Tipos de electrodos no recomendables para un sistema de puestas a tierra**

(Samaniago Ordóñez, 2008) .- Se recomienda no utilizar como electrodo a:

- Tuberías metálicas de agua enterrada
- Tuberías de gas enterradas
- Electrodos de aluminio

## **2.1.4 TIPOS DE SOBREVOLTAJE Y SEÑALES PERJUDICIALES PARA EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN**

Los sobrevoltajes y señales eléctricas ajenas al sistema de distribución deforman su señal eléctrica nominal afectando a la generación y a la carga.

### **a. SOBREVOLTAJES** (Electrotecnia – Industria, 2003)

Todo aumento de voltaje capaz de poner en peligro el material o el buen funcionamiento de una instalación eléctrica, además un sobrevoltaje provoca otros sobrevoltajes.

$$k_s = \frac{V_s}{V} \quad (2.1)$$

Donde:

$k_s$  Factor de sobrevoltaje

$V_s$  Sobrevoltaje

$V$  Voltaje de servicio (Voltaje Nominal)

**a.1 Sobrevoltajes por agentes internos.-** Se producen al variar las condiciones de servicio de la instalación y se producen:

- **Por Maniobra (Relés entrada y salida de carga):** Provocan fenómenos transitorios que acompañan a cambios bruscos de estado de una red (conexión y desconexión de relés, etc.).
- **Por servicio:** Comprende los estados estacionarios que pueden resultar durante la puesta o salida de servicio de una carga.

**a.2 Sobrevoltajes por agentes externos.-** Son ocasionados por descargas atmosféricas

## **b. FALLAS POR CORTOCIRCUITO** (González, C., 2010)

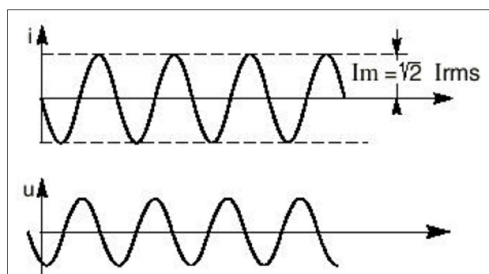
Un cortocircuito es la desaparición intempestiva de la aislación relativa de dos conductores de tensión diferente (alimentados de la misma fuente), sin la interposición de una impedancia conveniente. Las instalaciones eléctricas requieren siempre de la protección contra cortocircuitos donde quiera que exista esta falla. La corriente de cortocircuito se debe calcular en cada nivel de la instalación, con el propósito de determinar las características del equipo requerido para soportarla y/o eliminarla.

**b.1 Amplitud de la corriente de cortocircuito.-** Dependerá de los aspectos descritos en los siguientes literales:

- **Momento de ocurrencia de la falla:** De éste dependerá la corriente resultante que puede adquirir dos amplitudes, simétrica o asimétrica.

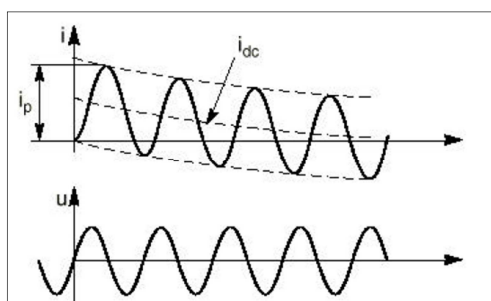
**Falla simétrica:** Está amplitud se caracteriza por tener sus semiciclos positivos y negativos de igual amplitud, si la falla ocurre en el instante en que la tensión de alimentación está pasando por su valor máximo. Para determinar su valor existen

ecuaciones que dan como resultado valores rms, que por lo general son de menor amplitud que la corriente nominal.



**Figura 2. 2: Cortocircuito simétrico**

**Falla asimétrica:** Se les llama de esta forma debido a que las amplitudes de sus semiciclos positivos y negativos son de distinto valor, es decir que la semionda alterna característica no es simétrica respecto al eje de coordenadas. Ocurre en el instante en que la tensión de alimentación está pasando por su valor cero.



**Figura 2. 3: Cortocircuito asimétrico**

Como es imposible saber en qué momento se producirá una falla, los elementos del sistema para su protección se deben dimensionar de modo que puedan soportar el valor asimétrico de la falla que es la peor condición de la misma. Para calcular la corriente de falla asimétrica se debe multiplicar la falla simétrica por un factor de asimetría ( $D_f$ ). Las formas de obtener el valor del factor de asimetría son:

1) Con ayuda de la siguiente fórmula:

$$\cos \hat{\rho}_{cc} = \frac{\sum_{i=0}^n R_i}{\sqrt{(\sum_{i=0}^n R_i)^2 + (\sum_{i=0}^n X_i)^2}} \quad (2.2)$$

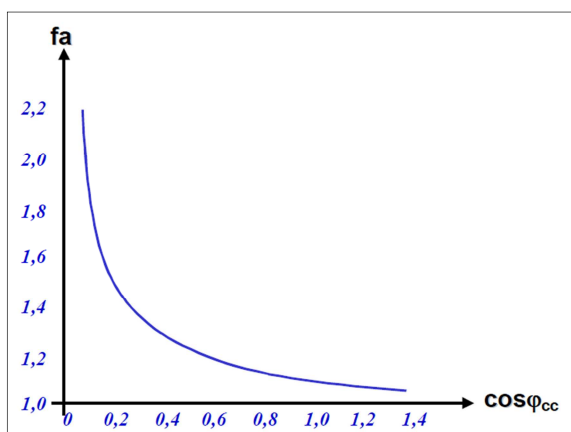
Donde:

$\cos \hat{\rho}_{cc}$ : Factor de potencia en el punto de la falla

$R_i$ : Resistencia desde el transformador hasta el punto de la falla

$X_i$ : Reactancia desde el transformador hasta el punto de la falla

Al obtener  $\cos \hat{\rho}_{cc}$ , su valor se ubica en el eje x de la **Figura 2. 4** y se proyecta hacia la curva de dicha figura, obteniendo el valor  $D_f$  ( $fa$ ) en el eje y.



**Figura 2. 4: Falla asimétrica (Factor de potencia y factor de asimetría)**

2) En puestas a tierra el factor de asimetría es conocido como  $D_f$  (Factor de decremento), que también es considerado como una constante de tiempo de la compensación de DC en segundos. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000, pág. 85)

Se puede obtener  $D_f$  a partir de la siguiente ecuación:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left( 1 - e^{-\frac{2(t_f)}{T_a}} \right)} \quad (2.3)$$

Dónde  $T_a$  esta dado por:

$$T_a = \frac{X}{\omega R} \quad (2.4)$$

$t_f$  es el tiempo de duración de la falla,  $\frac{X}{R}$  la relación inductancia sobre resistencia en el lugar de la falla y  $\omega = 120 \pi$ . La ecuación (2.3) ha sido resumida en la **Tabla 2.1** donde se puede obtener  $D_f$  con el valor de  $t_f$  y de  $\frac{X}{R}$ .

**Tabla 2.2: Valores típicos de  $D_f$**

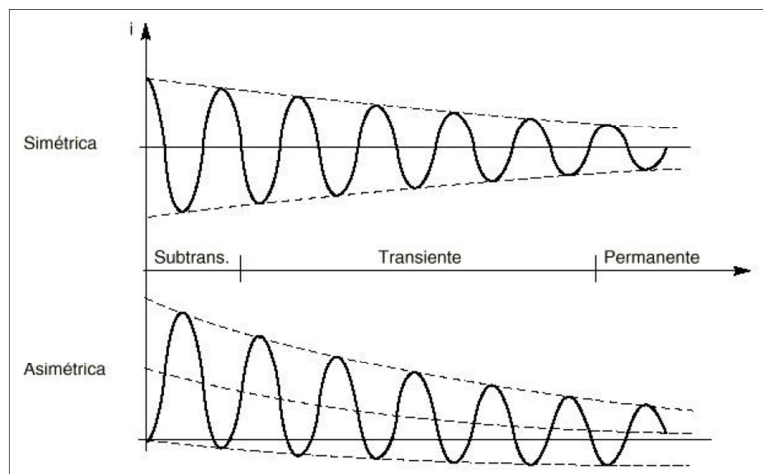
Duración de la falla, $t_f$		Factor de decremento, $D_f$			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

**Fuente: IEEE Standard 80 – 2000**

El factor de decremento,  $D_f$  se usa para incluir el efecto de la componente DC. Este factor determina el equivalente rms (valor eficaz) de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla determinada,  $t_f$  teniendo en cuenta el efecto de la componente DC inicial y su atenuación durante la falla.

Si el tiempo de duración de la corriente es mayor o igual a 1 segundo o la relación X/R en el punto de localización de la falla es menor que 5, el factor de decremento puede despreciarse, es decir  $D_f = 1$ .

- **Duración de la falla** <sup>(González, C., 2010)</sup>: En función de la duración de la falla (tiempo de existencia sin despeje por los órganos de protección), la corriente de cortocircuito puede presentar tres valores característicos, subtransiente (no más de 0,1 seg), transiente (entre 0,1 y 0,3 seg.) y permanente (luego de transcurrido más de 0,3 seg.).



**Figura 2. 5: Valores característicos de la corriente de cortocircuito**

Como se aprecia en la **Figura 2. 5** una corriente de cortocircuito asimétrica puede convertirse en simétrica, solo cuando la falla alcanza su estado permanente. Lamentablemente si el defecto permanece el tiempo necesario para alcanzar el estado simétrico, la instalación eléctrica se destruirá prácticamente en su totalidad.

- **Ubicación de la falla** <sup>(González, C., 2010)</sup>: Para efectos de cálculo la amplitud de la corriente de falla está dada en función de la ley de Ohm, es decir que la corriente es inversamente proporcional a la resistencia. La resistencia naturalmente se presenta en los elementos del sistema como conductores y carga instalada, por lo que si la falla se encuentra lo más cerca posible al transformador, la resistencia será mínima y la corriente de falla será máxima.
- **Topología de la falla** <sup>(González, C., 2010)</sup>: Dependiendo de la topología de la red eléctrica, un cortocircuito ocurrirá de las siguientes formas:
  - Cortocircuito entre tres líneas de fase (trifásico)
  - Cortocircuito entre dos líneas de fase (bifásico)
  - Cortocircuito entre una línea de fase y el conductor neutro (monofásico a neutro)
  - Cortocircuito entre una línea de fase y el conductor de tierra (monofásico a tierra)

Para el diseño de mallas a tierra es necesario analizar el cortocircuito monofásico a neutro y el monofásico a tierra. El cortocircuito monofásico a tierra puede presentarse al igual que el monofásico a neutro, en redes trifásicas de cuatro hilos como en sistemas monofásicos. Su impedancia puede ser del mismo valor que en el caso de la falla monofásica a neutro, siempre y cuando el régimen de conexión neutro sea del tipo TNC. Si el sistema de neutro es de tipo TT, la falla alcanzada será de menor valor debido a que la impedancia del sistema es alta (se debe considerar la puesta a tierra de conexión y servicio).

### 2.1.5 INFLUENCIA DE CORRIENTES PELIGROSAS EN LAS PERSONAS

Mediante una diferencia de potencial (Voltaje) se generan corrientes no deseadas, que pueden circular a través de un equipo o de una persona.

**Tabla 2. 3: Efectos físicos del choque eléctrico**

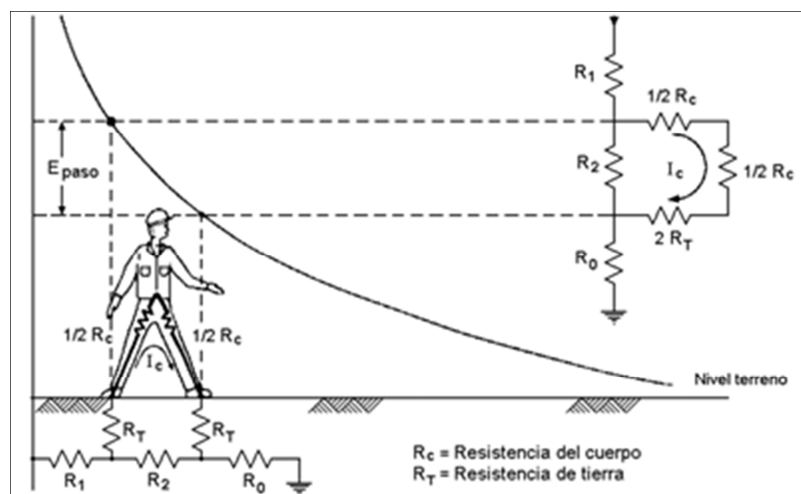
<b>Intensidad mA, C.A., 50 o 60 HZ</b>		<b>Efecto en el organismo</b>
<b>Hombre</b>	<b>Mujer</b>	
0.4	0.4	Ninguna sensación
0.5	0.5	Umbral de percepción
9	6	Pérdida de control muscular en el 0.5 % de la población
16	10.5	Pérdida de control muscular en el 50 % de la población
20-30		Posibilidad de asfixia
$116/\sqrt{t}$		Fibrilación de corazón (t mayor a 0.083 segundos y menor a 5 segundos)

**Fuente:** (Enríquez Harper, 2004, pág. 284)

#### **a. VOLTAJE DE PASO** (Portaleléctricos, 2006)

Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso (aproximadamente un metro).



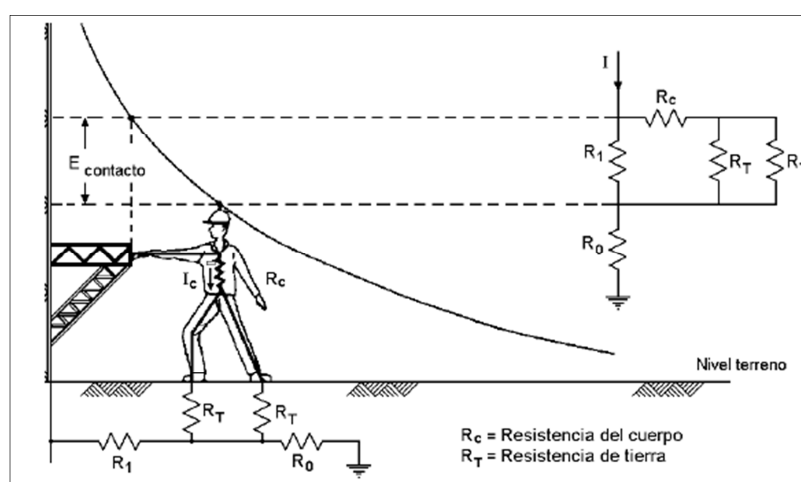


**Figura 2. 6: Voltaje de paso en una persona**

Fuente: (Aponte, G, 2011)

**b. VOLTAJE DE TOQUE (VOLTAJE DE CONTACTO)** (Portaleléctricos, 2006)

Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo.

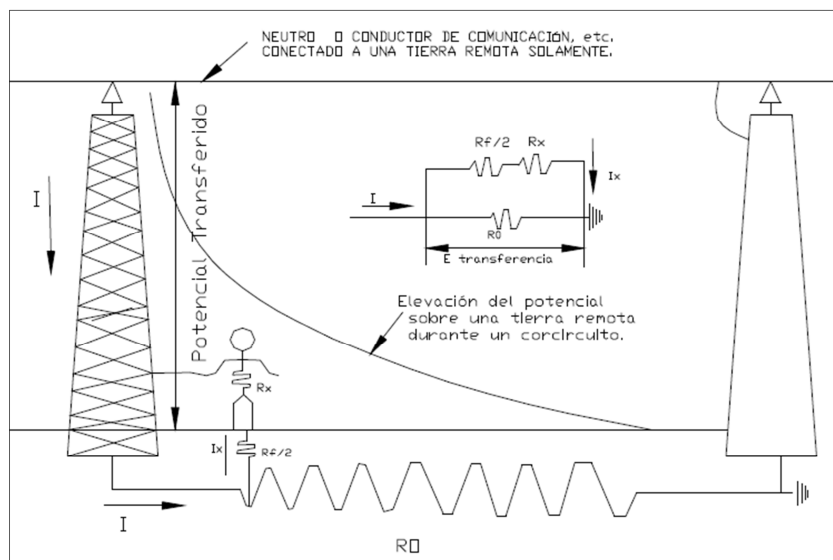


**Figura 2. 7: Voltaje de toque en una persona**

Fuente: (Aponte, G, 2011)

### c. VOLTAJE DE TRANSFERENCIA (Portaleléctricos, 2006)

Es un caso especial de tensión de contacto, donde un potencial es conducido hasta un punto remoto respecto a la subestación o a una puesta a tierra.



**Figura 2. 8: Tensión de transferencia**

**Fuente:** (Zapata Jiménez, 2012)

### 2.1.6 TIPOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

#### a. SISTEMAS PUESTOS A TIERRA SEGÚN LA FUNCIÓN QUE CUMPLEN

- **Puesta a tierra de protección “Safety Ground”, para equipos** (Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República., 2009)

La puesta a tierra de protección tiene objetivo de proteger a las personas y animales contra accidentes derivados de contactos con partes conductoras que, estando no sometidos normalmente a tensión, puedan estar sometidas a tensiones peligrosas como consecuencia de un defecto de aislamiento de la instalación (MASAS), o de, no tener un camino directo a tierra en caso de falla. Para esto se debe conectar a

tierra dichas masas, así como los equipos del sistema a los que esta puesta a tierra también protege.

- **Puesta a tierra de servicio “*Signal Ground*”, para sistemas eléctricos** (Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República., 2009)

La puesta a tierra de servicio tiene como objetivo asegurar el correcto funcionamiento del equipamiento eléctrico, y permitir un correcto y confiable funcionamiento de la instalación. Dependiendo de las características de la instalación, la puesta a tierra de protección y la funcional pueden ser independientes o en una misma puesta a tierra combinarse ambas funciones. Pero, siempre y cuando en el diseño de la puesta a tierra se dé prioridad a las prescripciones establecidas para la puesta a tierra de protección

- **Puesta a tierra temporales. (Para trabajos de mantenimiento)** (Zapata Jiménez, 2012)

Con frecuencia durante las actividades de trabajo en una instalación eléctrica como son mantenimiento, ampliaciones, reparaciones, etc. Es necesario es necesario realizar conexiones a tierra temporales con partes de la instalación puesta fuera de servicio con el fin de que sea accesible sin peligro para los trabajos a realizar, en cualquier de los casos de puesta a tierra mencionados anteriormente no se deben exceder las “Tensiones de Seguridad” establecidas.

- **Sistema de puesta a tierra de rayos o “*Lightning Ground*”** (Zapata Jiménez, 2012)

Su concepción es proveer un paso de muy baja impedancia a las descargas eléctricas, en especial a los rayos; de modo que se transfieran al suelo y su entorno en forma rápida, sin causar daños a las personas o instalaciones existentes. Este sistema de puesta a tierra, ha generado los conceptos de “Potencial de toque” y “Potencial de Paso”, en conjunto con el sistema de puesta a tierra de seguridad, ya que un rayo es el peor caso de una corriente a tierra.

## **b. SISTEMAS PUESTOS A TIERRA SEGÚN EL TIPO DE CARGA A PROTEGER**

Las puestas a tierra de protección han sido divididas en dos grandes grupos: Para equipos eléctricos y equipos electrónicos sensibles.

### **2.1.7 INFLUENCIA DE APARATOS ELECTRÓNICOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN**

Cuando una instalación se conforma de aparatos electrónicos se generan componentes armónicos, y voltajes transitorios, que son factores perjudiciales tanto para la señal de la red de alimentación como para las demás cargas. Los componentes armónicos de corriente y tensión pueden comprometer fuertemente los transformadores, hasta destruirlos. Una solución básica posible, para atenuar los efectos de estos armónicos consiste en elegir un esquema de conexión a tierra adaptado.

### **2.1.8 FILTROS, SUPRESORES Y BLINDAJES Y SU RELACIÓN CON LOS SPT** (Diseño y modelado de filtros para corrección de distorsión armónica, 2009)

El único tipo de filtro que se relaciona en forma directa con un SPT, es el filtro pasivo en paralelo, cuya función es desviar los componentes armónicos hacia tierra, evitando a la vez que estos lleguen a la fuente de alimentación. Tiene por ventaja sus bajos costos y como limitación el no poder variar la carga instalada. En un sistema de control o de comunicaciones la presencia de una puesta a tierra especial, con la ayuda de supresores y blindajes en el cableado, sirve para evitar la incidencia de ruido, cargas electromagnéticas y descargas electrostáticas en cargas no lineales.

### **2.1.9 FACTORES NATURALES DEL TERRENO QUE INFLUYEN EN LA PUESTA A TIERRA** (Zapata Jiménez, 2012)

El lugar donde se colocará la malla de tierra es sumamente importante, por lo que de él dependerá el funcionamiento y vida útil del SPT. Las características importantes del terreno donde se entierra la malla son: la resistividad del suelo y su capacidad para corroer el material con el que se diseña la malla.

#### **a. RESISTIVIDAD**

Se define como la capacidad del suelo para conducir corriente ante un campo eléctrico aplicado.

##### **a.1 Factores de la variación de la resistividad.-** Datos por:

- **Variaciones estacionales.-** Ocasionadas por el cambio de clima debido al paso del tiempo.
- **Composición del terreno.-** Terrenos diferentes presentan distintas resistividades. A medida que la roca es más compacta y más antigua, la resistividad es mayor. La de las aguas de río es comparable a la de los terrenos buenos.
- **Estratigrafía del terreno.** – La resistencia total es la resultante de las acciones parciales de las diversas capas de tierra.
- **Humedad.-** La humedad que posee el terreno determina fuertemente su resistividad. El agua que contiene el terreno, hace que las sales presentes en el suelo se disuelvan, formando un medio favorable al pasaje de la corriente iónica.
- **Temperatura.-** A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra.
- **Concentración de las sales disueltas en agua.-** Al existir una mayor concentración de sal en el suelo, este mejora su conductividad.

**a.2 Mejoramiento de la resistividad del terreno.-** En la actualidad existen variadas formas de mejorar el terreno, con el fin de reducir el valor de resistividad del mismo. Es conveniente emplear los métodos actuales que aseguran una larga duración de vida útil de la puesta a tierra, a continuación se presentan dos métodos apropiados para realizar el mejoramiento de la resistividad.

- **Cambio del Terreno:** Se puede dar mediante el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.
- **Tratamiento Químico del Suelo:** El tratamiento químico del suelo surge como un medio para mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del SPT sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos.

**b. CORROSIVIDAD DEL SUELO EN ELECTRODOS DE TIERRA** (Huete Serrano, 2008)

Los factores relacionados con la corrosividad del suelo son:

**b.1 Corrosión.-** Los componentes de un sistema de puesta a tierra, están expuestos a la corrosión que causa deterioro o destrucción del material metálico (oxidación por agentes de reacción).

**b.2 Resistencia a la corrosión.-** Las aplicaciones del cobre y aleaciones presentan buena resistencia a la corrosión, su uso para la puesta a tierra es basada a la experiencia ganada en tuberías de cobre enterradas.

**b.3 Características de la corrosión.-** Un factor a tomar en cuenta es la velocidad de corrosión, indicada por la pérdida de peso del material por unidad de tiempo por penetración en unidad de tiempo mm/año.

Si se suaviza el metal, presenta este una muy pequeña velocidad de corrosión desde el punto termodinámico. Con lo que respecta a la resistividad y la corrosión del terreno, se presenta la siguiente tabla de cómo influye este factor.

**Tabla 2. 4: Corrosión Vs. Resistividad**

<b>Resistividad <math>\Omega</math>*cm</b>	<b>Terrenos</b>
0-900	Altamente corrosivos
900-5,000	Severamente corrosivos
5,000-10,000	Moderadamente corrosivos
10,000-20,000	Ligeramente corrosivos
>20,000	Muy poco corrosivos

**Fuente: Universidad de los Andes, Venezuela**

La relación entre corrosividad y resistividad depende de la composición del suelo y puede determinar si es necesario utilizar protección catódica para los electrodos del sistema. Ya que mediante esta se puede aumentar el tiempo de vida útil del SPT.

#### **2.1.10 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO** (Moreno, Valencia , Cárdenas, & Villa Walter, 2007)

Uno de los primeros pasos para el diseño de un SPT es encontrar el valor de la resistividad del suelo, valor que definirá la facilidad y la forma en que se distribuirá la corriente en el suelo, determinando a su vez la distribución de potenciales en este, y con ello las características constructivas que debe tener la malla de puesta a tierra para cumplir con las condiciones mínimas de seguridad en el área dispuesta para su construcción. Aunque existen numerosos métodos los que acepta y sugiere la norma ANSI - IEEE son el de Wenner, Schlumberger - Palmer y la medición de la resistencia.

##### **a. RESISTIVIDAD APARENTE**

Las condiciones reales de la corteza terrestre se compone de distintas capas, y la profundidad de las corrientes inyectadas y la profundidad para la medición depende de la distancia entre los electrodos de emisión y de las heterogeneidades del terreno. Así el valor de resistividad obtenido solo es un indicador de la resistividad real del suelo y la penetración de la corriente. Al valor obtenido en las mediciones se le denomina resistividad aparente.

En un caso particular de terreno homogéneo la resistividad aparente es igual a la resistividad real. Pero por lo general casi todos los métodos se basan en la resistividad aparente.

## b. MÉTODO DE WENNER

El método consiste en ubicar todos los electrodos en línea recta e igualmente espaciados, como se ilustra en la **Figura 2. 9**

En este sondeo se deben separar progresivamente los electrodos de corriente y de tensión. Con respecto a un punto central fijo denominado punto de máxima exploración. Para el cálculo de la resistividad aparente del suelo, se utiliza la fórmula:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} + \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (2.5)$$

Donde  $R$  es el valor de resistencia leído por el telurómetro;  $a$  es la distancia de separación entre electrodos y  $b$  la profundidad de enterramiento de los mismos. Cuando la profundidad  $b$  es pequeña comparada con la distancia  $a$ , esto es  $a > 20b$ , el valor de la resistividad aparente se puede calcular como:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (2.6)$$

Pero si ( $b > a$ ), la resistividad aparente será:

$$\rho_a = 4\pi a R \quad (2.7)$$



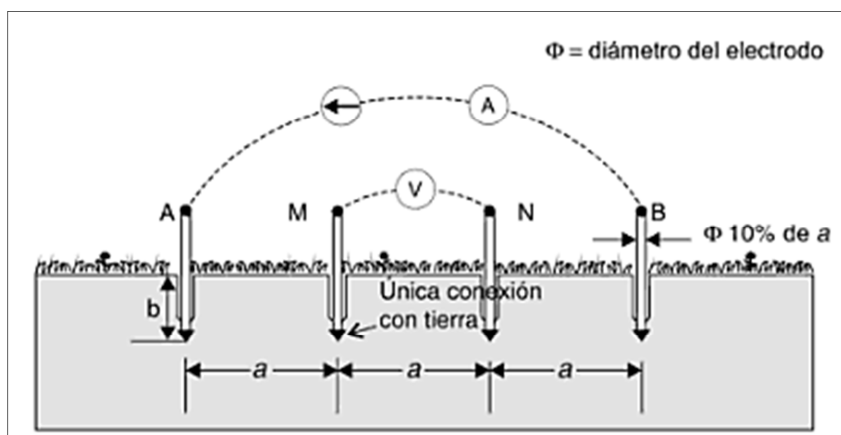


Figura 2. 9: Esquema del método de Wenner

### c. ZONA DE INFLUENCIA DE UN ELECTRODO DE TIERRA

Esta Zona se encuentra limitada por el nivel superficial del suelo y un perímetro concéntrico al electrodo donde los niveles de Resistencia del electrodo respecto a tierra son casi nulos. En este límite por no existir resistencia el potencial será 0.

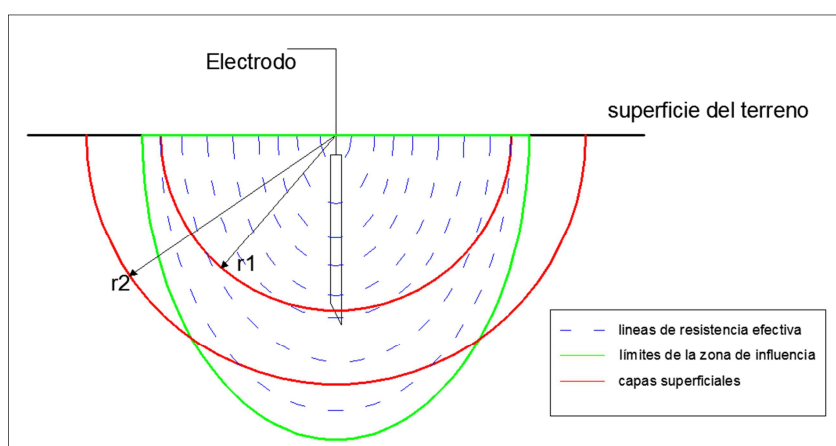


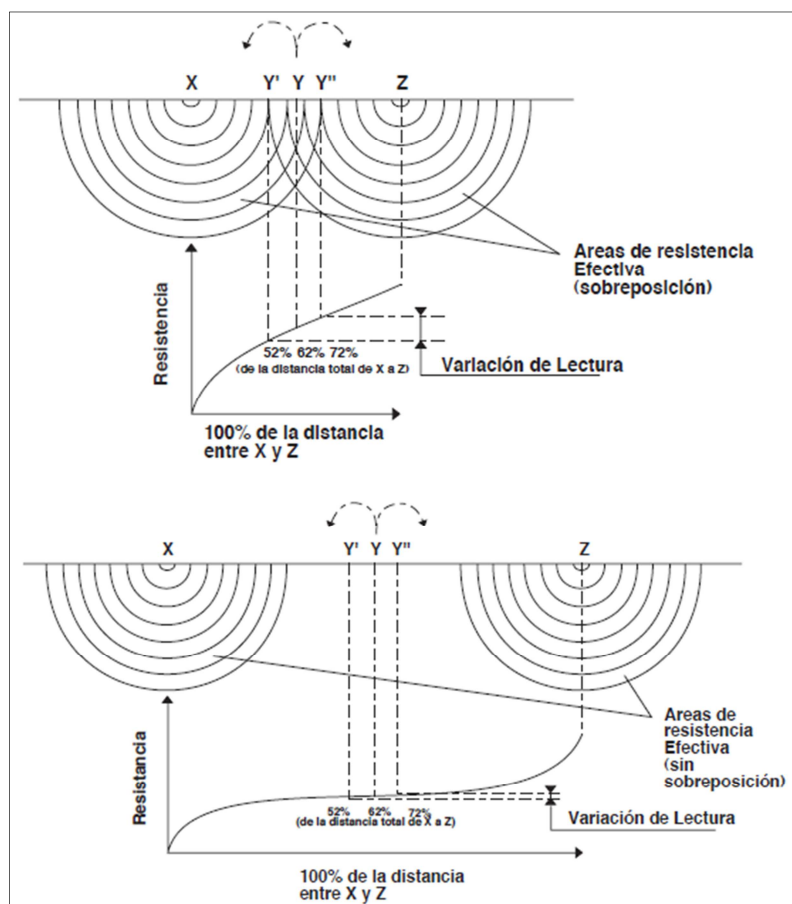
Figura 2. 10: Zona de influencia de un electrodo y capas superficiales de la tierra

Elaborado por: Wilson Pardo

#### d. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA SEGÚN LA COLOCACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN (Agulleiro, I, y Martínez, M., 2012)

En mediciones la distancia entre los electrodos auxiliares y el electrodo a prueba puede ser determinante cuando el equipo arroje resultados, debido a que puede existir una sobreposición de las zonas de influencia

En la **Figura 2. 11** se aprecia la importancia que tiene la colocación de los electrodos del equipo respecto al electrodo a prueba, pues si las zonas de influencia de estos se sobreponen existirá mayor error en la lectura del equipo. El valor de resistencia casi real se podría obtener de la figura en la parte inferior y sería el punto medio de la variación en la lectura.



**Figura 2. 11: Ubicación de electrodos y variación en las mediciones**

**Fuente: (AEMC, 2001)**

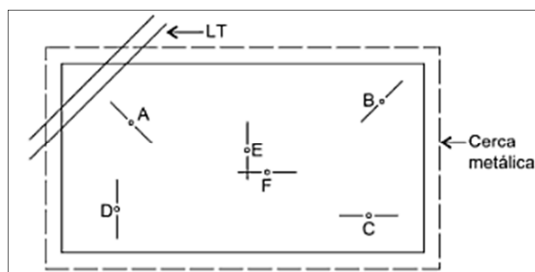
### e. MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE ELECTRODOS YA ENTERRADOS (Zapata Jiménez, 2012)

Si se está en un lugar donde ya se encuentra instalado un sistema de puesta a tierra y se desea modificar el existente o construir uno adicional, se debe hallar el valor de la resistencia del sistema y calcular el respectivo valor de resistividad con la fórmula de resistencia que le corresponda. Solo es aplicable en configuraciones sencillas para las cuales exista una fórmula al menos aproximada de la resistencia de puesta a tierra. El resultado que se obtiene por este método no es suficientemente confiable y sólo debe usarse como recurso “de emergencia”.

### f. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN (Moreno, Valencia, Cárdenas, & Villa Walter, 2007)

Para su efecto se toma como referencia el, método de Wenner.

- Visualizar si hay objetos que puedan obstaculizar la medición o la construcción de la malla, llevar un registro estacional con fecha de medición, de la última lluvia o del último periodo seco o lluvioso.
- Definir un número razonable de perfiles (mediciones sobre la misma recta variando apenas la distancia entre electrodos) de acuerdo con la magnitud del área. La **Figura 2. 12** ilustra los diferentes tipos de perfiles que se podrían utilizar (A,B,C,D y E)



**Figura 2. 12: Perfiles (A,B,C,D,E y F) sugeridos en un area cruzada por una línea de transmisión**

- Comenzar con separación entre electrodos de 1m, multiplicar por 2 la primera distancia para determinar la segunda, multiplicar la segunda medición por 2 y así sucesivamente. Levantar curvas de  $\rho_a$  frente a  $a$  para cada perfil, dependiendo del área de la malla a diseñar ya que esta puede ser demasiado pequeña para las distancias seleccionadas.
- Debe procurarse realizar mediciones con separaciones comparables a las mayores longitudes del electrodo a emplearse en el diseño.
- Cuando se registren valores de  $\rho_a$  exagerados en comparación a otros tomados, se debe repetir la medición o eliminar estos valores, si no existe explicación para estos.
- En caso de que el área sea cruzada por líneas de transmisión (o distribución), deben realizarse las mediciones en forma transversal a la trayectoria de las líneas, para disminuir interferencias sobre la medición.

#### **g. PRECAUCIONES EN LA MEDICIÓN**

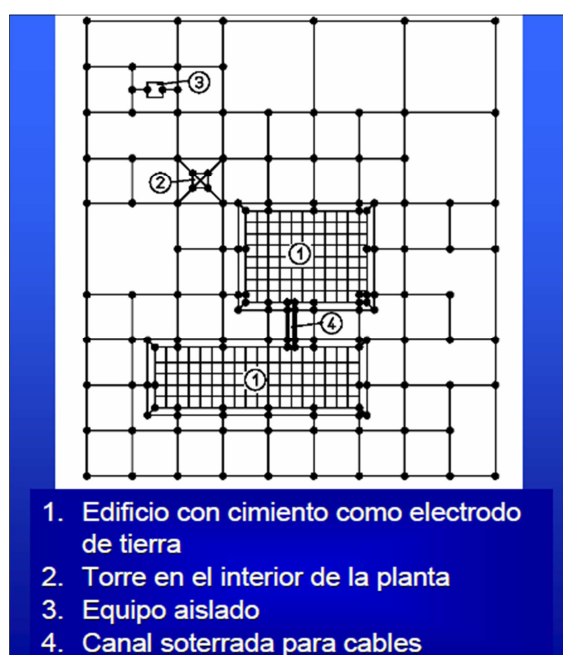
Se destaca entre estas precauciones, la de tener en cuenta cualquier objeto que interfiera con los valores de la resistividad del suelo, como otros sistemas de electrodos, otros objetos enterrados que suelen ser rocas o estructuras metálicas propias en de construcción.

#### **2.1.11 INCIDENCIA DE LA SEPARACIÓN Y LA PROFUNDIDAD DE ELECTRODOS** (Zapata Jiménez, 2012)

Normalmente la distancia entre ejes de los electrodos debe ser  $\geq 4L$  siendo  $L$  la longitud del electrodo; pero en los casos donde se requiera obtener resistencias eléctricas muy bajas y exista disponibilidad de área de terreno, las distancias entre ejes de los electrodos, deberán ser lo máximo posible; pues a mayor distancia entre ejes de electrodos, mayor será la reducción de la resistencia a obtener; y ello por el fenómeno de la resistencia mutua entre electrodos.

### 2.1.12 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN GRANDES AREAS (Comité electrotécnico cubano, 2010)

Si se presentan corrientes de falla, por lo regular se producen diferencias de potencial en un sistema de distribución, pero al existir en una instalación varios sistemas de distribución interconectados e interdependientes, se pueden presentar problemas entre estos, además de una dificultad en el momento de diseñar sus respectivos SPT.



**Figura 2. 13: SPT en grandes áreas**

#### a. SISTEMAS DE TIERRA UNIDOS Y SISTEMAS DE TIERRA SEPARADOS

Una decisión difícil en los sistemas de puestas a tierra es, si interconectar o no los SPT, al existir actualmente en el mercado proveedores de equipos que funcionan como SPT, exigiendo en ocasiones al proyectista separar o aislar dichos equipos, argumentando que una falla o descarga ocurrida en cualquier otro sistema, contaminará y actuará gravemente, reduciendo drásticamente su continuidad, confiabilidad y seguridad.

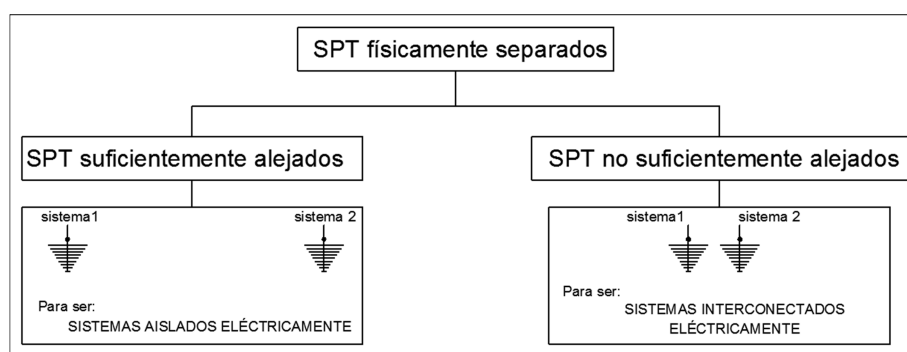
La decisión de unir o separar los sistemas de tierra requiere de un análisis minucioso de cada caso en particular, en el que hay que tomar en cuenta toda una serie de criterios, que deben ser evaluados correctamente.

Un sistema de distribución que trabaja conjuntamente con diferentes tipos de carga como componentes electrónicos y equipos de fuerza, requiere el diseño varios SPT, existiendo así dos alternativas:

- Separar físicamente los diferentes sistemas
- Interconectar todos los sistemas

#### **b. SISTEMAS DE TIERRA FÍSICAMENTE SEPARADOS**

Los sistemas de electrodos o sistemas de tierra son independientes cuando la intensidad de la de falla de uno de ellos no origina en el otro una tensión mayor a un valor que según la literatura debe estar entre 20 y 50 volts para lugares húmedos o secos respectivamente. Lo que implica un diseño con la certeza de obtener un adecuado aislamiento entre los diferentes sistemas ante cualquier anomalía transitoria o permanente.



**Figura 2. 14: Clasificación de los sistemas de tierra físicamente separados**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

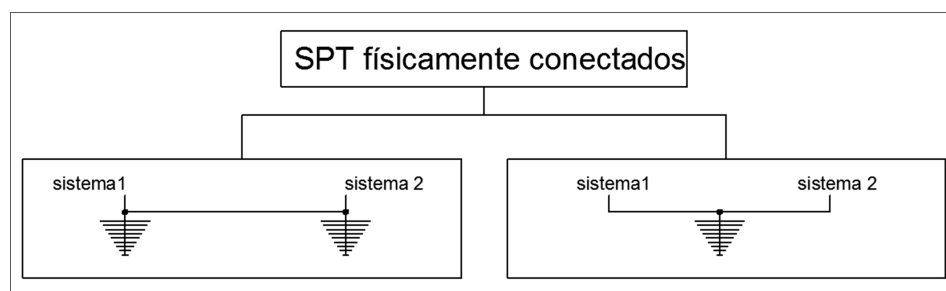
Por cuestiones de equipotencialidad la **Figura 2. 14** presenta dos opciones inválidas según la normativa IEEE. Pero se puede elegir cualquiera de estas por otros factores

como el espacio disponible (área de terreno y dimensiones de la malla), valores máximos de corriente a disipar a tierra, resistividad del terreno, niveles de tensión soportables del equipo a proteger, etc.

### c. SISTEMAS DE TIERRA FÍSICAMENTE CONECTADOS

Los objetivos de la unión de los electrodos o sistemas son:

- Reducir el valor de la resistencia de puesta a tierra como resultado de la resistencia equivalente
- Reducir la tensión de falla en el sistema de tierra
- Reducir el gradiente de potencial en el área cercana a los electrodos o sistemas de tierra.
- Limitar las diferencias de potencial entre ellos y sus sistemas asociados, logrando un punto o área equipotencial
- Evitar tensiones peligrosas transferidas entre electrodos o sistemas de tierra
- Obtener una respuesta más rápida de los equipos de protección
- Obtener una red de tierra más segura y confiable
- Lograr una red más extensa y posiblemente con un número mayor de electrodos.



**Figura 2. 15: Clasificación de los sistemas de tierra físicamente conectados**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

La opción de conexión a la derecha del gráfico no es recomendable, si es que los sistemas conectados llegasen a tener diferencias de: voltaje de alimentación, tipo de carga o impedancias del sistema.

### 2.1.13 EQUIPOTENCIALIDAD (Wikipedia, 2003)

La conexión equipotencial es la unión permanente de partes metálicas para formar un trayecto eléctricamente conductor que asegure la continuidad eléctrica y la capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente impuesta.

- **Importancia:** Una persona que toca algún metal de un dispositivo eléctrico, mientras que está en contacto con un objeto metálico conectado a tierra, se expone a un riesgo de descarga eléctrica, siempre y cuando el dispositivo tenga un fallo. Si todos los objetos metálicos están conectados poseerán el mismo potencial. Debido a esto, no será posible obtener una descarga eléctrica por el contacto a dos "tierras expuestas" al tocar varios objetos a la vez. La conexión equipotencial no protege al equipo. Sin embargo, si se conecta a la tierra no puede haber acumulación de energía eléctrica.
- **Conexión en edificaciones:** La unión entre todos los elementos debe realizarse por medio de conductores eléctricos, tales como metal, líneas de agua, líneas de alcantarillado o líneas de gas (con pieza aislante), aire acondicionado. A la vez deben unirse otras partes de la estructura, como tubos metálicos, calefacción y/o partes conductoras con fácil acceso a las personas, todo esto conectado a la barra de tierra principal.

### 2.1.14 SELECCIÓN DE SPT PARA DIFERENTES TIPOS DE CARGA

Un componente electrónico (PLC, variador de frecuencia, computador, etc.) conectado a un equipo de fuerza (motor, motor acoplado a una bomba, etc.), son casos que se presentan comúnmente en un laboratorio o proceso industrial, lo que origina una complicación al momento de elegir cuantos y que tipo de sistemas de puesta a tierra necesita un sistema de distribución. Existen varios criterios y discrepancias en cuanto a para qué sirven los SPT diseñados para equipos electrónicos sensibles. Para sistemas de bajas frecuencias (50,60, 400 Hertz) los SPTA suelen ofrecer un buen desempeño, no así en sistemas modernos de datos. (Díaz, 2001, pág. 32)

El objetivo principal de los SPT es controlar las corrientes indeseables como:

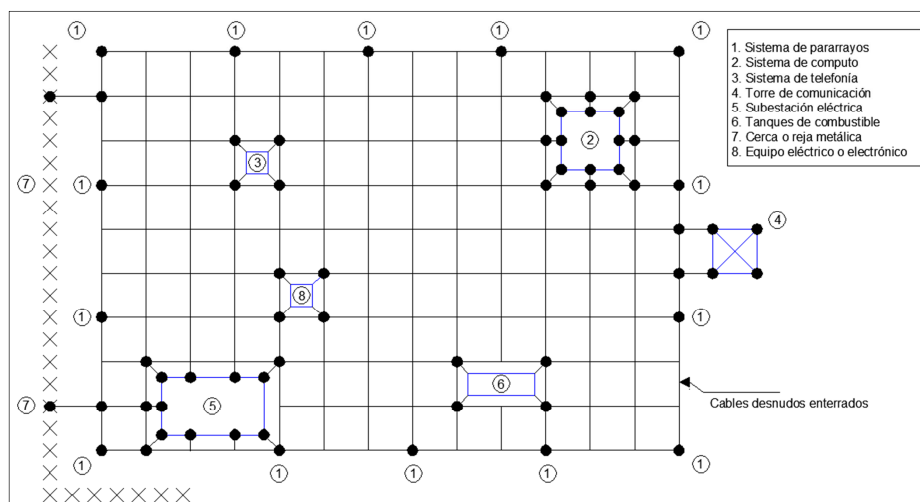


- Las de falla
- Las que generan descargas electrostáticas
- Las de ruido de alta frecuencia
- Las de fuga

Las corrientes mencionadas anteriormente, las sobrecargas por maniobra y las corrientes de ruido sin control ocasionan el mal funcionamiento y daños en los equipos eléctricos, la degradación gradual o destrucción de componentes electrónicos y la pérdida de memoria en equipos computarizados. Los SPT en una instalación sirven como protección para sus equipos, más no para mejorar el rendimiento de estos. Los elementos que mejoran el rendimiento de los equipos electrónicos y de telecomunicaciones, al contribuir con la disminución de interferencias, son los supresores, filtros y blindajes, que simplemente están conectados a tierra.

### 2.1.15 ESQUEMAS DE INTERCONEXIÓN O UNIÓN DE DIFERENTES SPT

Los diferentes tipos de SPT se aprecian y describen con la ayuda de la siguiente gráfica:

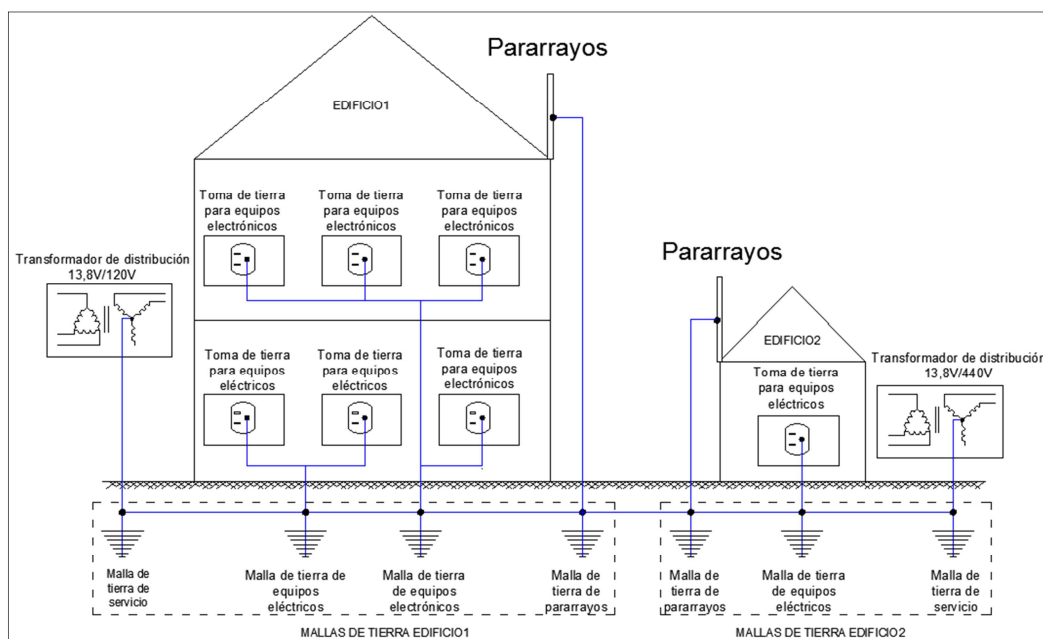


**Figura 2. 16: Representación esquemática de equipos puestos a tierra en un sistema mallado**

**Fuente: (Comité electrotécnico cubano, 2010)  
Elaborado por: Wilson Pardo**

En todos los edificios comerciales se debe prever una instalación de puesta a tierra expresa, como la indicada en la norma JSTD 607-A, independiente de la instalación de tierra general, cuyo único punto común es el electrodo de conexión a tierra (GEC). (Comité ejecutivo del código ecuatoriano de la construcción, 2009)

La conexión entre varios sistemas de puestas a tierra podría ser correcta, siempre y cuando dicha conexión no represente un inconveniente para los objetivos y normas que rigen el diseño de un SPT. Mientras más puestas a tierra estén interconectadas mejor será el desempeño del SPT, ya que la resistencia total del sistema varía en forma inversa con el número de puestas a tierra. La conexión entre SPT se da por cuestiones de equipotencialidad y en sistemas electrónicos es necesario tener una equipotencialidad casi perfecta para evitar tener voltajes inducidos.



**Figura 2. 17: Sistemas de distribución con interconexión de sus diferentes SPT (sin incluir fases y neutro)**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

## 2.2 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA MALLA A TIERRA

Aquí se presentan varias normas y alternativas para la selección de constantes y variables necesarias en el diseño de un SPT.

### 2.2.1 PARÁMETROS DE LOS CONDUCTORES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL SPT

Estos parámetros se describen en los siguientes literales:

#### a. CONDUCTORES EN UN SPT

La **Tabla 2. 5** sirven como referencia para seleccionar un conductor

**Tabla 2. 5: Conductor del electrodo de tierra en instalaciones de C.A.**

Tamaño nominal del mayor conductor de la entrada a la acometida o sección equivalente de conductores en paralelo mm <sup>2</sup> (AWG o Kcmil)		Tamaño nominal del conductor al electrodo de tierra en mm <sup>2</sup> (AWG o Kcmil)	
Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
33,62 (2) o menor	53,48 (1/0) o menor	8,367 (8)	13,3(6)
42,41 o 53,48 (1 o 1/0)	67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	13,3 (6)	21,15 (4)
67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	4/0 o 250 Kcmil	21,15 (4)	33,62 (2)
Más de 85,01 a 177,3 (3/0 a 350)	Más de 126,7 a 253,4 (250 a 500)	36,62 (2)	53,48 (1/0)
Más de 177,3 a 304,0 (350 a 600)	Más de 253,4 a 456,04 (500 a 900)	53,48 (1/0)	85,01 (3/0)
Más de 304,0 a 557,38 (600 a 1100)	Más de 456,04 a 886,74 (900 a 1750)	67,43 (2/0)	107,2 (4/0)
Más de 557,38 (1100)	Más de 886,74 (1750)	85,01 (3/0)	126 ,7 (250)

De acuerdo a la normativa IEEE, el conductor mínimo para una malla a tierra es el 2/0, en la **Tabla 2. 6**.

**Tabla 2. 6: Dimensiones de los conductores de puestas a tierra**

Calibre del conductor		Área nominal del conductor (mm <sup>2</sup> )	Diámetro (m)
Kcmil	AWG		
350		177,35	0,0150
300		152,01	0,0139
250		126,68	0,0127
211,6	4/0	107,22	0,0117
167,8	3/0	85,03	0,0104
133,1	2/0	67,44	0,0093

Fuente: IEEE Standard 80-2000

**b. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES DE COBRE**

Es preciso que al seleccionar el conductor en un diseño, se recurra a un catálogo para tener un valor real de los conductores disponibles en el mercado.

**Tabla 2. 7: Conductores de cobre reales utilizados para puesta a tierra**

TIPO	CALIBRE	ÁREA	CONSTRUCCIÓN				DIÁM COND APROX	PESO Total APROX	RESISTENCIA Eléctrica A20 °C
			#	DIÁMETRO					
				H	MIN	NOM			
AWG	mm <sup>2</sup>	#	mm	mm	mm	mm	Kg/Km	Ω/Km	
SOLIDO-D	30	0,05	1	0,25	0,25	0,26	0,25	0,45	340,26
SOLIDO-D	28	0,08	1	0,32	0,32	0,32	0,32	0,71	214,37
SOLIDO-D	26	0,13	1	0,40	0,40	0,41	0,40	1,14	134,50
SOLIDO-D	24	0,21	1	0,51	0,51	0,52	0,51	1,82	84,07
SOLIDO-D	23	0,26	1	0,57	0,57	0,58	0,57	2,30	66,63
SOLIDO-D	22	0,32	1	0,64	0,64	0,65	0,64	2,89	53,09
SOLIDO-D	20	0,52	1	0,80	0,81	0,82	0,81	4,62	33,21
SOLIDO-D	18	0,82	1	1,01	1,02	1,03	1,02	7,32	20,93
SOLIDO-D	16	1,31	1	1,28	1,29	1,30	1,29	11,62	13,19
SOLIDO-D	14	2,08	1	1,61	1,63	1,64	1,63	18,51	8,28
SOLIDO-D	12	3,31	1	2,03	2,05	2,07	2,05	29,40	5,21
SOLIDO-D	10	5,26	1	2,56	2,59	2,61	2,59	46,76	3,28
SOLIDO-D	8	8,37	1	3,23	3,26	3,30	3,26	74,39	2,06
SOLIDO-D	6	13,30	1	4,07	4,12	4,16	4,12	118,23	1,30
CABLE-D	8	8,37	7	1,22	1,23	1,25	3,70	75,91	2,09
CABLE-D	6	13,30	7	1,54	1,55	1,57	4,66	120,39	1,32
CABLE-D	4	21,14	7	1,94	1,96	1,98	5,88	191,71	0,83
CABLE-D	2	33,65	7	2,45	2,47	2,50	7,42	305,13	0,52
CABLE-D	1/0	53,42	19	1,87	1,89	1,91	9,26	484,38	0,33
CABLE-D	2/0	67,45	19	2,10	2,13	2,15	10,63	611,61	0,26
CABLE-D	3/0	85,10	19	2,36	2,39	2,41	11,94	771,64	0,21
CABLE-D	4/0	107,18	19	2,65	2,68	2,71	13,40	971,89	0,16

Fuente: (Procobre, 2007)

### c. FACTOR $k_f$ SEGÚN LA CONDUCTIVIDAD Y LA TEMPERATURA DE FUSIÓN DEL MATERIAL CONDUCTOR

El conductor utilizado será de cobre duro y para la construcción de la malla se utilizará soldadura exotérmica.

**Tabla 2. 8: Constantes para los materiales de los conductores**

Material	Conductividad (%)	Temperatura de fusión $T_m$ (° C)	$k_f$
Cobre blando	100,0	1083	7,00
Cobre duro cuando se utiliza soldadura exotérmica	97,0	1084	7,06
Cobre duro cuando se utiliza conexiones mecánicas a presión	97,0	250	11,78
Alambre de acero recubierto de cobre	40,0	1084	10,45
Alambre de acero recubierto de cobre	30,0	1084	12,06
Varilla de acero recubierta de cobre	20,0	1084	14,64
Aluminio calidad EC	61,0	657	12,12
Aleación de aluminio 5005	53,5	652	12,41
Aleación de aluminio 6201	52,5	654	12,47
Alambre de aluminio revestido en acero	20,3	657	17,20
Acero 1020	10,8	1510	15,95
Varilla de acero galvanizado	9,8	1400	14,72
Varilla de acero con baño de zinc	8,6	419	28,96
Acero inoxidable 304	2,4	1400	30,05

Fuente: IEEE Standard 80-2000

### d. CONDUCTOR DEL ANILLO DE TIERRA

Se utilizará un conductor de cobre desnudo, de área transversal mayor a 2 AWG (por resistencia mecánica), de longitud no menor a 6m enterrado a una profundidad de 80cm - 60 cm y, que rodee a la estructura o edificio. (RUELSA, 2007)

Los elementos de un SPT como los electrodos y el anillo de tierra deberán ser del mismo material conductor. La sección de un electrodo no puede ser inferior a la sección del conductor que constituye la línea principal de tierra. (UTE Servicios al cliente, 2010)

## 2.2.2 VALORES DE RESISTENCIA REQUERIDOS EN LOS DIFERENTES TIPOS DE MALLAS

**Tabla 2. 9: Valores de referencia para la resistencia de puestas a tierra**

Aplicación	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra
Estructuras de líneas de transmisión o torres metálicas de distribución con cable de guarda	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión	10 $\Omega$
Protección contra rayos	10 $\Omega$

**Tabla 2. 10: Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra**

Instalaciones aéreas		10 $\Omega$ o menos
Pararrayos		10 $\Omega$ o menos
Instalaciones subterráneas		5 $\Omega$ o menos
Equipos Sensibles	Normal	5 $\Omega$ o menos
	Idóneo (no ideal)	3 $\Omega$ o menos

## 2.2.3 INDICADORES DE CALIDAD PARA UNA MALLA A TIERRA

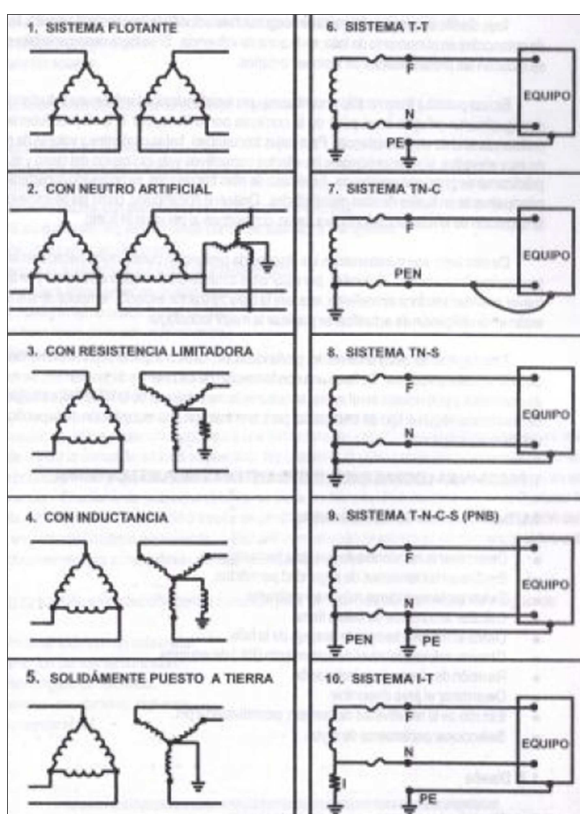
En la **Tabla 2. 11** se muestran los valores aconsejables para redes eléctricas de resistencia de un sistema de puesta a Tierra

**Tabla 2. 11: Valores aconsejables para la resistencia de puesta a tierra**

Resistencia	Calidad	
	En baja tensión	En alta tensión
Menos de 1 $\Omega$	Excelente	Excelente
Entre 1 y 5 $\Omega$	Muy buena	Buena
Entre 5 y 10 $\Omega$	Buena	Aceptable
Entre 10 y 15 $\Omega$	Aceptable	Regular
Entre 15 y 20 $\Omega$	Regular	Mala
Más de 20 $\Omega$	Mala	Mala

## 2.2.4 ESQUEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA (ECT)

Describe la relación entre el secundario del transformador Media Tensión-Baja Tensión y las masas metálicas con el potencial 0 (Tierra) en una instalación eléctrica. Estos esquemas trabajan en conjunto con los dispositivos de protección.



**Figura 2. 18: Regímenes de conexión a tierra**

**Fuente: (Zapata Jiménez, 2012)**

Los esquemas de conexión a tierra se nombran con dos letras:

- Primera letra: Conexión del neutro del transformador. T(Tierra), I (Impedance)
- Segunda letra: Conexión de las masas metálicas de la instalación. T (Tierra), N (Neutro).

En los esquemas TN se añade una S (separado) o una C (Conjunto) para definir si el conductor de Neutro y el de protección son un sólo conductor.

Los transformadores que forman el sistema de distribución de la ESPE, por su configuración tienen una conexión según el esquema 5 en la **Figura 2. 18**.

Cuando se trata de protección para equipos, lo recomendable es realizar el diseño de tierras físicas, por lo que los esquemas de conexión que se podrían emplear en el diseño son el 6, 9 o 10. El esquema seleccionado puede tener modificaciones, dependiendo del tipo de equipos a proteger y de las normas que rigen los SPT.

### **2.2.5 IMPORTANCIA DE LA UBICACIÓN DE LAS MALLAS DEL SISTEMA**

Las mallas a tierra estarán situadas de preferencia de la siguiente manera:

- Mallas a tierra de servicio, cerca del transformador
- Mallas a tierra de protección, cercanas al tablero de la carga a proteger
- Mallas a tierra contra descargas atmosféricas, próximas al pararrayos del edificio
- Mallas a tierra de referencia de señal (Para ruido) junto a los tableros de distribución para aparatos electrónicos sensibles y/o sistemas de comunicación.

### **2.2.6 ÁREA DISPONIBLE**

Considerar el área disponible para la construcción de la malla, ya que podría ser necesario cambiar su forma durante el diseño.

### **2.2.7 VARIOS VOLTAJES DE DISTRIBUCIÓN EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR**

Si el transformador de distribución tiene 2 voltajes derivados del secundario, se deberá considerar de preferencia el mayor, o el menor dependiendo si se piensa habilitar la distribución para un sistema con un solo voltaje o para varios sistemas con sus dos valores de voltaje.



### 2.2.8 INCIDENCIA DE LA LONGITUD DE LA VARILLA

La longitud del electrodo tipo varilla ( $L_v$ ) es 1.8m por Norma de la Empresa Eléctrica Quito. El espaciado entre los electrodos tipo varilla debe ser por lo menos 2 veces su longitud. La distancia  $D$  entre conductores varía entre 3 a 15 m. (Empresa Eléctrica Quito, 2009)

Se puede decir que para seleccionar la longitud de una varilla, se debe tomar en cuenta que dicha magnitud está dada en función de la resistividad y profundidad de las capas del terreno, obviamente se prefiere colocar el electrodo dentro de la capa de menor resistividad. La separación entre electrodos debe ser por lo menos dos veces su longitud para que no interfieran los campos magnéticos que se generan en ellos, de ahí que la distancia entre electrodos tipo varilla debe ser  $2 \cdot 1.8 = 3.6\text{m}$ .

### 2.2.9 VALOR DE $D_f$

Asumiendo que un sistema eléctrico de distribución cuenta también con protecciones eléctricas como breakers y relés, el valor del factor de asimetría estará dado de acuerdo al tiempo que le toma a las protecciones activarse que será  $t=0.1\text{seg}$ , además se considera que la ubicación de la falla se da en el sector más cercano al transformador, donde por no existir mucha resistencia se tiene como mínimo según la **Tabla 2. 2**,  $X/R=20$ , lo que da un factor de asimetría  $D_f=1,232$ .

Si se conoce el lugar exacto de la falla y  $t_f \geq 1$ , o  $\frac{X}{R} \leq 5$ , el factor  $D_f$  sería igual a uno.

### 2.2.10 VALOR DE $S_f$ PARA UNA MALLA DE PROTECCIÓN

Este está dado por la fórmula:

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_m} \quad (2. 8)$$

Donde:

$S_f$ : Factor de división de corriente de defecto, representa el % de corriente que disipará la malla a tierra, el resto retornará al sistema hasta lograr despejar la falla.

$R_m$ : Es la resistencia deseada de la malla de protección, y su valor dependerá de la **Tabla 2. 9, Tabla 2. 10 o Tabla 2. 11**

$Z_{eq}$ : Es la impedancia equivalente del sistema considerando el lugar donde ocurre la falla. Esta impedancia puede ser estimada según la IEEE Std. 80 - 2000 por su tabla C.1.

### 2.2.11 CAPA SUPERFICIAL

Normalmente es necesario realizar el diseño con una capa superficial de cierto material, considerando la resistividad del mismo. Dicha resistividad, incrementa las condiciones de seguridad (aumentando la resistencia total del cuerpo de la persona sometida al peligro). Además la resistividad de la capa superficial contribuye con la mejora de la malla, si se requiriese volver a diseñarla por no cumplir ciertas condiciones de diseño. En la **Tabla 2. 12** se muestra los materiales comúnmente utilizados, con los que se podría construir una capa superficial (de ser necesario).

**Tabla 2. 12: Acabados superficiales**

Acabado superficial	Resistividad( $\Omega$ *m)	Espesor (cm)
Concreto	21	10
Piedra picada	1300	7
Asfalto	10000	10

Fuente: (CADAPE, 2006)

## 2.3 FUNDAMENTO TEÓRICO DE APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Esta teoría se suele describir como una ciencia no es muy exacta, pues en la naturaleza no es preciso determinar el momento o la ubicación de un rayo.

### 2.3.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPCR) (Santafeciedad, 2012)

Es un sistema completo que permite proteger una estructura contra los efectos del rayo. Consta de un sistema externo y de un sistema interno de protección contra el rayo. En casos particulares, un SPCR podrá estar formado solamente por un sistema externo o por un sistema interno.

- **Sistema Externo:** Comprende un dispositivo captor (terminal aéreo), las bajadas y un sistema de puesta a tierra.
- **Sistema Interno:** Comprende todos los dispositivos complementarios al sistema externo, con el objeto de reducir los efectos electromagnéticos (voltajes inducidos) de la corriente de rayo dentro del espacio a proteger.

### 2.3.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

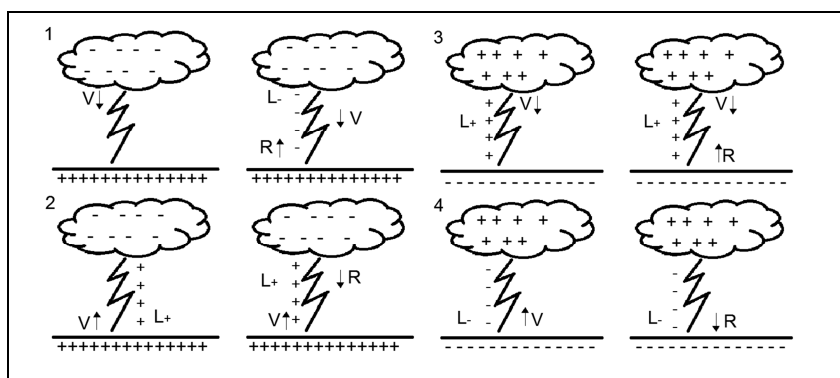
La descarga atmosférica conocida como rayo, es la igualación violenta de cargas de un campo eléctrico que se ha creado entre una nube y la tierra, o entre nubes. Un rayo puede considerarse como una fuente de corriente que pueden alcanzar intensidades de 200 KA (ocasionalmente 500 KA).

Se estima que una descarga típica de rayo puede tener aproximadamente 3 billones de kilowatts de energía a un voltaje aproximado de 100 millones de volts y una corriente promedio de 18000 amperes.

La velocidad de propagación de un rayo es de  $2 * 10^5 \frac{\text{m}}{\text{seg.}}$ ; su tiempo de duración está entre 20 y 50  $\mu\text{seg.}$ ; su velocidad se estima en 0,5 veces la velocidad de la luz. Existen diversas formas de descargas atmosféricas:

- Intranube
- Nube-nube
- Nube-aire
- Nube-tierra

Para el análisis de un SPCR los rayos de interés, debido a su efecto, son los de nube a tierra, y en éstos se pueden encontrar 4 tipos: 2 iniciados en las nubes, y 2 iniciados en tierra, ya que pueden ser positivos o negativos. Los más comunes, siendo el 90 % de los rayos detectados, son de una nube negativa hacia tierra.



**Figura 2. 19: Descarga nube – tierra**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

**Fuente: (Ptolomeo.unam.mx, 2006)**

En la **Figura 2. 19** las gráficas del lado derecho en los cuatro casos representan el origen del rayo y las del lado izquierdo simbolizan el fenómeno en sí, donde:

V: Dirección de propagación

L: Líder de polaridad positiva o negativa, según la dirección de propagación

R: Retorno generado por la ionización de la nube debido al líder.

### 2.3.3 EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE LA INCIDENCIA DE DESCARGA O RIESGO DE EXPOSICIÓN EN UNA INSTALACIÓN

(Zapata Jiménez, 2012)

En la actualidad la probabilidad de incidencia de las descargas atmosféricas se registra por medio de dos métodos.

#### a. NIVEL ISOCERÁUNICO ( $N_{iso}$ )

Indica el número de días de tormenta por año que se puede dar en una determinada zona geográfica. Este método utiliza los servicios meteorológicos, los mismos que disponen de mapas isoceráunicos. Si bien estos mapas pueden ser una guía, que deben ser usados con la debida precaución, pues allí no indica el número de descargas de rayos que puede ocurrir en días de tormenta. En zonas templadas el nivel isoceráunico oscila del 1 al 100 y en zonas tropicales puede alcanzar los 260, por consiguiente cuanto más alto sea el mismo, mayor será la posibilidad de caída del rayo.

La probabilidad máxima de un día de tormenta es:

$$N_{iso} / 365. \quad (2.9)$$

#### b. DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA

( $D_{GFD}$ ) expresa el número de descargas a tierra que se espera por  $Km^2$ , por año. Este método es el más confiable y adecuado para determinar la probabilidad de riesgo de la caída del rayo en una instalación pero tales cálculos deben ser vistos con cautela. Los valores típicos de GFD que se han obtenido para áreas geográficas con una actividad moderada poseen un valor de GFD entre 1 y 3 por  $Km^2$ , por año. En cambio para áreas con actividad baja de descargas el GFD es alrededor de 0.3 a 0.5 y entre 7 a 15 para zonas con alta actividad de descargas.

**Tabla 2. 13: Valores GFD aproximados alrededor del mundo en donde se relaciona con el nivel isoceráunico por año**

ISO (Por año)	GFD ( por Km)		
	Nivel Isoceráunico	Lim. Infer. Universal	Lim. Super. Universal
5	0.1	1.2	0.4
7	0.2	1.7	0.6
10	0.3	2.3	0.8
15	0.4	4	1.3
20	0.7	5	1.9
30	1.1	6	2.6
40	1.7	8	3.7
50	2.3	10	4.8
70	3.8	15	7.5
100	6	20	12.5
120	8	25	14.5
140	9.6	29	17.2
Resultados para:	Australia	USA y Europa	Uso general

**Tabla 2. 14: Ventanas de protección típicas**

Nivel de protección	Pico de Corriente	Probabilidad máxima de protección
Muy alta	3 KA - 180 KA.	99%.
Alta.	6 KA - 150 KA.	98%.
Estándar.	10 K - 130 KA.	93%.
Media.	15 KA - 130 KA.	85%.
Baja.	20 KA - 130 KA.	75%.

La columna 3 puede interpretarse como el porcentaje de descargas que inciden sobre la instalación y son interceptados por el sistema de apantallamiento.

### 2.3.4 ÍNDICE DE RIESGO

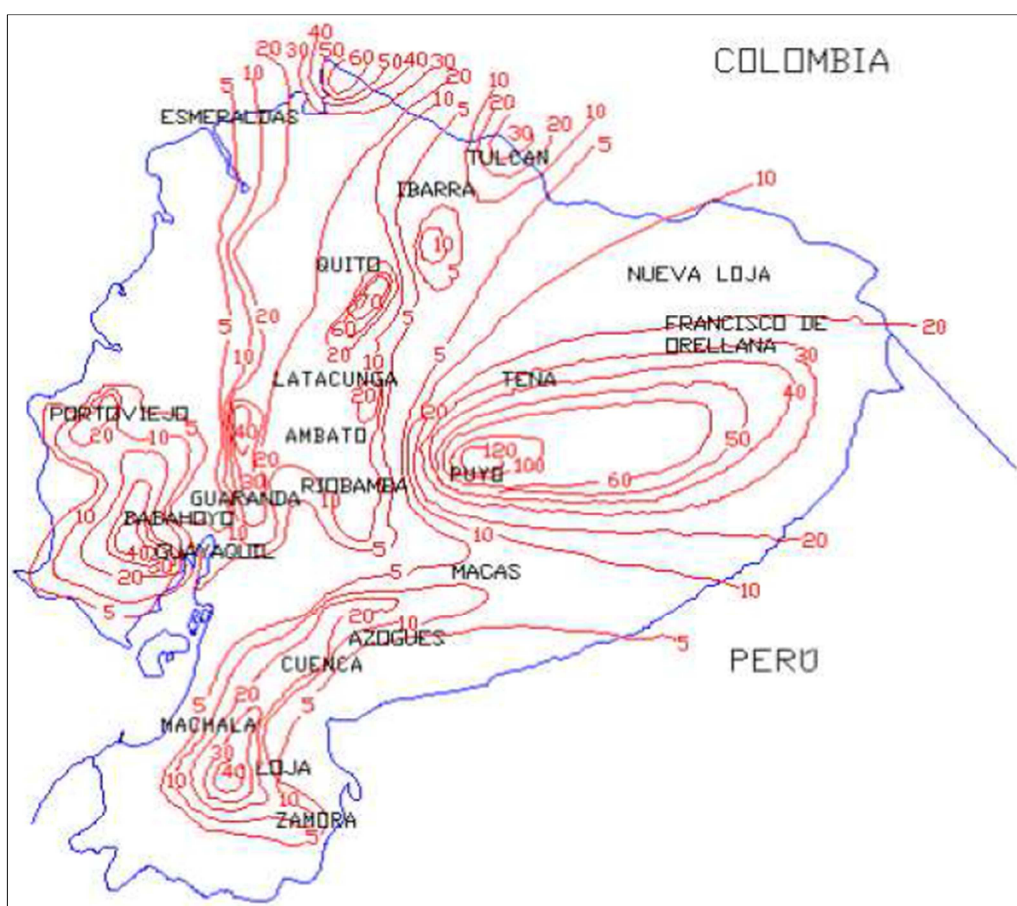
La norma IPP-1973 referente a la instalación de pararrayos establece el procedimiento para obtener el índice de riesgo mediante la suma:  $a + b + c$ . Cuando el índice de riesgo es mayor que 27 entonces se precisa la instalación de pararrayos.

El coeficiente  $a$  está dado por el tipo de estructura y la altura del edificio, según la siguiente tabla:

**Tabla 2. 15: Cálculo del índice de riesgo. Coeficiente “a”**

Tipo de Estructura	Tipo de cubierta	Altura del edificio en metros																					
		4	9	12	15	18	20	22	24	26	28	30	31	33	34	36	38	39	40	42	43	44	
Metálica o de hormigón armado	No metálica	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...	
	Metálica	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	...	
De ladrillo, hormigón en masa o mampostería	No metálica	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	...	
	Metálica	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	...	...	...	...	
De madera	No metálica	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	...	...	...	
	De ramaje vegetal	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	...	...	...	...	...	...	

El coeficiente  $b$  depende de la zona geográfica donde se ubica el edificio y está dado por el siguiente mapa:



**Figura 2. 20: Cálculo del índice de riesgo. Mapa isocerámico - Coeficiente “b”**

Fuente: INAMHI

El coeficiente  $c$  está dado por el lugar donde se encuentra ubicado el edificio, según los parámetros de la siguiente tabla:

**Tabla 2. 16: Cálculo del índice de riesgo. Coeficiente “c”**

Condiciones topográficas			Árboles y edificios circundantes		Tipo de edificio	
Terreno	Altitud	Altura respecto del edificio	Número	Vivienda unifamiliar	Bloques de viviendas u oficinas	Otros edificios
Llano	Cualquiera	Igual o mayor	Abundante	0	5	8
		Igual o mayor	Escaso	3	8	11
		Menor	Cualquiera	8	13	16
Ondulado	Cualquiera	Igual o mayor	Abundante	4	9	12
		Igual o mayor	Escaso	7	12	15
		Menor	Cualquiera	12	17	20
Montañoso	300 a 900 m	Igual o mayor	Abundante	6	11	14
		Igual o mayor	Escaso	9	14	17
		Menor	Cualquiera	14	19	22
	Superior a 900 m	Igual o mayor	Abundante	8	13	16
		Igual o mayor	Escaso	11	16	19
		Menor	Cualquiera	16	21	24

### 2.3.5 APANTALLAMIENTO ELÉCTRICO TIPO FRANKLIN (Zapata Jiménez, 2012)

Benjamín Franklin fue el primero en darse cuenta que la altura era un factor importante en el diseño de protecciones contra rayos. El rango de atracción de un pararrayos es la distancia sobre la cual un pararrayos sencillo vertical de una altura dada sobre un plano limpio, atrae una descarga atmosférica. El espacio protegido por tal dispositivo define el lugar en que la construcción no suele ser afectada por una descarga directa.



El sistema más sencillo y más antiguo de pararrayos, es el que consiste en terminales aéreas de cobre, bronce o aluminio anodizado terminadas en punta, llamadas puntas Franklin, colocadas sobre las estructuras a proteger de los rayos.

### 2.3.6 ZONAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

En Norteamérica, los equipos y estructuras son clasificados según su necesidad de protección contra descargas atmosféricas. Referencia: ANSI/NFPA 78-1989.

- **Primera clase:** Las estructuras de esta clase, requieren de poca o ninguna protección. El requisito es que verdaderamente estén conectados a tierra. Ejemplos de esta clase son:
  - a) Todas las estructuras metálicas excepto tanques u otras estructuras que contengan materiales inflamables.
  - b) Tanques de agua, silos y estructuras similares, construidas mayormente de metal.
  - c) Astas bandera construidas de algún material conductor.
- **Segunda clase:** Esta clase consiste de edificios con cubierta conductora y estructura no conductora, tal como edificios con cubierta metálica. Este tipo requiere de conductores para conectar la cubierta a electrodos en la tierra.
- **Tercera clase:** Esta clase consiste de edificios con estructura metálica y cubierta no conductora. Este tipo requiere de terminales aéreas conectadas a la estructura y fuera de la cubierta para actuar como terminales pararrayos.
- **Cuarta clase:** Esta clase consiste de estructuras no metálicas, que requieren una protección. Se incluyen en esta clase:
  - a) Edificios de madera, piedra, ladrillo u otros materiales no conductores, sin elementos de refuerzo metálicos.
  - b) Chimeneas. Aún con elementos de refuerzo, éstas deben tener una gran protección contra rayos, con terminales aéreas, cables de bajada y electrodos de aterrizado.

- **Quinta clase:** Una quinta clase consiste de aquellas cosas cuya pérdida puede ser de consecuencias, y que normalmente recibe un tratamiento pararrayos completo, incluyendo terminales aéreas, cables de bajada y electrodos de aterrizado. Entre éstas están:
  - a) Edificios de gran valor estético, histórico o intrínseco.
  - b) Edificios conteniendo combustibles o materiales explosivos.
  - c) Estructuras conteniendo sustancias que pueden ser peligrosas si se derraman como consecuencia de una descarga.
  - d) Tanques o conjuntos de tanques.
  - e) Plantas de energía y estaciones de bombeo.
  - f) Líneas de transmisión.
  - g) Subestaciones eléctricas.

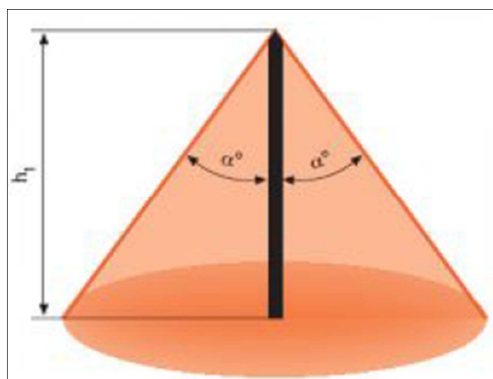
### **2.3.7 MÉTODOS PARA MARCAR LA ZONA A PROTEGER CON UN PARARRAYOS**

La solución más aproximada y la que se utiliza actualmente para la determinación y cálculo de la zona de protección es sobre la base del modelo electrogeométrico. Según este modelo, se puede asociar a cualquier cuerpo un radio de atracción para las descargas atmosféricas, cuyo valor depende del valor de cresta de la corriente de las descargas. (Martínez Velasco, 2008, pág. 18)

Se analizaran dos de las varias técnicas de diseño para el cálculo y determinación de las formas geométricas que marcan las zonas de protección ofrecidas por los sistemas pararrayos:

#### **a. CONO DE PROTECCIÓN**

El cono de protección es el método más antiguo contra descargas atmosféricas directas, este describe un volumen o zona de seguridad alrededor del elemento captor (pararrayos). Por lo tanto, las instalaciones que se encuentran dentro de esta superficie cónica tendrán una incidencia mínima de ingreso de descargas.

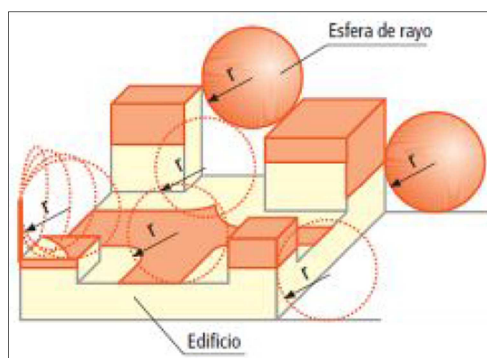


**Figura 2. 21: Zona protegida cónica**

La limitación que presenta este concepto es cuando se aplica a estructuras muy elevadas, pues hace pensar en la existencia de volúmenes de protección muy grandes, ya que la zona estimada es función de la altura de la estructura del pararrayo (torre).

#### **b. ESFERA RODANTE**

El método de la esfera rodante se utiliza para establecer el área de protección de las puntas Faraday. Este consiste en rodar una esfera imaginaria sobre tierra, alrededor y encima de la instalación a proteger o cualquier otro objeto en contacto con la tierra, capaz de actuar como un punto de intercepción de la corriente de rayo. La esfera imaginaria debe rodarse (desde el nivel de la tierra) hacia la estructura a proteger e instalar una terminal aérea en el punto de contacto con la estructura.



**Figura 2. 22: Aplicación esquemática del método de la esfera rodante en una superficie muy irregular**

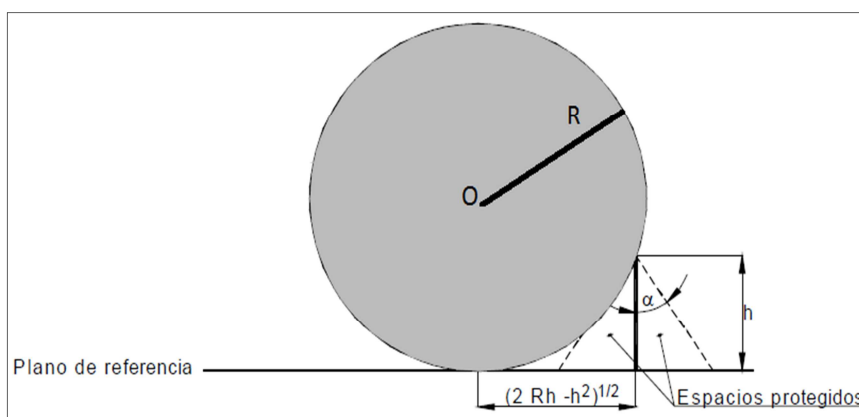
Una vez especificado el primer punto de sacrificio para la corriente de rayo, debe rodarse la esfera por encima del terminal aéreo y hacia el techo de la estructura e instalarse una terminal aérea de intercepción en todos aquellos puntos donde la esfera imaginaria toque la estructura o edificio a proteger.

Este proceso debe mantenerse hasta cubrir la totalidad del edificio o estructura a proteger. El espacio comprendido bajo el rodamiento de la esfera representa el volumen protegido. (Santafeciedad, 2012)

**Tabla 2. 17: Colocación del dispositivo captor en función del nivel de Protección**

Nivel de Protección	Métodos de protección		
	Esfera Rodante (m)	Mallas (m)	Ángulo de protección
I	20	5x15	Ver <b>Figura 2. 23</b>
II	30	10x10	
III	45	15x15	
IV	60	20x20	

En base a la anterior tabla se puede determinar la colocación de la punta del dispositivo pararrayos.



**Figura 2. 23: Radio de la esfera rodante, altura del pararrayo y ángulo de protección**

**Fuente: (Reyna, A., 2012)**

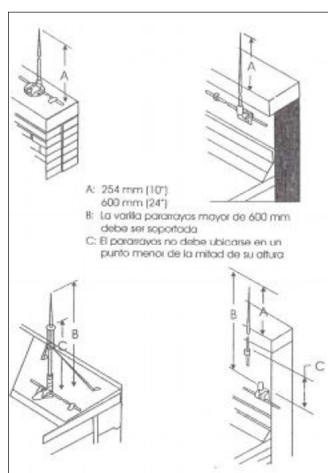
### 2.3.8 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN PARARAYOS

#### a. ALTURA Y ESPACIAMIENTO DE LAS VARILLAS PARARAYOS

La punta superior de las antenas de captación o varillas de los pararrayos, debe tener una altura mínima de 10 pulgadas por encima del objeto o área que se va a proteger. Una varilla pararrayos que exceda los 600 mm (24 pulgadas) de altura debe soportarse en un punto no menor de la mitad de la varilla. (Véase **Figura 2. 24**)

Otros parámetros importantes para un sistema de protección típicos son los siguientes:

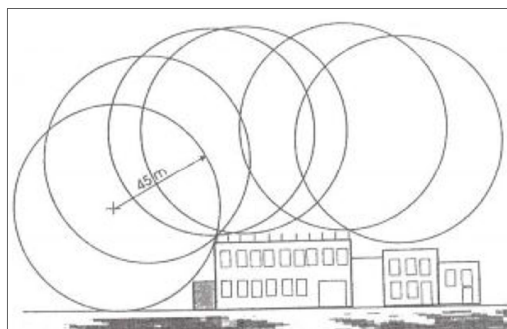
- El espacio máximo permitido entre varillas pararrayos, en los bordes del edificio, es de 6 m ó 7.6 m de acuerdo con la altura de las varillas pararrayos.
- Una antena de captación debe ser colocada a una distancia no superior a 60 cm (24 pulgadas) de las esquinas y otros objetos puntiagudos. Todas las chimeneas, ventiladores, astas de banderas, torres, tanques para agua y otras proyecciones deben estar revestidas de plomo.



**Figura 2. 24: Instalación de varillas pararrayos**

**Fuente: (Díaz, 2001)**

Las investigaciones científicas sobre los fenómenos atmosféricos indican que los centelleos destructivos del rayo tienen una distancia igual o superior a 45.75 m (150 pies). De esta forma, el contorno de la zona protegida por una de las varillas pararrayos estándar, se ha definido como un área bajo un arco, que tiene un radio máximo de 45.75 m y es tangente a la tierra, mientras que toca la punta de una antena.



**Figura 2. 25: Esfera rodante área de protección entre pararrayos**

**Fuente: (Zapata Jiménez, 2012)**

El techo de edificios altos requiere terminales ubicados en la mitad del techo y espaciadas entre si hasta distancias de 15 m. Todas las estructuras que se extienden sobre la protección de las terminales del techo, como la cabecera de ascensores, grandes unidades de ventilación y otras, deben estar equipadas con sus propias antenas de protección.

Las antenas pararrayos deben conectarse a una rejilla de conductores de interconexión, la cual se conecta a los bajantes o conductores de entrada que se extienden hasta el suelo y se conectan a los electrodos de tierra apropiados para este sistema. (Díaz, 2001, pág. 224)

De acuerdo a las normas de la Empresa Eléctrica Quito los pararrayos para redes primarias deberán ser especificados para las siguientes tensiones nominales y tensiones máximas de descarga para una onda de corriente de  $8/20\mu\text{s}$ , donde  $8\mu\text{s}$  es el

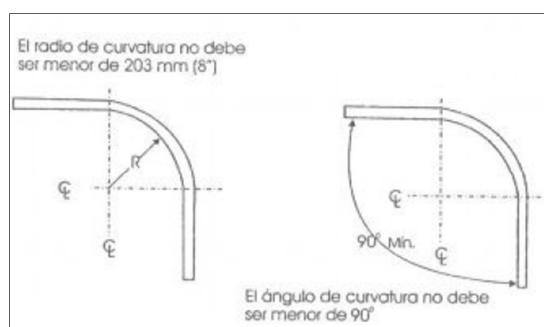
tiempo de ascenso de la corriente hasta 20kA y 20 $\mu$ s es el tiempo de decaimiento hasta que la corriente llega al 50% del valor de la corriente máxima (20kA).

### b. CONDUCTORES BAJANTES

Permiten conectar el pararrayos a su respectivo electrodo de tierra. Dos es el número mínimo de conductores bajantes para cualquier estructura. En el caso de una torre de comunicaciones se utiliza un conductor bajante, generalmente del número 2, trenzado, desnudo, y se utiliza la torre como el segundo conductor bajante. En caso de estructuras o miembros verticales de gran altura se harán conexiones adicionales a intervalos que no excedan los 60 m (200 pies)

### c. CURVATURA DE LOS CONDUCTORES

Para ofrecer una baja impedancia el ángulo de curvatura de los conductores utilizados en el sistema de protección contra rayos no debe ser menor de 90°, y debe tener un radio de curvatura no menor de 203 mm (8 pulgadas).



**Figura 2. 26: Curvatura de los conductores**

**Fuente: (Díaz, 2001)**

### d. IMPEDANCIA A TIERRA

Según la norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP la toma a tierra de un pararrayos no debe sobrepasar los 15  $\Omega$ . Para la industria de computadoras y la de telecomunicaciones se les exige rebasar los requisitos. Incluso algunos fabricantes de

equipos se les exige un valor de  $5\Omega$  o menor. En el caso de áreas con alta incidencia de rayos se recomienda una resistencia del sistema de tierra de  $1\Omega$  o menor. La toma de tierra de la protección contra las descargas es de importancia primordial por lo que es indispensable que entre el electrodo y el terreno exista la mínima resistencia posible para una dispersión segura de las altas corrientes de descarga. En la práctica se ha demostrado que instalaciones con resistencias de tierra inferiores a  $5\Omega$  presentan la menor incidencia de efectos por caída de rayos.

Los electrodos de tierra pueden ser varillas de tierra individuales o un anillo conductor enterrado alrededor del perímetro del edificio, o ambos. Todos los componentes de este sistema son de cobre, aluminio anodizado, o acero inoxidable.

El sistema de tierra para rayos no debe ser el sistema electrodo del edificio, pero debe estar conectado a este (secciones 250-106 del código y FNP núm. 2). Mientras menor sea el valor de resistencia de puesta a tierra de un sistema de transmisión, menor será el voltaje de fase y tierra en el punto de falla; y por lo tanto, menor será el voltaje nominal requerido de los pararrayos. Un valor inferior del voltaje nominal de los pararrayos significa un valor inferior del voltaje de descarga del pararrayos, y por lo tanto, un mayor margen de protección para una aislación dada de los equipos de subestaciones o la posibilidad de reducción en los niveles de aislación de estos. Para equipos electrónicos sensibles, la resistencia debe ser menor a 5 ohmios. En esta categoría están los equipos hospitalarios, computadores y de comunicaciones.

Una resistencia idónea (no ideal) esta del orden de los 3 Ohmios o menos, de acuerdo a las recomendaciones: "The Emerald Book" de la IEEE. Si se tienen varios sistemas de alimentación en AC, cada uno con su tierra separada se puede producir ruido en el sistema de tierra conectado a las computadoras. En este caso se utiliza una malla de referencia de señales para igualar el voltaje en un mayor rango de frecuencia. Las carcasas de las computadoras se conectarán a esta malla y la barra de tierra del sistema. La malla se conectará también a la barra de tierra principal. (Agulleiro, I., y Martínez, M., 2012)



## 2.4 PARÁMETROS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS <sup>(Zapata Jiménez, 2012)</sup>

Para el diseño de un sistema de protección contra rayos, se consideran dos tipos de sistemas, los cuales dependen de la altura de la estructura o edificio. Así se consideran los materiales de clase I, para edificios que no exceden 23 m (75 pies) y los de clase II, para edificios que exceden los 23m. La **Tabla 2. 18** y la **Tabla 2. 19**, muestran los requisitos mínimos a emplearse para la protección de rayos, los mismos que han sido establecidos por el código NFPA 780.

**Tabla 2. 18: Requisitos mínimos para materiales de clase I**

Tipo de conductor	Estándar	Cobre		Aluminio	
		Estándar	Métrico	Estándar	Métrico
Antena, pararrayos, sólido	Diámetro 3	3/8"	9.5mm <sup>2</sup>	½"	12.7mm <sup>2</sup>
Antena, pararrayos, tubular	Diámetro	5/8"	15.9mm <sup>2</sup>	5/8"	15.9mm <sup>2</sup>
Conductor de bajada	Multifilar	AWG#2	29mm <sup>2</sup>	98.6Kcm	50mm <sup>2</sup>
Conductor de unión	Multifilar	AWG#6	13.3mm <sup>2</sup>	AWG#4	21.15mm <sup>2</sup>

**Tabla 2. 19: Requisitos mínimos para materiales de clase II**

Tipo de conductor	Estándar	Cobre		Aluminio	
		Estándar	Métrico	Estándar	Métrico
Antena, pararrayos, sólido	Diámetro 3	1/2"	12.7 mm <sup>2</sup>	5/8"	15.9 mm <sup>2</sup>
Antena, pararrayos, tubular	Multifilar	AWG#15		AWG#13	
Conductor de bajada	Multifilar	AWG#17		AWG#14	
Conductor de unión	Solido	1/2"	12.7 mm <sup>2</sup>	1/2"	12.7 mm <sup>2</sup>

## CAPÍTULO 3

### RECOPIACIÓN DE DATOS DE DISEÑO

#### 3.1 LEVANTAMIENTO DE DIAGRAMAS Y PLANOS DEL CAMPUS

La información aquí presentada se adquirió en base a fuentes como: El informe de instalaciones eléctricas de la empresa E.V. Ingeniería eléctrica presentado a ELEPCO S.A. para su aprobación, además de diagramas y planos de la institución presentados al final en varios anexos.

##### 3.1.1 DATOS DE LA ETAPA 1 DEL CAMPUS GRAL. RODRÍGUEZ L.

**Tabla 3. 1: Distribución de potencia del bloque de aulas A-B**

Carga	Tablero	Potencia(KVA)
<b>Regulador1 90 KVA</b>	TP-1	55,49
<b>Regulador2 90 KVA</b>	TP-2	55,49
<b>Regulador1 40 KVA</b>	TP-3	21,22
<b>Regulador2 40 KVA</b>	TP-4	20,53
<b>Climatización bloque B</b>	TD-B AC	26,57
<b>Climatización bloque A</b>	TD-A AC	26,57
<b>UPS2 15 KVA</b>	TDR-CM	16,88
<b>UPS1 80 KVA</b>	TDP-R	81,74
<b>Ascensores</b>		8,95
<b>Transformador CT-06 / 300 KVA (Aulas bloque A-B)</b>		313,87

**Tabla 3. 2: Distribución de potencia de la Biblioteca**

<b>Carga</b>	<b>Tablero</b>	<b>Potencia(KVA)</b>
	TD-01I	11,73
<b>Regulador</b>	TP-T	53,25
<b>UPS</b>	TDR-01	15,05
	TD-AC3	6,09
	TD-AC2	4,83
	TD-AC1	14,52
<b>Transformador CT-07 / 75 KVA (Biblioteca)</b>		105,47

**Tabla 3. 3: Distribución de potencia de las Residencias**

<b>Carga</b>	<b>Tablero</b>	<b>Potencia(KVA)</b>
	TP-I	19,90
<b>Regulador</b>	TP-R	109,29
<b>UPS</b>	TDR-PB	10,74
	TD-A AC	4,21
	TD-B AC	4,21
	TD-ASC 1	3,14
	TD-ASC 2	6,28
<b>Transformador CT-08 / 150 KVA (Residencias)</b>		157,80

### **3.1.2 DIAGRAMAS UNIFILARES Y PLANOS DEL PROYECTO ESPE - CAMPUS GRAL. RODRÍGUEZ LARA**

- **DIAGRAMA UNIFILAR DE MEDIA TENSIÓN (ANEXO A)**
- **DIAGRAMAS UNIFILARES DE BAJA TENSIÓN (ANEXO B)**
- **ESQUEMA DEL SISTEMA ELÉCTRICO (ANEXO C)**
- **PLANO TOPOGRÁFICO (ANEXO D)**
- **PLANO DE REFERENCIAS PARA MEDICIONES (ANEXO E)**
- **VISTAS - EDIFICACIONES (ANEXO F)**

### 3.1.3 DATOS OBTENIDOS DE LOS LITERALES ANTERIORES

Se basan en la información del sistema eléctrico para el que se diseñarán los SPT.

#### a. DATOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN

Si no se tiene el valor  $Z\%$  del transformador se debe utilizar la siguiente tabla:

**Tabla 3. 4: Impedancias porcentuales típicas de los transformadores de acuerdo a su potencia nominal**

Rango de potencia (KVA)	Z%
$5 \leq S_T \leq 100$	3,5
$100 < S_T \leq 400$	4,0
$400 < S_T \leq 1000$	4,6
$S_T > 1000$	5,0

Fuente: <http://www.oocities.org/stselectricos/clase3.pdf>

**Tabla 3. 5: Características técnicas del Sistema eléctrico**

SISTEMA	Transformador	Potencia (KVA)	Vin (V)	Vout (V)	Z%
TRANSFORMACIÓN DE MEDIA TENSIÓN A BAJA TENSIÓN	CT-01	100	13800	127/220	3,5
	CT-02	75	13800	127/220	3,5
	CT-03	200	13800	127/220	4
	CT-04	30	13800	127/220	3,5
	CT-05	100	13800	127/220	3,5
	CT-06	300	13800	127/220	4
	CT-07	75	13800	127/220	3,5
	CT-08	150	13800	127/220	4
	CT-09	30	13800	127/220	3,5
	CT-10	50	13800	127/220	3,5
TRANSFORMACIÓN DE MEDIA TENSIÓN A BAJA TENSIÓN	CT-11	30	13800	127/220	3,5
	CT-12	30	13800	127/220	3,5
	CT-13a	45	13800	127/220	3,5
	CT-13b	30	13800	440	3,5
	CT-14	30	13800	127/220	3,5
GRUPO MOTOR GENERADOR	TE	1200	440	13800	5

**b. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA DE LOS TRANSFORMADORES A LAS DIFERENTES DEPENDENCIAS, TIPOS DE PUESTAS A TIERRA NECESARIAS**

**Tabla 3. 6: Abastecimiento de las dependencias (Necesidad de SPT y apantallamientos eléctricos contra descargas atmosféricas)**

N°	Ubicación	Tipos de sistemas de puesta a tierra			
		TS	TP	TE	TR
		Potencias para el diseño de los SPT (KVA)			Edificio a apantallar
1	Centro de transformación N° 1	100			
	Edificio administrativo		100	100	EDIFICIO ADMINISTRATIVO
2	Centro de transformación N° 2	75			
	Casino		75		
	Postgrados				AUDITORIO
3	Centro de transformación N° 3	200			
a	Bloque de aulas C		200	IGUAL A TE 6	AULAS BLOQUES C Y D
b	Bloque de aulas D				
4	Centro de transformación N° 4	30			
a	Aguas servidas		30		AGUAS SERVIDAS
b	Desechos sólidos				DESECHOS SÓLIDOS
5	Centro de transformación N° 5	100			
a	Laboratorios		100	19,21	LABORATORIOS BLOQUE A LABORATORIOS BLOQUE B
b	Laboratorios mecánica				
c	Laboratorios electrónica			47,21	SERV. UNIVERSITARIOS
d	Servicios universitarios				
6	Centro de transformación N°6	300			
a	Bloque de aulas A		300	UPS 1(15) UPS 2(80)	AULAS BLOQUES A Y B
b	Bloque de aulas B				
7	Centro de transformación N°7	75			
	Biblioteca		75	UPS(15,05)	BIBLIOTECA
8	Centro de transformación N° 8	150			
a	Residencias		150	UPS(10,74)	RESIDENCIAS BLOQUE B RESIDENCIAS BLOQUE D
b	Residencias bloque B				
c	Residencias bloque D				
9	Centro de transformación N° 9	30			
a	Cocina, bodega, fogón		30		COMEDOR-COCINA
b	Edificio MED				
c	Sistema integrado de salud				S. INTEGRADO DE SALUD

Esta tabla continúa en la siguiente página

Continuación de la tabla de la anterior página					
<b>10</b>	Centro de transformación N° 10	50			
	Metalurgia (Talleres)		50		TALLERES
<b>11</b>	Centro de transformación N° 11	30			
	Coliseo gimnasio		30		COLISEO-GIMNASIO
<b>12</b>	Centro de transformación N° 12	30			
	Área deportiva descubierta				
<b>13</b>	Centro de transformación N° 13 a				
	Sistema de bombeo de agua	45			
	Centro de transformación N° 13 b				
	Bomba electro sumergible	30			
<b>14</b>	Centro de transformación N°14	30			
a	Bar, banco, librería, aulas		30		
b	Servicios				
<b>15</b>	Grupo motor Generador y TE		1200		CASETA DE GENERADOR

### 3.2 MEDICIONES Y PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO (MÉTODO DE WENNER)

Según el plano topográfico del ANEXO D se aprecia que el Campus Gral. Rodríguez Lara posee un terreno regular en la mayoría de sus sectores, ya que en ciertas partes su suelo ha sido modificado, por lo que se realizará varias mediciones de la resistividad del suelo tomando como referencias ciertos lugares indicados, en el ANEXO E. Para las mediciones se emplea el equipo Ground resistance tester Modelo 4630 que posee una fórmula escrita en su cubierta, que es la misma de la ecuación (2.6), empleada para calcular la resistividad de la **Tabla 3.7**, donde se toma como valor de R, la mayor de las 2 lecturas.

**Tabla 3. 7: Datos obtenidos en las mediciones**

Referencias: ANEXO E	a: Separación entre electrodos	R: Lectura 1 ( $\Omega$ )	R: Lectura 2 ( $\Omega$ )	Resistencia seleccionada ( $\Omega$ )	Resistividad ( $\Omega m$ )
1. (CT-01)	4	0,95	0,74	0,950	23,88
2. (CT-02)	4	1,32	0,72	1,320	33,18
3. (CT-03)	4	0,95	0,73	0,950	23,88
4. (CT-04)	4	1,2	1,87	1,870	47,00
5. (CT-05)	4	0,8	1,4	1,400	35,19
6. (CT-06)	4	1,19	1,33	1,330	33,43
7. (CT-07)	4	1,25	1,32	1,320	33,18
8. (CT-08) y 9c. (S. I. de Salud)	4	0,95	2,12	2,120	53,28
9. (CT-09)					
10. (CT-10)	4	1,1	0,89	1,100	27,65
11. (CT-11)					
12. (CT-12)	4	1,71	1,23	1,710	42,98
13. (CT-13), Generador Y TE	4	1,52	1,47	1,520	38,20
14. (CT-14)	4	1,72	2,8	2,800	70,37
<b>Resistividad Promedio del Campus</b>					<b>38,52</b>

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA

En éste capítulo se describirá el procedimiento para el diseño de una sola malla a tierra, en él se explicará cómo mejorar su resistencia; Se procederá también a seleccionar el apantallamiento contra descargas atmosféricas para un edificio.

El diseño y selección de los elementos en este capítulo, servirá como modelo para el diseño de las demás mallas y apantallamientos, necesarios para proteger a las demás áreas del campus, en el capítulo 5 se presentará la configuración de todos los SPT del sistema.

#### 4.1 DISEÑO DE LA MALLA A TIERRA PARA LA CÁMARA CT-03 (PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN)

Los valores de diseño han sido obtenidos de los capítulos anteriores.

##### 4.1.1 CONSTANTES Y VARIABLES EMPLEADAS EN EL DISEÑO

**Tabla 4. 1: Constantes y variables de diseño**

DATOS DE CAMPO					
N°	Símbolo	Definición	Ubicación	Valor	Unidad
1	$t_f$	Tiempo de duración de la falla	<b>Diseño</b>	0,5	Segundos
2	$S_F$	Factor de división de corriente de defecto, representa el % de corriente que disipará la malla a tierra, el resto retornará al sistema hasta lograr despejar la falla.	<b>Literal f</b>	A obtener	
3	$D_F$	Factor de asimetría	<b>Literal a</b>	A obtener	
4	$R_m$	Resistencia deseada para la malla	<b>Tabla 2. 10</b>	5	$\Omega$
5	$\rho$	Resistividad del suelo	<b>Tabla 3. 7</b>	21,11	$\Omega\text{m}$
6	$\rho_S$	Resistividad del material de la capa superficial si esta existiese	<b>Tabla 2. 12</b>	1300	$\Omega\text{m}$
Esta tabla continúa en la siguiente página					



Continuación de la tabla de la anterior página					
7	$h_s$	Espesor de la capa superficial	<b>Tabla 2. 12</b>	0,07	m
8	$h$	Profundidad a la que se enterrará la malla	<b>Diseño</b>	0,6	m
9	$A$	Área de la malla $\leq$ Espacio disponible	<b>Diseño</b>	A obtener	$m^2$
<b>DATOS DEL TRANSFORMADOR (Reductor- conexión triángulo estrella)</b>					
N°	Símbolo	Definición	Ubicación	Valor	Unidad
10	$S$	Potencia nominal del transformador	<b>Tabla 3. 5</b>	200	VA
11	$Z$	Impedancia porcentual del transformador	<b>Tabla 3. 4</b>	4	$\Omega$
12	$V_{AV}$	Voltaje en el primario del transformador	<b>Tabla 3. 5</b>	13800	V
13	$V_{BV}$	Voltaje en el secundario del transformador	<b>Tabla 3. 5</b>	220	V
<b>OTRAS CONSTANTES Y VARIABLES EMPLEADAS</b>					
N°	Símbolo	Definición	Ubicación	Valor	Unidad
14	$I_{CC.S3\phi}$	Corriente de corto circuito trifásica simétrica (en el secundario que es donde se analiza la falla)	<b>Ec. (4. 2)</b>	A obtener	A
15	$I_{CC.AS3\phi}$	Corriente de corto circuito trifásica asimétrica (máxima en el secundario)	<b>Ec. (4. 1)</b>	A obtener	A
16	$I_{\phi T}$	Corriente monofásica a tierra (en el primario, es igual a la corriente de falla simétrica en el primario)	<b>Ec. (4. 6)</b>	A obtener	A
17	$R_F$	Resistencia a la falla	<b>Tiende a 0</b>	0	$\Omega$
18	$A_{Kcm}$	Área del conductor calculada	<b>Ec. (4. 7)</b>	A obtener	Kcm
19	$A_{mm.2}$	Área del conductor calculada	<b>Ec. (4. 7)</b>	A obtener	$mm^2$
20	$A_C$	Área del conductor seleccionada	<b>Tabla 2. 7</b>	A obtener	$mm^2$
21	$K_F$	Constante para diferentes materiales a diferentes temperaturas de fusión ( $T_m$ ) a una temperatura ambiente de 40 °C	<b>Tabla 2. 8</b>	7,06	
22	$d$	Diámetro del conductor	<b>Tabla 2. 7</b>	A obtener	m
23	$V_{P70}$	Voltaje de paso para una persona de 70 Kg.	<b>Ec. (4. 8),(4. 13)</b>	A obtener	V
24	$V_{C70}$	Voltaje de contacto o toque para una persona de 70 Kg.	<b>Ec. (4. 9),(4. 14)</b>	A obtener	V
25	$C_s$	Coeficiente en función del terreno y la capa superficial	<b>Ec. (4. 10), (4. 12)</b>	A obtener	
26	$V_m$	Voltaje de malla	<b>Ec. (4. 33)</b>	A obtener	V
27	$L_P$	Longitud del perímetro de la malla	<b>Ec. (4. 20)</b>	A obtener	m
Esta tabla continúa en la siguiente página					

Continuación de la tabla de la anterior página					
28	$n_{cy}$	Número de conductores horizontales a lo largo de la malla	<b>Figura 4. 1</b>	A obtener	m
29	$n_{cx}$	Número de conductores horizontales a lo ancho de la malla	<b>Figura 4. 1</b>	A obtener	m
30	$L_Y$	Longitud máxima horizontal a lo largo de la malla	<b>Figura 4. 1</b>	A obtener	m
31	$L_X$	Longitud máxima horizontal a lo ancho de la malla	<b>Figura 4. 1</b>	A obtener	m
32	D	Espaciamiento entre los conductores horizontales de la malla (Entre 3 y 7 m.)	<b>Figura 4. 1</b>	A obtener	m
33	$N_V$	Número de electrodos tipo varilla vertical	<b>Figura 4. 1</b>	A obtener	m
34	$L_V$	Longitud de una sola varilla vertical	<b>Literal 2.2.8</b>	1,8	m
35	$L_C$	Longitud total de todos los conductores horizontales de la malla	<b>Ec. (4. 16)</b>	A obtener	m
36	$L_T$	Longitud total de todos los conductores que conforman la malla	<b>Ec. (4. 17)</b>	A obtener	m
37	$L_R$	Longitud total de todos los electrodos tipo varilla de la malla	<b>Ec. (4. 19), (4. 18)</b>	A obtener	m
38	$L_P$	Longitud del perímetro de la malla	<b>Ec. (4. 20)</b>	A obtener	m
39	$R_g$	Resistencia calculada de la malla	<b>Ec. (4. 21)</b>	A obtener	$\Omega$
40	$I_G$	Corriente máxima de malla	<b>Ec. (4. 22)</b>	A obtener	A
41	GPR	Aumento de potencial de tierra	<b>Ec. (4. 23)</b>	A obtener	V
42	$V_m$	Voltaje de malla	<b>Ec. (4. 33)</b>	A obtener	V
43	$n_a$	Factor geométrico de malla	<b>Ec. (4. 24)</b>	A obtener	
44	$n_b$	Factor geométrico de malla	<b>Ec. (4. 25)</b>	A obtener	
45	$n_c$	Factor geométrico de malla	<b>Ec. (4. 26)</b>	A obtener	
46	$n$	Factor geométrico de malla	<b>Ec. (4. 27)</b>	A obtener	
47	$K_{ii}$	Factor de corrección por efectos en las esquinas de la malla (por ubicación de los electrodos)	<b>Ec. (4. 28)</b>	A obtener	
48	$K_h$	Factor de corrección por la profundidad de enterramiento de la malla	<b>Ec. (4. 30)</b>	A obtener	
49	$h_0$	Profundidad de referencia (Se asume un valor de 1)	<b>Diseño</b>	1	m
50	$K_i$	Factor de corrección por geometría de malla	<b>Ec. (4. 31)</b>	A obtener	
51	$K_m$	Factor de espaciamento para voltaje de malla	<b>Ec. (4. 32)</b>	A obtener	
52	$V_S$	Voltaje de piso o voltaje de paso en caso de falla	<b>Ec. (4. 35)</b>	A obtener	V
53	$K_S$	Factor de espaciamento para voltaje de paso	<b>Ec. (4. 34)</b>	A obtener	
54	$L_S$	Longitud efectiva de $L_C + L_R$ por voltaje de paso	<b>Ec. (4. 36)</b>	A obtener	m

En la **Tabla 4. 1** los parámetros  $t_f$ ,  $S_F$ ,  $D_F$ ,  $h$ ,  $V_{AV}$ ,  $R_F$ ,  $K_F$ ,  $L_V$ ,  $K_{ii}$  y  $K_i$  son las únicas constantes para el diseño de todas las mallas del proyecto, el resto de parámetros deben ser calculados de acuerdo a los datos del **CAPÍTULO 3**.

#### 4.1.2 CÁLCULOS EN EL DISEÑO DE UNA MALLA A TIERRA

El significado y valor de las constantes y variables presentes en las fórmulas empleadas para los cálculos están descritos en la **Tabla 4. 1**, Las fórmulas fueron obtenidas del manual para el diseño de mallas para subestaciones de la normativa IEEE Std. 2000.

##### a. CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO ASIMÉTRICA TRIFÁSICA ( $I_{CC.S3\emptyset}$ )

La corriente de corto circuito asimétrica trifásica es la mayor corriente de cortocircuito a disipar, su valor sirve para dimensionar el calibre del conductor y de acuerdo al literal **2.1.4** su fórmula es:

$$I_{CC.AS.3\emptyset} = D_f * I_{CC.S3\emptyset} \quad (4. 1)$$

El valor  $D_f$  esta dado en la **Tabla 2. 2**, para un tiempo estimado de 0,1 segundos en estado de corto circuito transiente y por una relación aproximada  $X/R=20$ . La  $I_{CC.S3\emptyset}$  está dada por:

$$I_{CC.S3\emptyset} = \frac{V_{BV}}{\sqrt{3} * (Z_T + Z_{LF})} \quad (4. 2)$$

Como se desconoce  $Z_{LF}$  (impedancia de la línea de fase) donde sucede la falla, ésta se descartará ya que la misma tiende a ser cero. La resistencia a la falla también se considera nula ya que se considera que la corriente de corto circuito del sistema tiende al infinito, reduciendo la ecuación (4. 2):

$$I_{CC.S3\emptyset} = \frac{V_{BV}}{\sqrt{3} * (Z_T)} \quad (4. 3)$$

Siendo:

$$Z_T = \frac{Z\%}{100} * \frac{V_{BV}^2}{S} \quad (4.4)$$

Al reemplazar la **Ec. (4.4)** en la **Ec. (4.3)** se tiene:

$$I_{CC.S3\emptyset} = \frac{100 * S}{\sqrt{3} * V_{BV} * Z\%} \quad (4.5)$$

Ahora se procede a reemplazar los términos que obtenidos de la **Tabla 4.1** en la **Ec. (4.5)**:

$$I_{CC.S3\emptyset} = \frac{100 * 200000}{\sqrt{3} * 220 * 4}$$

$$I_{CC.S3\emptyset} = 13121,60 \text{ A}$$

Ya calculada  $I_{CC.S3\emptyset}$  se sustituye su valor en la **Ec. (4.1)** junto con el valor de  $D_F$ :

$$I_{CC.AS.3\emptyset} = 1,232 * 13121,60$$

$$I_{CC.AS.3\emptyset} = 16165,81 \text{ A}$$

Para posteriores cálculos es necesario conocer también  $I_{\emptyset T}$ .

$$I_{\emptyset T} = \frac{\sqrt{3} * V_{BV}}{V_{AV}} * I_{CC.S3\emptyset} \quad (4.6)$$

$$I_{\emptyset T} = \frac{\sqrt{3} * 220}{13800} * 13121,60$$

$$I_{\emptyset T} = 362,32 \text{ A}$$

## b. CÁLCULO DEL ÁREA DEL CONDUCTOR

Según la normativa se puede utilizar la siguiente ecuación simplificada:

$$A_{Kcmil} = \frac{I_{CC.AS.3\emptyset}}{1000} * K_f * \sqrt{t_f} \quad (4.7)$$

Reemplazando valores en la ecuación anterior se obtiene:

$$A_{Kcmil} = 16,16581 * 7,06 * \sqrt{0,5}$$

$$A_{Kcmil.} = 80,72 \text{ Kcmil.}$$

Como un *Kcmil.* equivale a  $0,507 \text{ mm}^2$ , el área será:

$$A_{mm^2} = 40,92 \text{ mm}^2$$

Se selecciona un conductor de cobre, sí no existe un valor aproximado se debe seleccionar un conductor inmediato superior, considerando que según la **Tabla 2. 6** el calibre mínimo de un conductor a usar debería ser el conductor de cobre # 2/0 AWG por razones mecánicas, para evitar que éste se rompa por el movimiento de la tierra o asentamientos normales del terreno. Los rangos típicos de calibre de conductores son entre #2/0 AWG al 500 kCMIL. (IEEE 80. Sección 16.2.5).

Las normas nacionales (NEC 250-81 y Empresa Eléctrica Quito), recomiendan como conductor mínimo el #2 AWG ( $33.54 \text{ mm}^2$ ) de siete hilos, con el fin de mejorar la rigidez mecánica de la malla y soportar la corrosión.

Para seleccionar un conductor real, se recomienda utilizar un catálogo de conductores como el de la **Tabla 2. 7**. Obedeciendo las normas nacionales, considerando el terreno como muy corrosivo, se seleccionará el conductor número # 1/0 AWG. El conductor más utilizado comúnmente es el conductor de cobre trenzado de 7 hilos, según la IEEE 80 - sección 11.2.1.

Por lo tanto según la **Tabla 2. 7**:

$$A_c = 53,42 \text{ mm}^2$$

$$d = 9,26 \text{ mm}$$

Se transforma a metros  $d$  para facilitar posteriores cálculos:

$$d = 9,26 \text{ mm} * \frac{1m}{1000 \text{ mm}}$$

$$d = 0,00926 \text{ m}$$

### c. CÁLCULO DEL VOLTAJE DE PASO Y DE CONTACTO ( $V_{P70}$ Y $V_{C70}$ )

El Procedimiento se describe a continuación:

#### c.1 Fórmulas empleadas para el cálculo del voltaje de paso y de contacto para una persona de 70 kg. (Con capa superficial)

$$V_{P70} = \frac{(1000 + 6 * C_s * \rho_s) * 0,157}{\sqrt{t_f}} \quad (4.8)$$

$$V_{C70} = \frac{(1000 + 1,5 * C_s * \rho_s) * 0,157}{\sqrt{t_f}} \quad (4.9)$$

Al diseñar la malla a tierra con una capa superficial:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0,09} \quad (4.10)$$

#### c.2 Fórmulas empleadas para el cálculo del voltaje de paso y de contacto para una persona de 70 kg. (Sin capa superficial)

Al diseñar la malla a tierra sin una capa superficial:

$$\rho_s = \rho \quad (4.11)$$

$$C_s = 1 \quad (4.12)$$

Para nuestro diseño no se utilizará una capa superficial, pues aún no se sabe si será o no necesaria, entonces sustituyendo los dos parámetros anteriores en la **Ec. (4. 8)** y la **Ec. (4. 9)** los voltajes a calcular serán:

$$V_{P70} = \frac{(1000 + 6 * 1 * \rho) * 0,157}{\sqrt{t_f}} \quad (4.13)$$

$$V_{C70} = \frac{(1000 + 1,5 * 1 * \rho) * 0,157}{\sqrt{t_f}} \quad (4.14)$$

Reemplazando  $\rho$  y  $t_f$ :

$$V_{P70} = \frac{(1000 + 6 * 1 * 23,88) * 0,157}{\sqrt{0,5}}$$

$$V_{P70} = 253,84 \text{ V}$$

$$V_{C70} = \frac{(1000 + 1,5 * 1 * 23,88) * 0,157}{\sqrt{0,5}}$$

$$V_{C70} = 229,98 \text{ V}$$

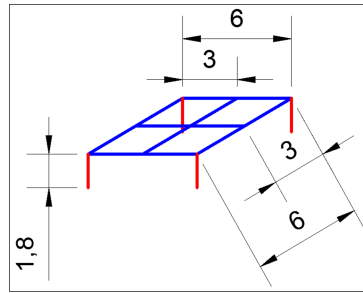
#### **d. DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN INICIAL DE LA MALLA**

Primero se verifica el área y la forma del terreno disponible. Considerando lo siguiente:

- El área de la malla debe ser menor o igual al espacio disponible de terreno donde esta será instalada.
- La forma de la malla dependerá en parte del área de terreno disponible
- La malla puede ser diseñada con o sin varillas verticales

Por poseer espacio suficiente, es correcto que el área elegida por el diseñador sea de  $36 \text{ m}^2$  y que su forma sea cuadrada. El diseño se hará con la inclusión de varillas verticales en la malla.

Ahora se definirá los parámetros físicos para la construcción de la malla, estos deben encontrarse dentro de los límites del área de la malla, es por esto que se han elegido las dimensiones ilustradas en la siguiente figura:



**Figura 4. 1: Dimensiones elegidas para el área de la malla (m)**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

Por lo tanto según la figura anterior se tiene:

$$n_{cy} = 3$$

$$n_{cx} = 3$$

$$L_y = 6\text{m}$$

$$L_x = 6\text{m}$$

$$D = 3\text{m}$$

$$N_V = 4$$

$$L_V = 1,8\text{m (Literal 2.2.8)}$$

Las fórmulas que se aplicaran a continuación están dadas para una malla cuadrada o una malla rectangular:

$$A = L_y * L_x \quad (4.15)$$

$$L_C = n_{cy}L_y + n_{cx}L_x \quad (4.16)$$

Si el diseño se realiza sin varillas verticales:

$$L_T = L_C \quad (4.17)$$

Si el diseño se realiza con varillas verticales:

$$L_T = L_C + L_R \quad (4.18)$$

$$L_R = N_V * L_V \quad (4.19)$$

$$L_P = (L_x * 2) + (L_y * 2) \quad (4.20)$$



Reemplazado los valores en las formulas **Ec. (4. 15), Ec. (4. 16), Ec. (4. 18), Ec. (4. 19)** y **Ec. (4. 20)** se obtiene:

$$A = 6 * 6$$

$$A = 36 \text{ m}^2$$

$$L_C = (3 * 6) + (3 * 6)$$

$$L_C = 36 \text{ m}$$

$$L_R = 4 * 1,8$$

$$L_R = 7,2$$

$$L_T = 36 + 7,2$$

$$L_T = 43,2 \text{ m}$$

$$L_P = (6 * 2) + (6 * 2)$$

$$L_P = 24 \text{ m}$$

#### e. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA ( $R_g$ )

$$R_g = \rho * \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4. 21)$$

Reemplazando:

$$R_g = 23,88 * \left[ \frac{1}{43,2} + \frac{1}{\sqrt{20 * 36}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,6 * \sqrt{20/36}} \right) \right]$$

$$R_g = 2,06 \Omega$$

La principal diferencia que tienen las mallas a tierra según su aplicación radica en el valor de resistencia que exige la normativa según el ítem 2.2.2. Por lo tanto la resistencia para nuestra malla de protección debe ser menor o igual a  $5\Omega$ , como  $R_g = 2,06 \Omega$  no se necesita modificar por ahora ningún parámetro de diseño.

#### f. CÁLCULO DE LA CORRIENTE MÁXIMA DE MALLA ( $I_G$ )

$$I_G = D_f * S_f * I_{\emptyset T}. \quad (4.22)$$

Considerando el sistema de distribución y que el lugar donde sucede la falla es en la salida del secundario del transformador según el literal 2.2.10;  $Z_{eq} = 6,57 + j1.17$ , por lo que:

$$S_f = \frac{(6,57 + j1.17) \Omega}{(6,57 + j1.17) \Omega + 5 \Omega}$$

$$S_f = 0,6$$

El factor de división de corriente ( $S_f$ ) es la relación que expresa la corriente que debe disipar la malla de tierra y la corriente total que disiparán tanto la conexión a tierra de los transformadores, los cables de guarda y la malla de tierra como el resto de las mallas.

Al reemplazar el valor de  $I_{\emptyset T}$ ,  $D_f$ , y  $S_f$  tenemos:

$$I_G = 1,232 * 0,6 * 362,32$$

$$I_G = 267,83 \text{ A}$$

#### g. CÁLCULO MÁXIMO DEL POTENCIAL DE TIERRA (GPR)

$$GPR = I_G * R_g \quad (4.23)$$

$$GPR = 267,83 * 2,06$$

$$GPR = 551,10 \text{ V}$$

**Nota:** Si  $GPR > V_{C70}$  entonces deben calcularse las tensiones de malla y de paso en caso de falla, para determinar si se cumplen las condiciones 1 y 2 mostradas las próximas líneas de este diseño.

Como  $551,10 \text{ V} > 229,98 \text{ V}$  se procede a calcular los voltajes de la malla y el voltaje de piso tolerable para una persona.

### h. CÁLCULO DEL VOLTAJE DE MALLA ( $V_m$ )

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} \quad (4.24)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 * \sqrt{A}}} \quad (4.25)$$

$$n_c = \left(\frac{L_y * L_x}{A}\right)^{\frac{0,7 * A}{L_y * L_x}} \quad (4.26)$$

$$n = n_a * n_b * n_c \quad (4.27)$$

Sustituyendo valores:

$$n_a = \frac{2 * 36}{24}$$

$$n_a = 3$$

$$n_b = \sqrt{\frac{24}{4 * \sqrt{36}}}$$

$$n_b = 1$$

$$n_c = \left(\frac{6 * 6}{36}\right)^{\frac{0,7 * 36}{6 * 6}}$$

$$n_c = 1$$

$$n = 3 * 1 * 1$$

$$n = 3$$

La **Ec. (4. 28)** es utilizada si no existiesen varillas verticales a lo largo del perímetro, caso contrario  $k_{ii} = 1$ . Como en nuestra malla si existen varillas verticales a lo largo del perímetro:

$$k_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{2/n}} \quad (4.28)$$

$$k_{ii} = 1 \quad (4.29)$$

Si siguiendo con los cálculos obteniendo  $h_0$  y  $h$  de la **Tabla 4. 1**:

$$k_h = \sqrt{1 + h/h_0} \quad (4.30)$$

$$k_i = 0,644 + (0,148 * n) \quad (4.31)$$

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \text{Ln} \left( \frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + (2 * h))^2}{8 * D * d} + \frac{h}{4 * d} \right) + \frac{k_{ii}}{k_h} * \text{Ln} \left( \frac{8}{\pi * ((2 * n) - 1)} \right) \right] \quad (4.32)$$

$$V_m = \frac{\hat{p} * I_G * k_m * k_i}{L_c + \left[ \left[ 1,55 + \left( 1,22 * \left( \frac{L_V}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}} \right) \right) \right] * N * L_V \right]} \quad (4.33)$$

Reemplazando los parámetros:

$$k_h = \sqrt{1 + 0,6/1}$$

$$k_h = 1,26$$

$$k_i = 0,644 + (0,148 * 3)$$

$$k_i = 1,09$$

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \text{Ln} \left( \frac{3^2}{16 * 0,6 * 0,00926} + \frac{(3 + (2 * 0,6))^2}{8 * 3 * 0,00926} + \frac{0,6}{4 * 0,00926} \right) + \frac{1}{1,26} * \text{Ln} \left( \frac{8}{\pi * ((2 * 3) - 1)} \right) \right]$$

$$k_m = 0,76$$

$$V_m = \frac{23,88 * 267,83 * 0,76 * 1,09}{36 + \left[ \left[ 1,55 + \left( 1,22 * \left( \frac{1,8}{\sqrt{6^2 + 6^2}} \right) \right) \right] * 4 * 1,8 \right]}$$

$$V_m = 107,20 \text{ V}$$

Condición 1

Si  $V_m > V_{C70}$ , Se debe cambiar la configuración de la malla

Si  $V_m < V_{C70}$ , Se debe pasar a calcular la tensión de paso en caso de falla.

Como  $107,20 < 229,98 \text{ V}$  se procede a calcular el voltaje de paso en caso de falla.

**i. CÁLCULO DEL VOLTAJE DE PASO EN CASO DE FALLA O VOLTAJE DE PISO ( $V_S$ )**

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \left( \frac{1}{D} * (1 - 0,5^{n-2}) \right) \right] \quad (4.34)$$

Con varilla:

$$V_S = \frac{\hat{p} * I_G * k_S * k_i}{L_S} \quad (4.35)$$

$$L_S = 0,75 * L_C + 0,85 * L_R \quad (4.36)$$

Sustituyendo  $L_S$  en  $V_S$ :

$$V_S = \frac{\hat{p} * I_G * k_S * k_i}{0,75 * L_C + 0,85 * L_R} \quad (4.37)$$

Sustituyendo valores:

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * 0,6} + \frac{1}{3 + 0,6} + \left( \frac{1}{3} * (1 - 0,5^{3-2}) \right) \right]$$

$$k_s = 0,41$$

$$V_S = \frac{23,88 * 267,83 * 0,41 * 1,09}{0,75 * 36 + 0,85 * 7,2}$$

$$V_S = 85,45 \text{ V}$$

Condición 2

Si  $V_S > V_{P70}$ , Se debe cambiar la configuración de la malla

Si  $V_S < V_{P70}$ , Se ha culminado el diseño

Como:

$$85,45 \text{ V} < 253,84 \text{ V}$$

El diseño ha terminado

## **4.2 DIMENSIONAMIENTO DE APANTALLAMIENTOS ELÉCTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS BLOQUE DE AULAS C-D**

Diseño del apantallamiento para el edificio bloque de aulas C-D

### **4.2.1 DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE PROTECCIÓN**

Para esto es necesario seguir el siguiente procedimiento:

#### **a. LEVANTAMIENTO DEL PLANO FÍSICO (VER PLANOS DEL ANEXO B Y LAS EDIFICACIONES DEL ANEXO C)**

Análisis de las dimensiones de cada edificación:

- Topografía del lugar (pocos árboles, altura del terreno respecto a nivel del suelo del edificio – ANEXO D)
- Estructura y forma del edificio (estructura metálica, cubierta no metálica, altura y espacio que ocupará el edificio – ANEXO F)
- Mapa isocerámico (zona donde se encuentra el edificio - **Figura 2. 20**)

#### **b. EVALUACIÓN DE PROBABILIDAD DE LA INCIDENCIA DE UNA DESCARGA**

Para esto se analiza el índice de riesgo, de acuerdo al literal **2.3.4**, éste se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$N_{iso} = a + b + c \quad (4. 38)$$

Si  $N_{iso} > 27$ , es necesario la colocación de pararrayos.

Según el ANEXO D y el ANEXO F la estructura del edificio es de hormigón armado con cubierta metálica y su altura Máxima referente al nivel del suelo es de 15,6 m, por lo tanto  $a = 7$ , de acuerdo a la **Tabla 2. 15**.

La zona geográfica donde se encuentra el edificio es en la Parroquia Belisario Quevedo (Entre Latacunga y Ambato), entonces según la **Figura 2. 20** se tiene que  $b = 20$ .

De acuerdo a la **Tabla 2. 16**, como el terreno es llano y su altura respecto a la del edificio es menor, además el lugar está rodeado por árboles y edificios, entonces se tiene  $c = 16$ .

Por lo tanto  $Niso = 7+20+16=43$

Como  $Niso > 27$ , es necesaria la instalación de pararrayos en el edificio, por eso se prosigue con el dimensionamiento de los mismos.

En todo el proyecto el coeficiente  $b = 20$ , será considerado como una constante debido al lugar geográfico donde se ubicarán los apantallamientos, por lo tanto  $Niso$  será casi siempre mayor a 27 y se considera necesario realizar apantallamientos en todo el campus, dando prioridad a los edificios de mayor altura que aumentaran el valor del coeficiente “a” y por ende el valor del índice de riesgo.

#### **4.2.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA EVALUAR LA ZONA DE PROTECCIÓN**

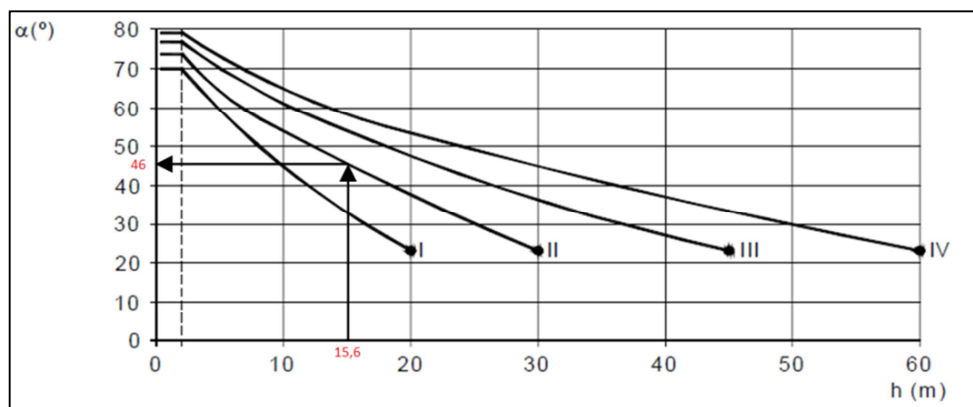
Para evaluar esta zona se ha seleccionado el método del cono de protección, método que establece la zona de protección en función de la altura del edificio y su ángulo de protección, estos dos parámetros se determinan mediante los siguientes literales:

### 4.3 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN REQUERIDO POR EL EDIFICIO

De acuerdo al literal 2.3.6, el edificio que es cuestión de análisis, por ser un edificio formado por una estructura metálica y una cubierta conductora en la parte central, tendrá un nivel de protección clase II.

### 4.4 ÁNGULO DE PROTECCIÓN

Con el nivel de protección (clase II) y la altura del edificio (15,6 m) se selecciona el ángulo de protección en la **Figura 4. 2**, obteniendo aproximadamente  $\alpha = 46^\circ$ , ángulo que servirá como referencia para determinar la zona de protección.



**Figura 4. 2: Nivel Vs. Ángulo de protección**

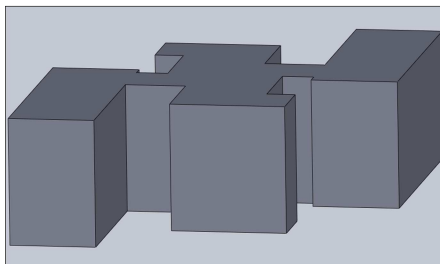
### 4.5 SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL PARARRAYOS

Están dadas por el literal 2.4, el edificio cuestión de análisis por tener una altura menor a 23 m, es de clase I, por lo tanto las dimensiones del pararrayos están dadas por los requisitos de la **Tabla 2.18**.



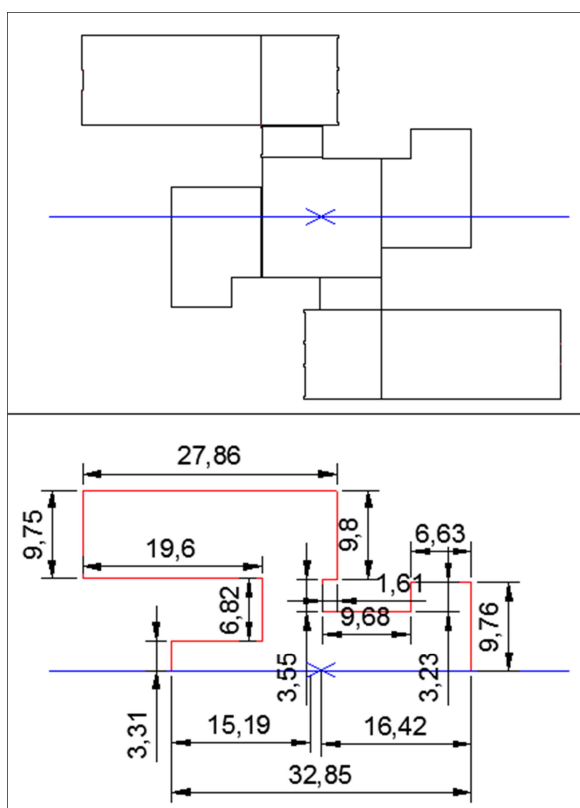
#### 4.6 ZONA A PROTEGER Y SUS MEDIDAS

La zona a proteger constituye todo el espacio geométrico que ocupa la edificación a proteger, En este caso su forma geométrica está dada por la **Figura 4. 3**, donde simplemente se ha bosquejado la forma del edificio.



**Figura 4. 3: Forma geométrica a proteger**

Elaborado por: Wilson Pardo



**Figura 4. 4: Dimensiones del contorno del edificio – Vista superior**

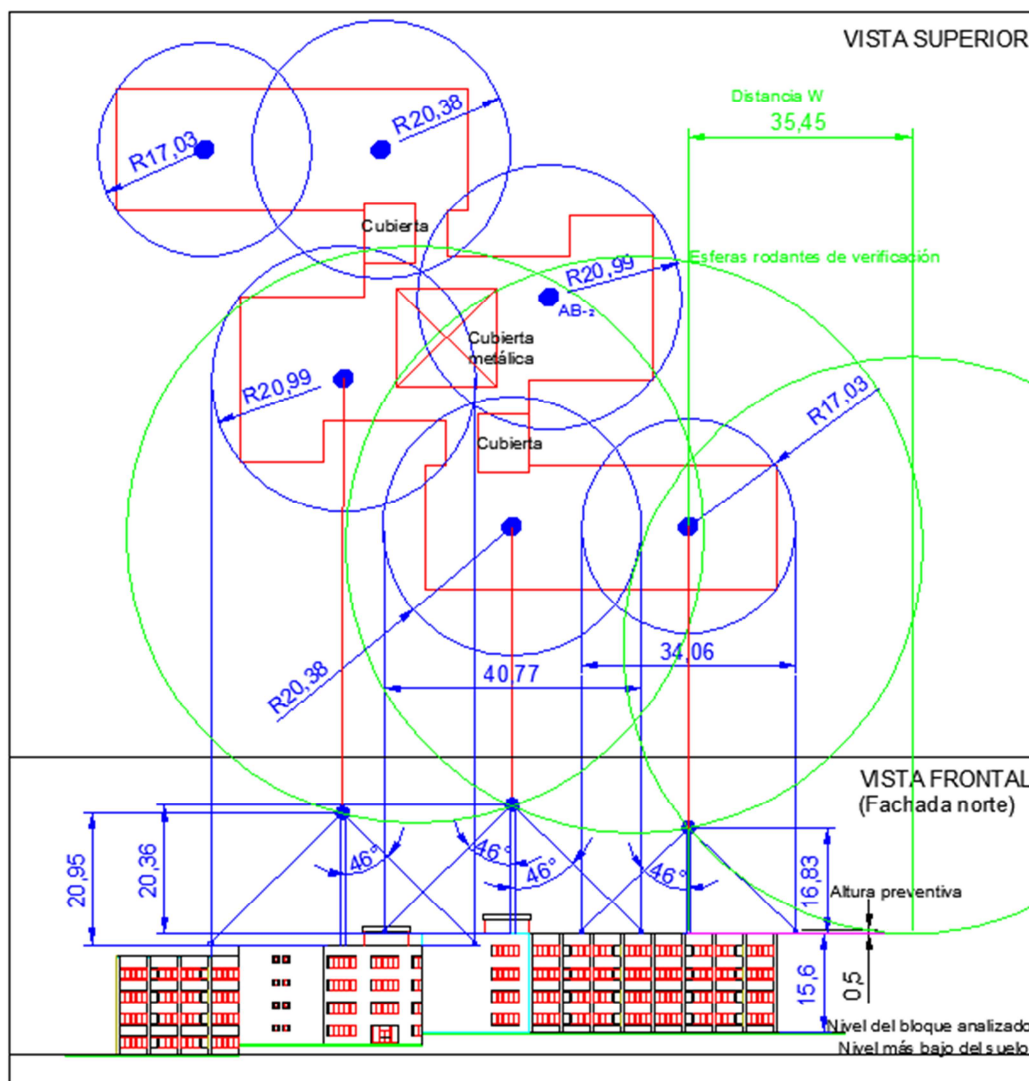
Elaborado por: Wilson Pardo

En la **Figura 4. 4** se puede apreciar la vista superior del edificio, incluyendo las salientes de las columnas y algunas paredes, además de las medidas que por simetría sirven para graficar el perímetro a proteger, excluyendo detalles mínimos en su fachada.

#### **4.7 CÁLCULO DE LAS ALTURAS DEL PARARRAYOS**

Luego de haber calculado el ángulo de protección, teniendo bien claro la zona a proteger, se procede a encontrar la ubicación y la altura del o los pararrayos describiendo a continuación el método empleado mediante la **Figura 4. 5**:

1. Dibujar circunferencias geoméricamente estratégicas que cubran todo el perímetro de la vista superior del edificio
2. Proyectar perpendicularmente los centros de los círculos de la V.S. hasta tocar la superficie de la terraza en la V.F.
3. Proyectar perpendicularmente los puntos de los diámetros horizontales de las circunferencias de la V.S. hasta tocar la superficie de la terraza en la V.F.
4. Proyectar los dos puntos obtenidos en el paso 3 considerando el ángulo de protección hacia el punto obtenido en el paso 2, como se indica en la **Figura 4. 5**, resultando así la altura del pararrayos.



**Figura 4. 5: Altura del edificio a proteger y forma de dimensionar sus apantallamientos**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

Todos los bloques del edificio de aulas poseen una altura de 15,6 m. desde el suelo, pero sus bases están desniveladas, la altura se ha considerado sin incluir las pequeñas cubiertas en las terrazas.

La altura de prevención de 0,5 m fue considerada para evitar que los bordes del edificio estén expuestos. Y se necesitarán 2 pararrayos de altura 20,95m, 2 pararrayos de altura 20,36m y 2 pararrayos de altura 16,83m.

Para verificar el método de cono de protección según se puede apreciar en la **Figura 4. 5**, se utiliza el método de la esfera rodante que poseerá un radio constante de 45,75 m. y una distancia W dada por la ecuación visible en la **Figura 2. 23**. Todos los apantallamientos descritos en el ANEXO F cumplen con la verificación mencionada.

Además del análisis de la **Figura 4. 5**, es necesario considerar proyectar el perímetro de la vista superior hacia las 3 vistas restantes (Posterior, lateral derecha y lateral izquierda), con mayor razón si el edificio presenta una forma muy irregular.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

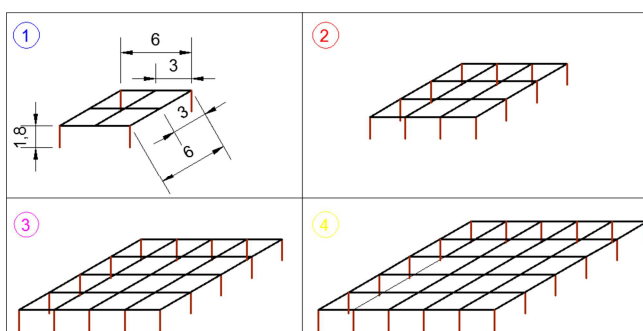
#### 5.1 DIMENSIONES DE LAS MALLAS A TIERRA EMPLEADAS PARA TODO EL PROYECTO

Estos resultados están basados en las mallas TS, TP Y TE propuestas En la **Tabla 3. 6**, con los datos del **capítulo 3**, Para obtener estos resultados se necesita realizar el diseño de todas las mallas a tierra, para lo cual se sigue el procedimiento empleado en el diseño de la malla de protección para el transformador CT-03. En el diseño se empleó 4 configuraciones de mallas dependiendo de la necesidad del sistema.

**Tabla 5. 1: Parámetros de construcción de las configuraciones de malla empleadas en el proyecto**

	D	Ly	Lx	ncy	ncx	Nv	Lv
Malla 1	3	6	6	3	3	4	1,8
Malla 2	3	9	9	4	4	12	1,8
Malla 3	3	12	12	5	5	16	1,8
Malla 4	3	15	15	6	6	20	1,8

Elaborado por: Wilson Pardo



**Figura 5. 1: Descripción por colores de las mallas según la Tabla 5. 1**

Elaborado por: Wilson Pardo

**Tabla 5. 2: Resultados de las mallas propuestas en la Tabla 3. 6, de acuerdo al color y parámetros de la Figura 5. 1**

Transformador	Malla	Conductor calculado calibre (AWG)	Conductor seleccionado calibre (AWG)	Configuración de malla	Resistencia de la malla	
					Recomendada Rm	Obtenida Rg
1	TS-1	2	2	1	5	2,06
	TP-1	2	2	1	5	2,06
	TE-1	2	2	2	3	1,31
2	TS-2	4	2	1	5	2,86
	TP-2	4	2	1	5	2,86
3	TS-3	1/0	1/0	1	5	2,06
	TP-3	1/0	1/0	1	5	2,06
	TE-3a	4	2	2	3	1,31
	TE-3b	10	2	2	3	1,31
4	TS-4	8	2	1	5	4,05
	TP-4	8	2	1	5	4,05
5	TS-5	2	2	1	5	3,03
	TP-5	2	2	1	5	3,03
	TE-5a	2	2	2	3	1,92
	TE-5b	2	2	2	3	1,92
6	TS-6	2/0	2/0	1	5	2,88
	TP-6	2/0	2/0	1	5	2,88
	TE-6 a	4	2	3	3	1,36
	TE-6 b	10	2	3	3	1,36
7	TS-7	4	2	1	5	2,86
	TP-7	4	2	1	5	2,86
	TE-7	10	2	3	3	1,35
8	TS-8	2	2	1	5	4,59
	TP-8	2	2	1	5	4,59
	TE-8	12	2	4	3	1,71
9	TS-9	8	2	1	5	2,38
	TP-9	8	2	1	5	2,38
10	TS-10	6	2	1	5	2,38
	TP-10	6	2	1	5	2,38
11	TS-11	8	2	1	5	2,38
	TP-11	8	2	1	5	2,38
12	TS-12	8	2	1	5	3,7
13a	TS-13a	6	2	1	5	3,29
13b	TS-13b	10	2	1	5	3,29
14	TS-14	8	2	2	5	3,85
	TP-14	8	2	2	5	3,85
Generador	Malla	Conductor calculado calibre (AWG)	Conductor seleccionado calibre (AWG)	Configuración de malla	Resistencia de la malla	
					Recomendada Rm	Obtenida Rg
15	TP-15	4/0	4/0	4	5	1,23

## 5.2 DIMENSIONES, UBICACIONES Y TIPOS DE APANTALLAMIENTO SEGÚN EL DISEÑO

Estos resultados están basados en las puestas a tierra TR propuestas En la **Tabla 3. 6**. Cada apantallamiento posee su respectiva tierra (TR), que representará una o varias varillas de cobre enterradas lo más cerca posible de la ubicación del pararrayos. Cada apantallamiento tendrá dos cables bajantes y cada cable bajante sus respectivas varillas enterradas. Esto se apreciará de mejor forma en los ANEXOS G3 y H.

**Tabla 5. 3: Tierras para los pararrayos según la dependencia a proteger**

Transformador	Malla	Ubicación
1	TR-1	Edificio administrativo
2	TR-2	Auditorio
3	TR-3	Aulas CD (núcleo y edificio C)
		Aulas CD (núcleo y edificio D)
4	TR-4a	Aguas servidas
	TR-4b	Desechos sólidos
5	TR-5.1	Laboratorio (edificio 1)
	TR-5.2	Laboratorio (edificio 2)
	TR-5d	servicios universitarios
6	TR-6	Aulas AB (núcleo y edificio A)
		Aulas AB (núcleo y edificio B)
7	TR-7	Biblioteca
8	TR-8.1	Residencias (edificio 1)
	TR-8.2	Residencias (edificio 2)
9	TR-9a	Cocina comedor
	TR-9c	Sistema integrado de salud
10	TR-10	Metalurgia (Talleres)
11	TR-11	Coliseo gimnasio
Generador	Malla	Ubicación
15	TR-15	Cámara de Grupo motor generador

**Tabla 5. 4: Altura de pararrayos según la dependencia a proteger de acuerdo al ANEXO F**

Ubicación	Altura del edificio (m)	Nivel de Protección (Clase)	Ángulo de protección (°)	h de pararrayos (m)			Nº de mástil
Edificio administrativo	34,48	3	34	26,91			1
Auditorio	13,36	3	56	25,2			2
Aulas CD (núcleo y edificio C)	15,6	2	46	20,95	20,36	16,83	3, 4, 5
Aulas CD (núcleo y edificio D)				20,95	20,36	16,83	6, 7, 8
Aguas servidas	3,9	5	80	5,12			9
Desechos sólidos	7,8	2	58	17,43			10
Laboratorio (edificio 1)	7,8	3	65	8,62	9,82		11, 12
Laboratorio (edificio 2)				8,62	9,82		13, 14
servicios universitarios	4,9	3	70	7,1			15
Aulas AB (núcleo y edificio A)	15,6	2	46	20,95	20,36	16,83	16, 17, 18
Aulas AB (núcleo y edificio B)				20,95	20,36	16,83	19, 20, 21
Biblioteca	13,2	3	58	18,08			22
Residencias (edificio 1)	11,2	3	59	12,01	12,82		23, 24
Residencias (edificio 2)				12,01	12,82		25, 26
Cocina comedor	7,8	3	65	5,93			27
Sistema integrado de salud	8,9	3	62	16,89			28
Metalurgia (Talleres)	7,8	2	58	2 de 14,72	2 de 16,91		29, 30,31,32
Coliseo gimnasio	11,7	2	52	1 de 24,29	3 de 26,68	1 central en techo	33, 34, 35, 36,37
Cámara de Grupo motor generador	3,9	5	80	2,6			38

El pararrayos central sugerido para el coliseo en la **Tabla 5. 4**, no posee más que su propia altura, ya que su única función es la de acortar distancia entre los demás pararrayos. La ubicación de los pararrayos se encuentra detallada en el ANEXO F.



## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROYECTO**

#### **6.1 SIMULACIÓN DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO MEDIANTE EL SOFTWARE ETAP 12.00**

Para el diseño de mallas no se consideraron las impedancias del sistema y de los cables, por lo que se cree conveniente realizar la simulación de las corrientes de cortocircuito del sistema de distribución, partiendo desde el alimentador de 13,8 kv desde la subestación Salcedo.

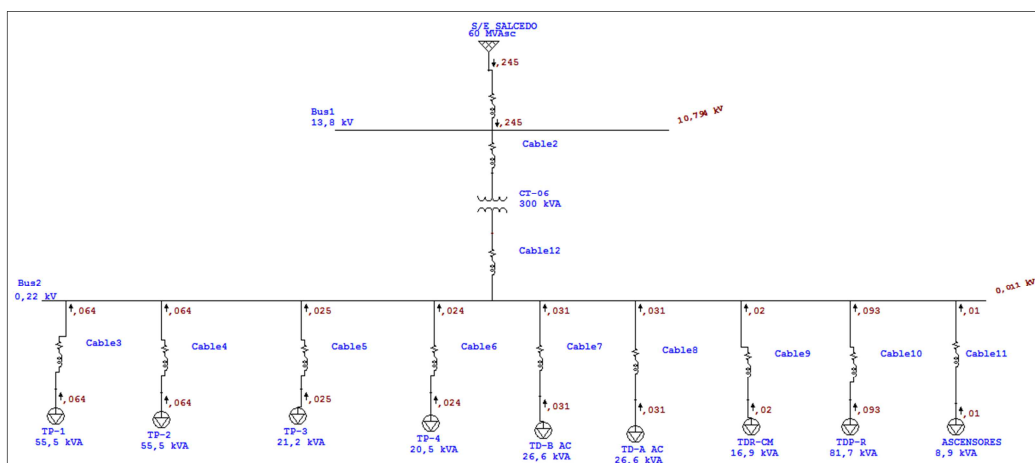
Como datos para la simulación se tiene que la corriente trifásica de cortocircuito de la subestación Salcedo es 2415 A, generando una potencia de cortocircuito aproximada de 60 MVA, la línea de transmisión presenta las siguientes características:

- Distancia aproximada entre la subestación y la acometida del sistema = 6 Km.
- Configuración horizontal
- Distancia de separación entre fases  $d = 30$  cm.
- Altura de los postes de 11m.
- Cable AASCSR para 13,8 KV

En el sistema se asume un efecto motor del 10% para todas las cargas, a excepción de la carga para los talleres abastecidos por el transformador CT-10 que poseen un efecto motor del 50 % y para los laboratorios abastecidos por el transformador CT-05 que poseen un efecto motor del 5 %.

### 6.1.1 ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO PARA EL BLOQUE DE AULAS AB, SIN CONSIDERAR AL RESTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. (TRANSFORMADOR CT -06)

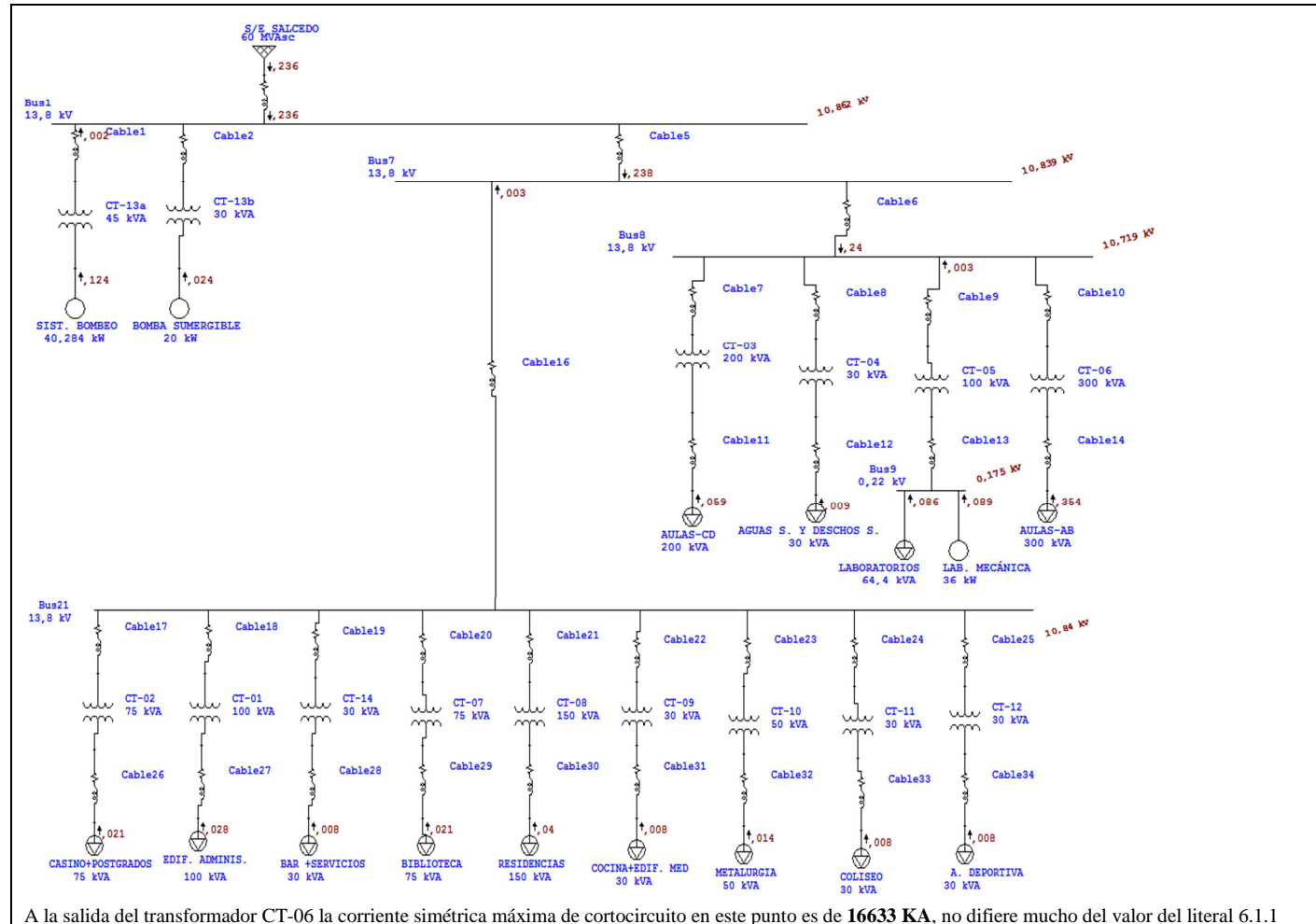
Se seleccionó este el transformador de mayor potencia de la ESPE y se ubicó en el lado de alta del transformador CT-06 donde la corriente simétrica máxima de cortocircuito es de **16,754 KA (En la simulación)**.



**Figura 6. 1: Diagrama del sistema de distribución del transformador CT-06 sin considerar el resto del sistema de distribución**

La corriente simétrica máxima de cortocircuito en este punto sin considerar la impedancia del sistema es de **19682,40 KA (En los cálculos)**. La diferencia entre considerar todo el sistema de distribución o solo el transformador para el que se realizará el diseño de una malla, es una cuestión de diseño que no influye mucho en el resultado de las corrientes de cortocircuito, al igual que la impedancia del sistema, la mayor limitante para las corrientes de cortocircuito está dada por la impedancia porcentual del transformador.

### 6.1.2 ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO PARA EL BLOQUE DE AULAS AB, CONSIDERANDO TODO EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. (TRANSFORMADOR CT -06) - Figura 6. 2

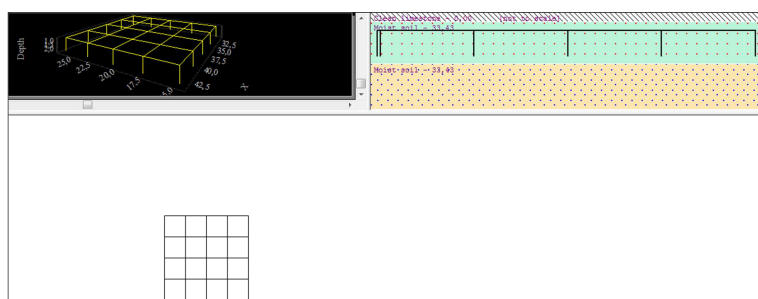


**Figura 6. 2: Diagrama del sistema de distribución de la Universidad De Las Fuerzas Armadas – ESPE Latacunga**

## 6.2 SIMULACIÓN DE SPT MEDIANTE EL SOFTWARE ETAP 12.00

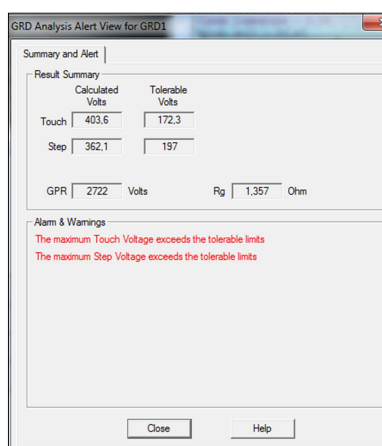
### 6.2.1 VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE LA MALLA TE-6 UPS1 POR EL MÉTODO IEEE (DEFAULT)

Se ingresa los valores de la malla y las características del suelo en el programa.



**Figura 6. 3: Malla TE-6 UPS1 dimensionada en ETAP**

Se procede a calcular los resultados



**Figura 6. 4: Resultados obtenidos mediante simulación por default para la malla TE-6 UPS1**

El voltaje de paso y el de toque exceden los límites de tolerancia, por lo que es recomendable cambiar la configuración de la malla. Ahora se tiene 2 opciones:

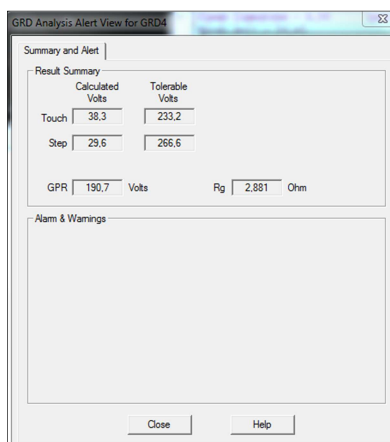
Modificar manualmente la configuración de la malla o elegir las opciones de corrección automática **optimized conductors** u **optimized conductors and rod**.

Según los resultados:

- Al seleccionar el método IEEE por default se asume una corriente máxima de falla predeterminada, que en este caso no tiene nada que ver con el valor del diseño para el que se realizó la simulación.
- Aceptar las correcciones que brinda el programa, en ocasiones no es suficiente para eliminar los errores en los resultados, existen 2 condiciones más que suelen aparecer y deben ser consideradas, son:
  - La profundidad a la que se entierra la malla (**Depth Grid**) debe ser de 0,25 a 2,5 m. sin incluir estos dos valores límites.
  - La separación entre los conductores de la malla (**spacing between parallel conductors**) debe ser de 2,5 a 25 m. sin incluir estos dos valores límites.

### **6.2.2 VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE LA MALLA TE-6 UPS1 POR EL MÉTODO IEEE CON LOS VALORES REALES DEL SISTEMA**

Analizando con el **Grd Study case editor**, se ingresan los datos del sistema dando click en la pestaña **study case** y luego en la pestaña **create new**. Esta opción permite modificar las condiciones del sistema, que normalmente ya vienen dadas, por las condiciones requeridas por el sistema real. Se ingresan los parámetros de la malla TE 6 calculada, los datos de campo y la corriente de cortocircuito en el software y se obtiene como resultado lo siguiente:



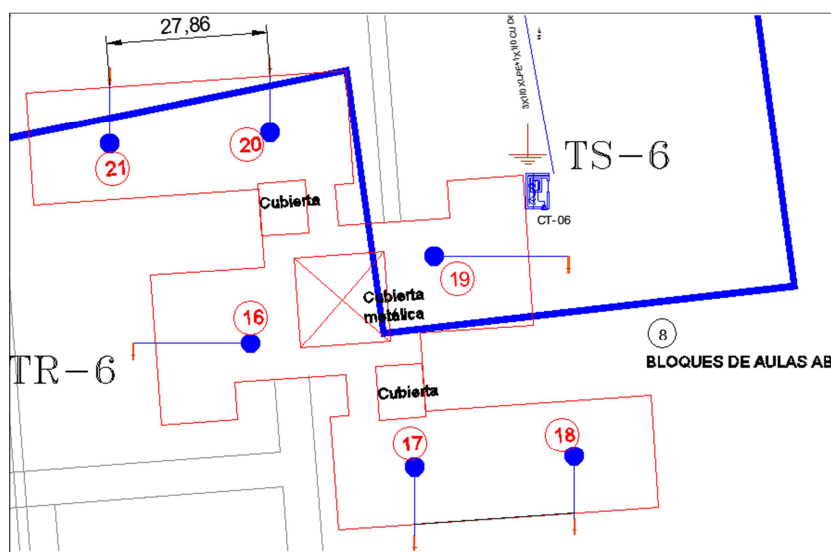
**Figura 6. 5: Resultados obtenidos mediante la opción Grd Study case editor**

Analizando varias configuraciones de malla y diversos tipos de conductores en el programa se obtiene que:

- La norma IEEE en el software ETAP si permite utilizar conductor < a 2/0 AWG para corrientes de falla bajas. Por lo que es factible utilizar el conductor recomendado por la empresa eléctrica Ambato.
- Con las configuraciones de malla 1 o 2 de la **Figura 5. 1**, La resistencia de la malla es mayor a 1,5 que es la resistencia de malla deseada que es una buena resistencia de malla.
- El programa ETAP tiene consideraciones de diseño diferentes a ciertos parámetros del sistema, pero los resultados son muy similares a los obtenidos según el procedimiento del presente proyecto.

### **6.2.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS UNIDOS O SEPARADOS MEDIANTE EL MÉTODO FEM DEL SOFTWARE ETAP**

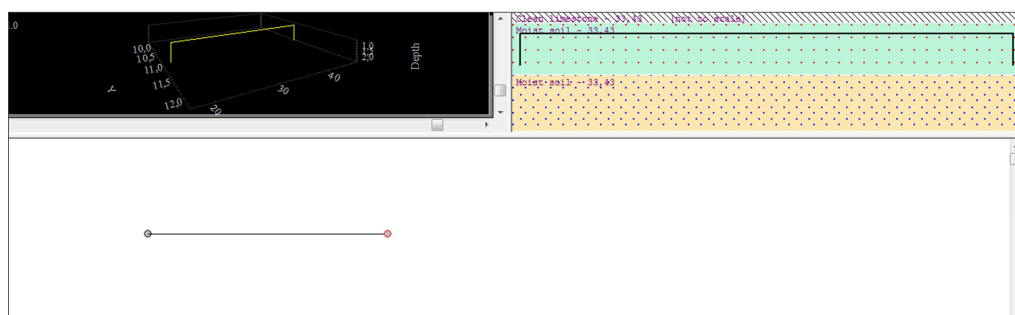
Se analiza 2 varillas a tierra de los pararrayos 20 y 21 ubicadas en el bloque de aulas AB. La simulación es para descarga de un rayo de 18 KA con una resistividad de 33,43 ohm en el suelo.



**Figura 6. 6: SPT de servicio y pararrayos del bloque de aulas AB**

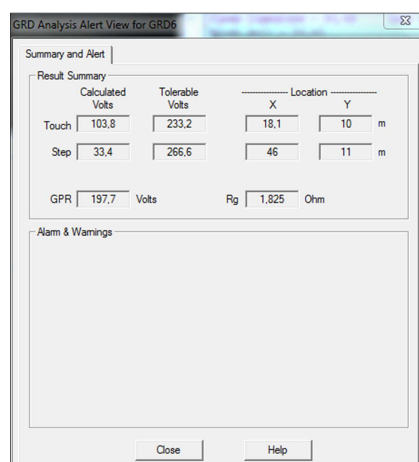
#### **a. DOS VARILLAS DE TIERRA PARARRAYOS CONECTADAS**

Se ingresa en el programa los elementos necesarios para el análisis, en este caso los parámetros del suelo, 2 varillas con una distancia de separación de 27,86 m y un conductor para su conexión.



**Figura 6. 7: Dos varillas de tierra pararrayos conectadas (bloque de aulas AB) dimensionadas en ETAP**

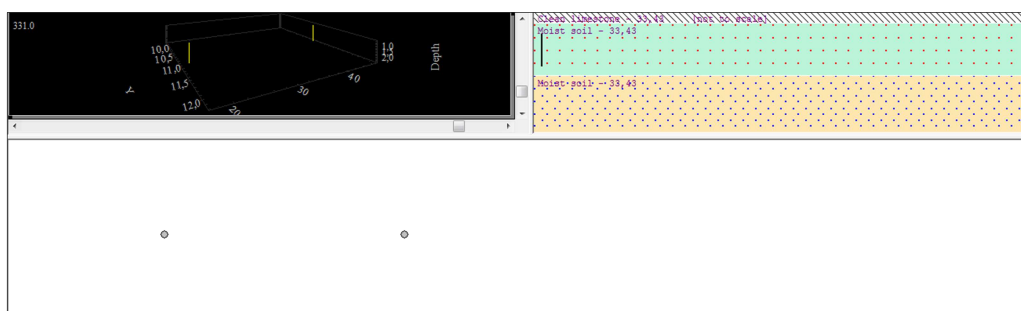
Resultando:



**Figura 6. 8: Resultado obtenido mediante simulación**

## b. DOS VARILLAS PARARRAYOS SIN CONEXIÓN

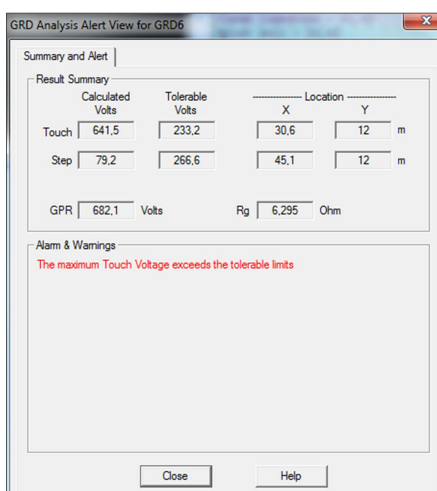
Se elimina el cable que conectaba las varillas en el caso anterior



**Figura 6. 9: Dos varillas de tierra pararrayos separadas (bloque de aulas AB) dimensionadas en ETAP**

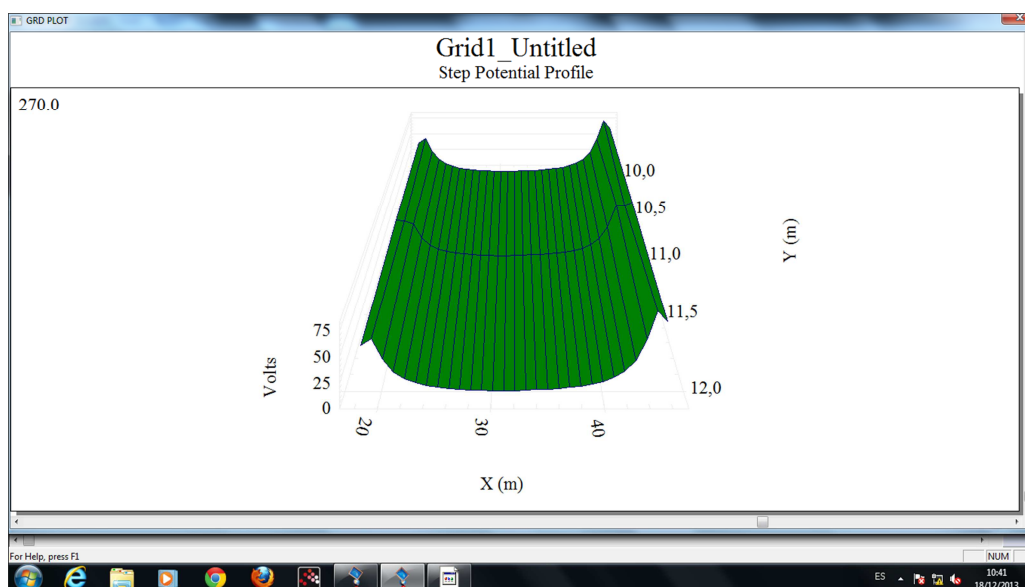
Resultando:



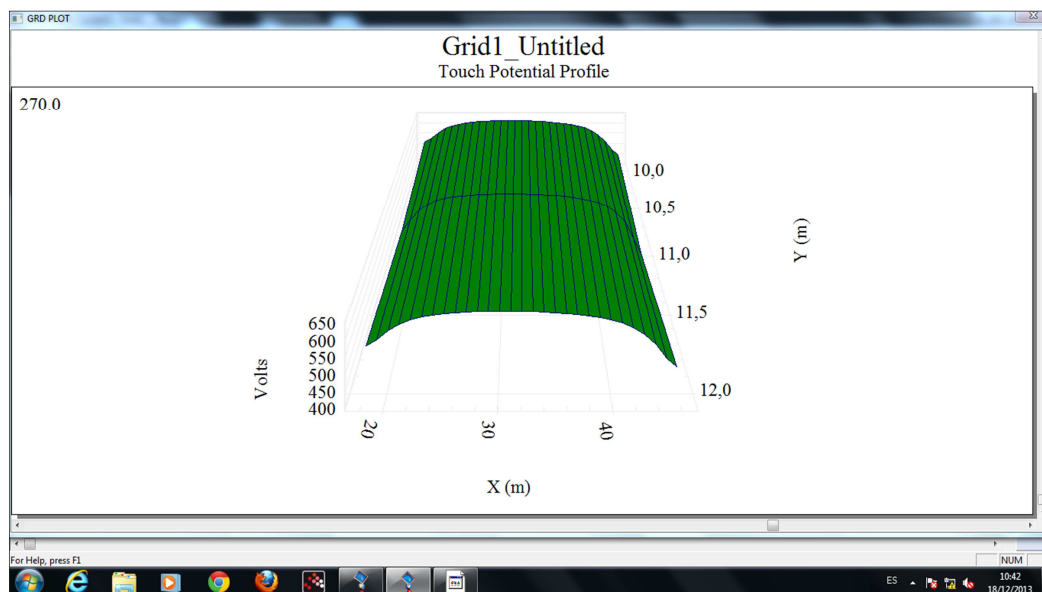


**Figura 6. 10: Resultado de la presente simulación**

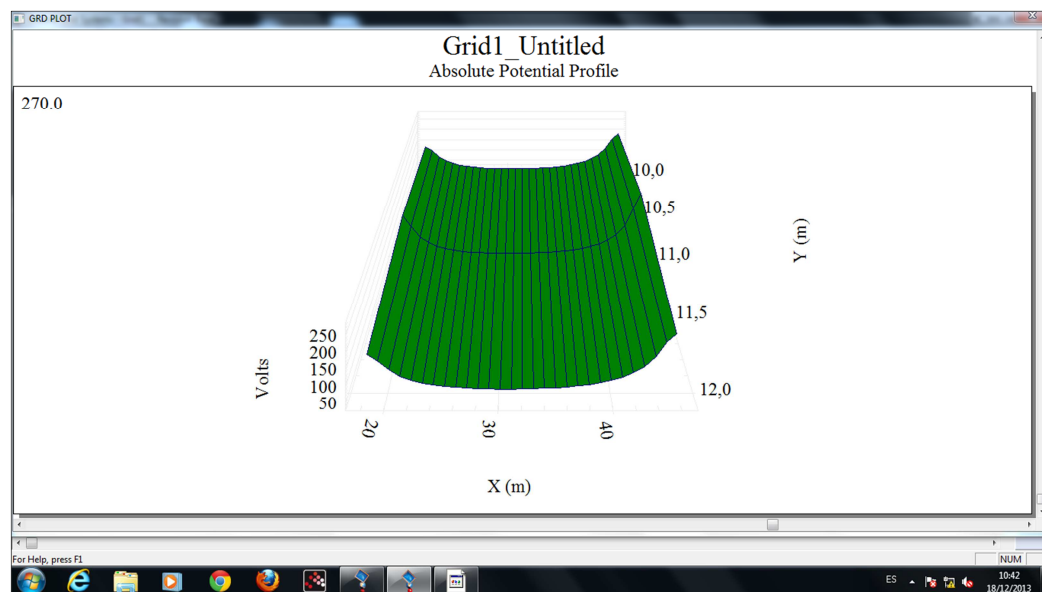
Se tiene errores en cuanto a los voltajes tolerables. El software de simulación en la opción **FEM Method** permite obtener resultados gráficos mediante la herramienta **Plot Selection**, obteniéndose también:



**Figura 6. 11: Voltaje de paso que excede el voltaje tolerable**

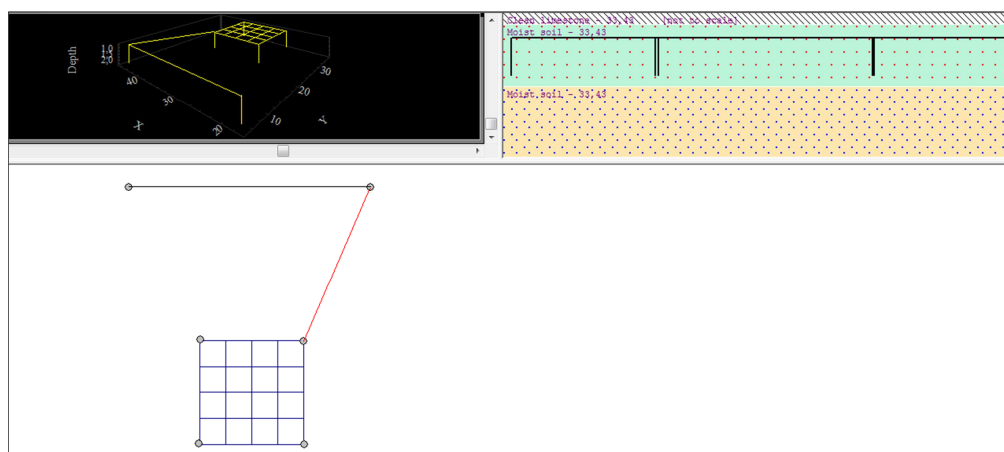


**Figura 6. 12: Voltaje de toque que excede el voltaje tolerable**



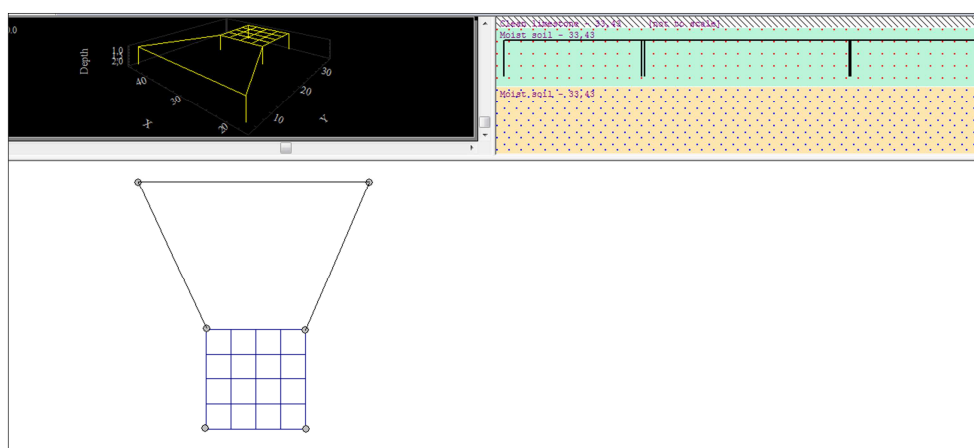
**Figura 6. 13: Voltaje absoluto disipado por la malla**

**c. CONEXIÓN ENTRE MALLAS A TIERRA DE PARARRAYOS Y TE-6 UPS1 SIN CERRAR SU LAZO DE UNIÓN**



**Figura 6. 14: Malla a tierra de pararrayos y TE-6 UPS1 sin cerrar su lazo de unión (Resultado correcto)**

**d. INTERCONEXIÓN ENTRE MALLAS A TIERRA DE PARARRAYOS Y TE-6 UPS1**



**Figura 6. 15: Malla a tierra de pararrayos y TE-6 UPS1 que forman un lazo cerrado (Resultado correcto)**

Según los resultados de los literales a, b, c y d se tiene que:

- Al interconectar las varillas pararrayos mediante un cable se cumple con el diseño, no así al no estar conectadas mediante un cable.
- Un anillo de tierra ayuda considerablemente a mejorar la resistencia de la malla, disipando de mejor forma la corriente.
- Los voltajes de paso y de toque no ocasionan tanta dificultad en el diseño cuando se tiene una sola varilla, pero para una malla existen varios inconvenientes debido al área que esta ocupa para disipar las corrientes de falla.

### 6.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE MEJORAN NOTABLEMENTE EL DISEÑO DE UNA MALLA

En caso de no conseguir la resistencia de malla deseada se pueden modificar las variables como se indica en la **Tabla 6. 1**, donde se ha duplicado o se ha dividido para dos estas variables, para así poder apreciar cómo se puede disminuir la resistencia de la malla

**Tabla 6. 1: Variables y operaciones en ellas, para mejorar la resistencia calculada de la malla.**

Nº	VARIABLES para mejorar la resistencia de la malla	Símbolo	Operación	Resistencia de la malla sin alterar las variables ( $\Omega$ )	Resistencia de la malla alterando una variable ( $\Omega$ )	Disminución de la resistencia de la malla ( $\Omega$ )
1	Resistividad del suelo	$\rho$	$\rho/2$	1,85	0,91	0,94
2	Área que ocupará la malla	A	A *2	1,85	1,34	0,51
3	Profundidad a la que se enterrará la malla	h	h *2	1,85	1,69	0,16
4	Número de varillas verticales	$N_V$	N *2	1,85	1,75	0,1
5	Longitud de una sola varilla vertical	$L_V$	$L_V*2$	1,85	1,75	0,1

Elaborado por: Wilson Pardo

Para poder modificar las variables mencionadas se debe considerar el trabajo y los costos que esto implica, por ejemplo la resistividad del suelo es una constante de diseño, pero se la puede convertir en una variable, debido a que en la actualidad existen procesos químicos para mejorar dicha resistividad. Estos procesos tienen un costo, y pueden ser o no convenientes si se analiza su aplicación en grandes áreas. Se pueden variar otros parámetros en la malla, como el número de conductores horizontales y el espaciamiento entre sí, concordando siempre con el área de la malla.

#### **6.4 ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE UNA CAPA SUPERFICIAL**

Si no se llegase a cumplir con las condiciones de diseño, incluso al cambiar la configuración de la malla, lo más factible sería implementar una capa superficial, siendo las mejores opciones:

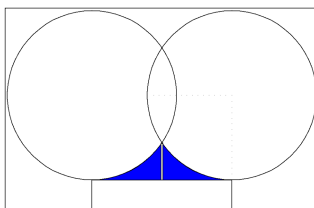
- $\rho_s > \rho$
- $h_s$  debe ser lo más grande posible

Las dos condiciones anteriores se determinaron al variar los parámetros  $\rho_s$  y  $h_s$ , efectuando el diseño con una capa superficial, notando que la diferencia entre  $V_m$  y  $V_c$  aumenta, al igual que en  $V_s$  y  $V_p$ , favoreciendo a cumplir las condiciones 1 y 2.

Una capa superficial a más de ser una condición que ayuda a mejorar las condiciones de diseño en caso de que estas no se cumplan, sirve para aumentar la seguridad de las personas que pudiesen circular sobre las mallas a tierra.

#### **6.5 ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE PARARRAYOS SEGÚN EL MÉTODO DE LAS ESFERAS RODANTES**

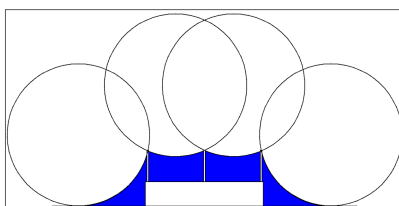
En las siguientes gráficas se presenta el área protegida por una esfera rodante:



**Figura 6. 16: Zona de protección para un edificio**

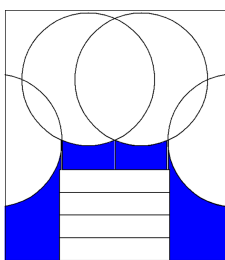
**Elaborado por: Wilson Pardo**

Si se desea proteger zonas a los costados del edificio, es necesario colocar apantallamientos cercanos a los bordes de su terraza, el diseño solo se ha realizado para proteger específicamente al edificio.



**Figura 6. 17: Zona de protección para un edificio que por su gran longitud necesita de varios pararrayos, o de un pararrayos de gran altura.**

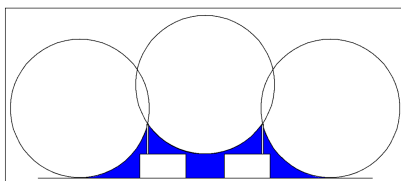
**Elaborado por: Wilson Pardo**



**Figura 6. 18: Zona de protección para un edificio que por su gran altura necesita varios pararrayos o un pararrayos de mayor altura.**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

En conjunto los edificios con apantallamientos, pueden proteger zonas aledañas a dichas edificaciones



**Figura 6. 19: Varios pararrayos para proteger varios edificios y sus zonas aledañas**

**Elaborado por: Wilson Pardo**

El método de las esferas rodantes de radio establecido es ideal para jaulas Faraday con conductores desnudos, pero para ubicación de puntas se requiere de un mayor análisis.

## 6.6 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APU) PARA LA OBTENCIÓN DE COSTOS

### 6.6.1 SPT A IMPLEMENTAR Y LA EVALUACIÓN DE SU COSTO

En el ANEXO G se observa los parámetros del diseño para cada malla, así como los cálculos para definir las siguientes tablas:

**Tabla 6. 2: Análisis de las mallas a implementar**

Costo total del proyecto transformadores				
1. MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
Cable de cobre desnudo semiduro #2 AWG 7 hilos	m	1800	5,37	9666
Cable de cobre desnudo semiduro #1/0 AWG 7	m	72	8,7	626,4
Cable de cobre desnudo semiduro #2/0 AWG 7	m	72	10,9	784,8
Varilla copperweld de 1.8metros de longitud	c/u	252	7,48	1884,96
Caja de revisión (0.35 x 0.35 x 1)	m <sup>3</sup>	36	40	1440
Zanja para la malla	m <sup>3</sup>	1274,4	12,2	15547,68
Conector a varilla 5/8 X 6	c/u	36	1,01	36,36
Barra equipotencial de cobre 1/8 X 3/4	m	18	17,21	309,78
Aislador de barra 25 mm	c/u	72	1,08	77,76
Punto de suelda exotérmica capsula 90	c/u	448	5,97	2674,56
<b>SUBTOTAL 1</b>				<b>33048,3</b>
2. MANO DE OBRA	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
	h.hombre	1760	2,52	4435,2
	h.hombre	1760	1,89	3326,4
	h.hombre	1760	1,26	2217,6
<b>SUBTOTAL 2</b>				<b>9979,2</b>
3. EQUIPO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
	h.hombre	1	50,43	50,43
<b>SUBTOTAL 3</b>				<b>50,43</b>
<b>4. COSTO UNITARIO DIRECTO (1+2+3)</b>				<b>43077,93</b>
<b>5. COSTO UNITARIO INDIRECTO (20% de 4)</b>				<b>8615,586</b>
<b>6. PRECIO UNITARIO CALCULADO (4+5)</b>				<b>51693,516</b>
<b>7. PRECIO UNITARIO OFERTADO</b>				<b>51693,516</b>

**Tabla 6. 3: Análisis de la malla a implementar para el generador de emergencia**

Costo total del proyecto generador				
1. MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
Cable de cobre desnudo semiduro #4/0 AWG	m	180	17,57	3162,6
Varilla copperweld de 1.8metros de longitud	c/u	20	7,48	149,6
Caja de revisión (0.35 x 0.35 x 1)	m <sup>3</sup>	1	40	40
Zanja para la malla	m <sup>3</sup>	135	12,2	1647
Conector a varilla 5/8 X 6	c/u	1	1,01	1,01
Barra equipotencial de cobre 1/8 X 3/4	m	0,5	17,21	8,605
Aislador de barra 25 mm	c/u	2	1,08	2,16
Punto de suelda exotérmica capsula 90	c/u	36	5,97	214,92
<b>SUBTOTAL 1</b>				5225,895
2. MANO DE OBRA	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
	h.hombre	100	2,52	252
	h.hombre	100	1,89	189
	h.hombre	100	1,26	126
<b>SUBTOTAL 2</b>				567
3. EQUIPO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
	h.hombre	1	50,43	50,43
<b>SUBTOTAL 3</b>				50,43
<b>4. COSTO UNITARIO DIRECTO (1+2+3)</b>				5843,325
<b>5. COSTO UNITARIO INDIRECTO (20% de 4)</b>				1168,665
<b>6. PRECIO UNITARIO CALCULADO (4+5)</b>				7011,99
<b>7. PRECIO UNITARIO OFERTADO</b>				7011,99

**Tabla 6. 4: Costo de la implementación de todos los sistemas de mallas a tierra**

TOTAL	Transformadores	51693,516
	Generador	7011,99
<b>Costo total del proyecto mallas en dólares</b>		<b>58705,506</b>

### 6.6.2 SISTEMAS DE APANTALLAMIENTOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS A IMPLEMENTAR Y LA EVALUACIÓN DE SU COSTO

En el ANEXO G también se tiene los parámetros del diseño para cada apantallamiento, así como los cálculos para definir las siguientes tablas:

**Tabla 6. 5: Análisis de los apantallamientos y sus SPT a implementar para diferentes edificaciones.**

Costo total del proyecto apantallamientos contra descargas atmosféricas				
<b>1. TORRES Y MÁSTILES</b>			<b>SUBTOTAL 1</b>	6159
2. MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
Cable de cobre desnudo semiduro #2 AWG 7 hilos	m	4500	6,84	30780
Abrazadera para fijar el conductor bajante	c/u	456	1,5	684
Pararrayos de 18 KV	c/u	39	63,84	2489,76
Accesorios para torretas		34	50	1700
Accesorios para mástil		4	25	100
Varilla copperweld de 1.8metros de longitud	c/u	150	7,48	1122
<b>SUBTOTAL 2</b>				36875,76
3. MANO DE OBRA	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
	h.hombre	1520	2,52	3830,4
	h.hombre	1520	1,89	2872,8
	h.hombre	1520	1,26	1915,2
<b>SUBTOTAL 3</b>				8618,4
4. EQUIPO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (DÓLARES)	COSTO TOTAL (DÓLARES)
	h.hombre	1	68,78	68,78
<b>SUBTOTAL 4</b>				68,78
<b>5. COSTO UNITARIO DIRECTO (subtotales 1+2+3+4)</b>				51721,94
<b>6. COSTO UNITARIO INDIRECTO (20% de 5)</b>				10344,388
<b>7. PRECIO UNITARIO CALCULADO (5+6)</b>				62066,328
<b>8. PRECIO UNITARIO OFERTADO</b>				62066,328



### 6.6.3 COSTO DEL PROYECTO

Los materiales fueron presupuestados en todas las tablas de costos el 12 de septiembre del 2013.

**Tabla 6. 6: Costo total final**

<b>Costo total mallas (Tabla 6. 4)</b>	<b>58705,506</b>
<b>Costo total apantallamientos (Tabla 6. 5)</b>	<b>62066,328</b>
<b>TOTAL (DÓLARES)</b>	<b>120771,83</b>

### 6.6.4 FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ESTUDIO

Es casi inevitable la ampliación de la infraestructura, de lo que hoy se conoce como Campus politécnico Gral. Rodríguez Lara, con ello también crecerá la cantidad de personas, equipos costosos, y la necesidad de cuidar por su bienestar, así que la implementación del presente proyecto, se podría decir que más que necesidad, es una obligación.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

- Se Realizó el levantamiento de planos eléctricos, topográficos y arquitectónicos para la obtención de datos necesarios para el diseño de los sistemas puestos a tierra y apantallamientos, datos relevantes, como que el suelo del campus presenta una resistividad promedio baja de  $38,52 \Omega$ , y su composición puede ser considerada como uniforme, a excepción de algunos sectores donde se ha realizado relleno de terrenos, modificando así las características del suelo.
- De acuerdo al sistema de distribución y el tipo de carga se determinó que el campus necesita implementar cuatro tipos de puestas a tierra: De servicio, de protección, para rayos y para equipos sensibles. Se diseñó mallas a tierra para ser utilizadas como sistemas de puesta a tierra para proporcionar un medio de descarga para sobrevoltajes ocasionados por fallas eléctricas.
- Se redujo el riesgo de destrucción que pudiese ocasionar una descarga atmosférica mediante el diseño de varios apantallamientos eléctricos ubicados estratégicamente según la forma de los edificios, considerando especialmente a los de mayor tamaño.
- Se determinó que los conductores seleccionados para los SPT en el presente diseño están correctamente dimensionados, a pesar de no haber considerado la impedancia de la red mediante la simulación de flujos del sistema de distribución, ya que se tiene una diferencia baja entre las corrientes de cortocircuito calculadas en el diseño y las calculadas mediante el software ETAP (Metodología ANSI).
- Se creó un plano eléctrico referencial mediante el diseño de SPT y apantallamientos eléctricos para la Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE

Extensión Latacunga, plano que debe ser implementado considerando el costo obtenido en el estudio técnico - económico realizado en el presente proyecto.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Para sistemas de distribución de baja potencia es correcto utilizar calibres menores al calibre 2/0 AWG recomendado como mínimo por la IEEE, ya que el procedimiento de diseño que posee dicha normativa esta específicamente referido a subestaciones donde se trabaja con valores de potencia extremadamente altos.
- Aislar el neutro o realizar conexiones de cableado IG, a pesar de no cumplir con las normas IEEE, son buenas opciones para sistemas dedicados de comunicación y computadoras, pero se debe considerar que estos métodos poseen restricciones o se podrían deteriorar y hasta destruir los equipos ante una falla eléctrica. Jamás se debe confundir el cableado IG con una puesta a tierra independiente.
- Al tener el terreno una excelente resistencia, se deben considerar otros aspectos en el diseño, como la corrosión y el voltaje de paso y de toque en el suelo mojado.
- La distancia de separación entre pararrayos y varillas debe ser lo menor posible para acortar o dividir la trayectoria de la corriente a tierra en menor tiempo.
- Los pararrayos de la edificación deben estar conectados entre sí al igual que las varillas y las mallas a tierra. Estos dos últimos elementos deben estar unidos para formar una resistencia equivalente más baja que la que tienen por separado. Pero se debe evitar crear lazos cerrados al realizar esta conexión, ya que una corriente sumamente alta como la de un rayo podría destruir los sistemas de puestas a tierra que funcionarían como un circuito de consumo de corriente.
- Se debe conectar a tierra todas las estructuras metálicas incluida la de las edificaciones para contribuir con la resistencia equivalente del sistema, con la formación de un plano equipotencial y con la interferencia que suelen ocasionar por el alojamiento de cargas electrostáticas.

- El cable bajante pararrayos, debe tener aislamiento, para evitar fugas de corriente ante una descarga atmosférica.
- Diferenciar las tomas de tierra de las mallas comunes de las tomas de tierra en mallas especiales.
- Inspeccionar las condiciones y funcionalidad de los SPT cada cierto período de tiempo (15 años como mínimo – tiempo de vida útil de una varilla y recomendado considerando una corrosión media).
- Las mallas construidas de ser posible deberán interconectarse conforme avanza el proceso de construcción del sistema eléctrico en el campus.
- Para referencia de señales digitales en circuitos que trabajan con frecuencias de hasta 300 khz puede utilizarse conexión a tierra de un solo punto y para frecuencias mayores deben utilizarse conexiones multipunto porque se requiere que la carga esté distribuida de manera uniforme.
- Para frecuencias altas una malla a tierra presentará también una resistencia elevada, disminuyendo su desempeño, por lo que se recomienda ciertos métodos como apantallamientos en el cableado, filtros supresores y blindajes. Además de un sistema de protección interno contra descargas atmosféricas.
- La recomendación más importante es: “No se debe asumir que los problemas de las instalaciones eléctricas, radican siempre en la puesta a tierra, el 90 % de los problemas está en los cableados” – Favio Casas Ospina. Una excelente referencia para un buen cableado que en conjunto con un SPT optimizaría un sistema eléctrico es el libro Esmeralda de la IEEE 80.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ptolomeo.unam.mx*. (29 de Abril de 2006). Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/801/A6.pdf?sequence=6>
- Universidad Politécnica Salesiana*. (2009). Recuperado el 2 de Marzo de 2013, de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/4/CAPITULO%20III.pdf>
- AEMC. (2001). Recuperado el 15 de julio de 2012, de <http://www.aemc.com/products/Spanish%20PDFs/2130.46-SP.pdf>
- Agulleiro, I., y Martínez, M. (2012). Recuperado el 15 de julio de 2012, de <http://www.lu3hba.com.ar/ARTICULOS%2010/Medicion%20de%20Sistema%20de%20Puesta%20a%20Tierra.pdf>
- Aponte, G. (2011). Recuperado el 15 de julio de 2012, de [http://www.geiico.com.co/geiico/Publica/Upload/Publico/7\\_parte\\_5\\_p\\_a\\_tierra.pdf](http://www.geiico.com.co/geiico/Publica/Upload/Publico/7_parte_5_p_a_tierra.pdf)
- CADAFE. (2006). Recuperado el 15 de julio de 2012, de <http://saber.ucv.ve/jspui/bitstream/123456789/751/16/ANEXO%2015.pdf>
- Comité ejecutivo del código ecuatoriano de la construcción. (2009). Recuperado el 15 de julio de 2012, de <http://www.cicp-ec.com/pdf/4.%20INST.ELECTROMECC%3%81NICAS-1.pdf>
- Comité electrotécnico cubano. (2010). Recuperado el 2012 de julio de 2012, de [http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornadaVII/1\\_2.pdf](http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornadaVII/1_2.pdf)
- Díaz, P. (2001). *Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución*. México, D.F., México: McGraw-Hill Interamericana.
- E.V. INGENIERÍA ELÉCTRICA. (2010). *INSTALACIONES ELÉCTRICAS ESPE*. Proyecto presentado a ELEPCO para aprobación, EV Ingeniería eléctrica.
- Electrotecnia – Industria. (2003). Recuperado el 16 de julio de 2012, de <http://www.sapiensman.com/sobretensiones/>
- Empresa Eléctrica Quito. (2009). *Normas para sistemas de distribución – Parte A – Guía para Diseño*. Quito, Ecuador.
- Enríquez Harper, G. (2004). *Manual práctico de instalaciones eléctricas*. Limusa, México: Limusa, S.A. de C.V.
- Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. (1 de Noviembre de 2009). *INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA*. Recuperado el 5 de Enero de 2013, de [http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/iiee/Documentos/Teorico/Puesta\\_tierra.pdf](http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/iiee/Documentos/Teorico/Puesta_tierra.pdf)
- González, C. (2010). Recuperado el 3 de septiembre de 2012, de <http://www.oocities.org/stselectricos/clase3.pdf>
- Huete Serrano, M. E. (2008). *Sistema de puesta a tierra y protección para sistemas de telecomunicaciones*. Guatemala, Guatemala.
- Martínez Velasco, J. A. (2008). *Coordinación de aislamientos en redes eléctricas de alta tensión*. Barcelona, España: McGraw-Hill Interamericana – Universitat Politècnica de Catalunya.
- Moreno, G., Valencia, J., Cárdenas, C., & Villa Walter. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra*. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquía.
- Portaleléctricos. (2006). Recuperado el 15 de julio de 2013, de <http://www.portalelectricos.com/retie/cap1definicioness.php>

- Procobre. (2007). Recuperado el 15 de julio de 2012, de [http://www.procobre.org/archivos/pdf/download\\_biblioteca/MANUALES/Mallas\\_de\\_Tierra.pdf](http://www.procobre.org/archivos/pdf/download_biblioteca/MANUALES/Mallas_de_Tierra.pdf)
- Reyna, A. (2012). Recuperado el 15 de julio de 2013, de [http://www.dehnargentina.com.ar/seccionesDeInteres/pdf/PUBLICACIONES-FUNCION\\_CONTINUA.pdf](http://www.dehnargentina.com.ar/seccionesDeInteres/pdf/PUBLICACIONES-FUNCION_CONTINUA.pdf)
- RUELSA. (2007). Recuperado el 22 de enero de 2013, de <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe80.html>
- Samaniego Ordóñez, V. S. (2008). *Construcción de un prototipo didáctico para medir la resistividad del terreno*. Quito, Ecuador.
- Santafeciedad. (2012). Recuperado el 15 de febrero de 2013, de [http://santafeciedad.gov.ar/media/files/digesto/digesto\\_tomo\\_1\\_515.pdf](http://santafeciedad.gov.ar/media/files/digesto/digesto_tomo_1_515.pdf)
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2000). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, United states of America.
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2005). *IEEE Emerald book*. New York, United Sates of America.
- UTE Servicios al cliente. (2010). Recuperado el 17 de julio de 2013, de [http://www.ute.com.uy/servicios\\_cliente/docs/C-23.pdf](http://www.ute.com.uy/servicios_cliente/docs/C-23.pdf)
- Wikipedia. (2003). Recuperado el 27 de Agosto de 2012, de [http://es.wikipedia.org/wiki/Conexi%C3%B3n\\_equipotencial](http://es.wikipedia.org/wiki/Conexi%C3%B3n_equipotencial)
- Zapata Jiménez, B. P. (2012). *Rediseño y optimización de los sistemas de puesta a tierra y apantallamientos de la Escuela Politécnica Del Ejército campus Sangolquí*. Latacunga, Ecuador.

## NETGRAFÍA

- Universidad Politécnica Salesiana. (2009). Citado el 2 de Marzo de 2013, de  
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/4/CAPITULO%20III.pdf>
- AEMC. (2001). Citado el 15 de julio de 2012, de  
<http://www.aemc.com/products/Spanish%20PDFs/2130.46-SP.pdf>
- Agulleiro, I., y Martínez, M. (2012). Citado el 15 de julio de 2012, de  
<http://www.lu3hba.com.ar/ARTICULOS%2010/Medicion%20de%20Sistema%20de%20Puesta%20a%20Tierra.pdf>
- Aponte, G. (2011). Citado el 15 de julio de 2012, de  
[http://www.geiico.com.co/geiico/Publica/Upload/Publico/7\\_parte\\_5\\_p\\_a\\_tier ra.pdf](http://www.geiico.com.co/geiico/Publica/Upload/Publico/7_parte_5_p_a_tier ra.pdf)
- CADAFE. (2006). Citado el 15 de julio de 2012, de  
<http://saber.ucv.ve/jspui/bitstream/123456789/751/16/ANEXO%2015.pdf>
- Comité ejecutivo del código ecuatoriano de la construcción. (2009). Citado el 15 de julio de 2012, de  
<http://www.cicpec.com/pdf/4.%20INST.ELECTROMECC3%81NICAS-1.pdf>
- Comité electrotécnico cubano. (2010). Citado el 2012 de julio de 2012, de  
[http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornadaVII/1\\_2.pdf](http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornadaVII/1_2.pdf)
- Electrotecnia – Industria. (2003). Citado el 16 de julio de 2012, de  
<http://www.sapiensman.com/sobretensiones/>
- González, C. (2010). Citado el 3 de septiembre de 2012, de  
<http://www.oocities.org/stselectricos/clase3.pdf>
- Portaleléctricos. (2006). Citado el 15 de julio de 2013, de  
<http://www.portalelectricos.com/retie/cap1definicioness.php>
- Procobre. (2007). Citado el 15 de julio de 2012, de  
[http://www.procobre.org/archivos/pdf/download\\_biblioteca/MANUALES/Mallas\\_de\\_Tierra.pdf](http://www.procobre.org/archivos/pdf/download_biblioteca/MANUALES/Mallas_de_Tierra.pdf)

- Reyna, A. (2012). Citado el 15 de julio de 2013, de  
[http://www.dehnargentina.com.ar/seccionesDeInteres/pdf/PUBLICACIONES-FUNCION\\_CONTINUA.pdf](http://www.dehnargentina.com.ar/seccionesDeInteres/pdf/PUBLICACIONES-FUNCION_CONTINUA.pdf)
- RUELSA. (2007). Citado el 22 de enero de 2013, de  
<http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe80.html>
- Santafeciedad. (2012). Citado el 15 de febrero de 2013, de  
[http://santafeciedad.gov.ar/media/files/digesto/digesto\\_tomo\\_1\\_515.pdf](http://santafeciedad.gov.ar/media/files/digesto/digesto_tomo_1_515.pdf)
- UTE Servicios al cliente. (2010). Citado el 17 de julio de 2013, de  
[http://www.ute.com.uy/servicios\\_cliente/docs/C-23.pdf](http://www.ute.com.uy/servicios_cliente/docs/C-23.pdf)
- Wikipedia. (2003). Citado el 27 de Agosto de 2012, de  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Conexi%C3%B3n\\_equipotencial](http://es.wikipedia.org/wiki/Conexi%C3%B3n_equipotencial)



# ANEXOS