

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS.**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS DE
PUESTAS A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA UNA - PUNO.**

TESIS

PRESENTADA POR:

ROY WILLIAMS QUISPE MACHACA

YASMANI RIGOBERTO GUTIERREZ AQUINO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA UNA - PUNO.

TESIS PRESENTADA POR:

ROY WILLIAMS QUISPE MACHACA

YASMANI RIGOBERTO GUTIERREZ AQUINO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Fecha de Sustentación: 31-10-2018

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:



PRESIDENTE

: 

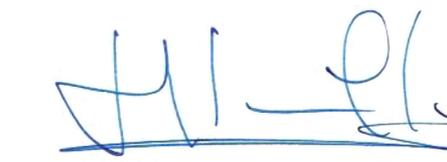
M.Sc. ANGEL MARIO HURTADO CHAVEZ

PRIMER MIEMBRO

: 

M.Sc. MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO

SEGUNDO MIEMBRO

: 

M.Sc. HENRY SHUTA LLOCLLA

DIRECTOR / ASESOR

: 

Mg. GREGORIO MEZA MAROCHO

Área : Eléctrica

Tema : Puestas a Tierra.

DEDICATORIA

A mi querida hija Yadira Kalessy Gutierrez Calla, por ser mi motor y motivo para ser mejor cada día. A mí amada compañera de vida Guissela Yanina Calla Aquino por ofrecerme el amor, la comprensión y el respeto incondicional día a día.

A mi querida madre Fabiana Aquino Cari, por darme el cariño, apoyo y la confianza necesaria para para cumplir mis objetivos. A mi querido padre Maximo Gutierrez Calcina por enseñarme, el valor del esfuerzo, y haberme alentado a seguir adelante.

A mis hermanas Mirian Yaquelin, jhassel y a mi hermano Jhimy jhonatan, porque sé que siempre podre contar con su cariño y apoyo. A mis familiares, en especial a mi tía Balbina Gutierrez por estar hay para nosotros.

A mis amigos en especial a Henry Ventura por sus consejos y su aliento.

YASMANI RIGOBERTO GUTIERREZ AQUINO

Este trabajo va dedicado a mis padres Ladislao y Amelia, hermana Yanet por haberme forjado como la persona que soy; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos, y también a todos los que de alguna manera me ayudaron a lo largo de estos años.

ROY WILLIAMS QUISPE MACHACA

AGRADECIMIENTOS

Ante todo agradecemos a nuestro señor todo poderoso por brindarnos bendiciones, protección y salud para culminar nuestro proyecto de tesis y continuar nuestra carrera profesional.

A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas, en especial a nuestra escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por habernos acogido en sus aulas y poder culminar nuestra profesión.

A nuestros docentes de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por impartir sus conocimientos, velar por la calidad educativa y depositar su confianza en sus egresados.

A nuestro asesor/director de Tesis Mg. Gregorio Meza Marocho, por su orientación profesional, paciencia y apoyo permanente en el desarrollo de la presente investigación.

A todos nuestros compañeros la escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por su amistad y apoyo en nuestra formación académica.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	14
ABSTRACT	15
CAPÍTULO I	16
1.1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA	17
1.2.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.3. OBJETIVOS	18
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4. HIPÓTESIS	19
CAPÍTULO II	20
REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.1. ANTECEDENTES	20
2.2. FUNDAMENTOS.....	22
2.2.1. LA CARGA ELÉCTRICA	22
2.2.2. ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA	22
2.2.3. POTENCIAL ELÉCTRICO DE LA TIERRA.....	23
2.2.4. EL POZO DE TIERRA.....	23
2.2.5. PUESTA A TIERRA.....	23
2.2.6. SISTEMA ELÉCTRICO	24
2.2.7. EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	24
2.2.8. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	24
2.2.9. RESISTENCIA DE LA TIERRA	36
2.2.10. LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	37
2.2.11. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD	37
2.2.12. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	39
2.2.13. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD	40
2.2.14. PERFIL DE LA RESISTIVIDAD	50
2.2.15. UTILIDAD DE CONOCER LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	52
2.2.16. DATOS DE RESISTIVIDAD DE SUELOS TÍPICOS	53
2.2.17. LA FRECUENCIA DE LA CORRIENTE.....	55
2.2.18. MÉTODOS DE INSTALACIÓN.....	55

2.2.19. MATERIAL DE RELLENO.....	55
2.2.20. CONFIGURACIÓN DE LOS ELECTRODOS.....	61
2.2.21. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS DE TIERRA ..	62
2.2.22. EFECTO DE LAS DIMENSIONES FÍSICAS FORMA, TAMAÑO Y POSICIÓN DEL ELECTRODO.....	62
2.2.23. DISPOSICIONES O ARREGLOS COMPLEJOS DE ELECTRODOS	65
2.2.24. VOLTAJE DE PASO Y DE CONTACTO.....	72
2.2.25. EFECTOS DE LA CORRIENTE POR EL CUERPO HUMANO	78
2.2.26. DISEÑO PARA LA CONEXIÓN A TIERRA.....	86
2.2.27. DISEÑO DE SISTEMAS DE TOMA DE TIERRA.....	87
2.2.28. DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA EDIFICIOS	88
2.2.29. MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA DEL ELECTRODO DE TIERRA.....	88
CAPÍTULO III	99
MATERIALES Y MÉTODOS	99
3.1. DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN	99
3.2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO.....	99
3.3. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	99
3.3.1. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN.....	99
3.3.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	100
3.3.3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS	101
3.3.4. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	101
3.3.5. UNIDADES DE INFORMACIÓN.....	102
3.4. EQUIPOS, MATERIALES E INSTRUMENTOS UTILIZADOS	102
3.4.1. MATERIALES.....	102
3.4.2. EQUIPOS.....	106
CAPÍTULO IV.....	108
RESULTADOS Y DISCUSION.....	108
4.1. ANALISIS DE RESULTADOS.....	108
4.1.1. DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	108
4.1.2. CURVAS DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	110
4.1.3. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA VARILLA VERTICAL	111
4.1.4. CALCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA FORMADO POR VARILLAS ALINEADAS EN PARALELO	111

4.2. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE PUESTAS A TIERRA.....	113
4.2.1. MÉTODO VARILLA ENTERRADA DIRECTAMENTE	113
4.2.2. MÉTODO VARILLA CON ACOPLAMIENTOS RADIALES EN PARALELO.....	116
4.2.3. MÉTODO VARILLA CON CEMENTO CONDUCTOR.....	120
4.2.4. MÉTODO VARILLA MÁS GEL	123
4.2.5. MÉTODO VARILLA MÁS CEMENTO CONDUCTIVO Y BENTONITA.....	126
4.2.6. MÉTODO, VARILLAS CON TRATAMIENTO QUÍMICO EN PARALELO.....	127
4.3. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN LAS TOMAS DE TIERRA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS REALIZADOS	128
4.4. COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA....	129
DISCUSION	133
CAPÍTULO V.....	135
CONCLUSIONES	135
CAPÍTULO VI.....	136
RECOMENDACIONES	136
BIBLIOGRAFÍA	137
WEBGRAFIA.....	137
ANEXOS	138

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 2.1 TIPOS DE CONECTORES	25
FIGURA Nº 2.2 UNIONES EXOTÉRMICAS	28
FIGURA Nº 2.3 CONEXIONES SOLDADAS EN FORMA AUTÓGENA.....	29
FIGURA Nº 2.4 CABLE CONDUCTOR	30
FIGURA Nº 2.5 ELECTRODO VERTICAL.....	31
FIGURA Nº 2.6 ELECTRODOS HORIZONTALES	33
FIGURA Nº 2.7 TUBOS DE COBRE	33
FIGURA Nº 2.8 PLACAS.....	34
FIGURA Nº 2.9 MALLA DE TIERRA	35
FIGURA Nº 2.10 TAPA DEL POZO. (PVC)	36
FIGURA Nº 2.11 TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA DE SONDEOS	41
FIGURA Nº 2.12 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA MULTIELECTRODO	42
FIGURA Nº 2.13 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA SIN ELECTRODOS	43
FIGURA Nº 2.14 TELURÓMETRO DE CUATRO TERMINALES	44
FIGURA Nº 2.15 PROCESO DE MEDICIÓN.....	45
FIGURA Nº 2.16 PRINCIPIO BÁSICO DE MEDICIÓN	47
FIGURA Nº 2.17 CONFIGURACIÓN DE MEDICIÓN POR EL MÉTODO SCHLUMBERGER.....	49
FIGURA Nº 2.18 VARIACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL DEL CAMPO ELÉCTRICO, SEGÚN EL TERRENO.....	51
FIGURA Nº 2.19 PERFIL DE RESISTIVIDAD	51
FIGURA Nº 2.20 RELACIÓN DE LOS ELECTRODOS CON LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	53
FIGURA Nº 2.21 APLICACIÓN DEL GEL.....	58
FIGURA Nº 2.22 CEMENTO CONDUCTIVO	60
FIGURA Nº 2.23 BENTONITA.....	60
FIGURA Nº 2.24 RESISTENCIA – PROFUNDIDAD DEL ELECTRODO.....	62
FIGURA Nº 2.25 RESISTENCIA - LONGITUD DEL ELECTRODO HORIZONTAL	63
FIGURA Nº 2.26 RESISTENCIA VS RADIO DE LA BARRA	64
FIGURA Nº 2.27 RELACIÓN LONGITUD DE MALLA CUADRADA – RESISTENCIA DE TIERRA.....	65
FIGURA Nº 2.28 DISPOSICIONES DE ELECTRODOS Y LA RELACIÓN DE SU RESISTENCIA	67
FIGURA Nº 2.29 SUPERFICIE EQUIPOTENCIAL DE UN ELECTRODO	67

FIGURA Nº 2.30 ZONA DE INTERFERENCIA DE LAS LÍNEAS EQUIPOTENCIALES DE DOS ELECTRODOS	68
FIGURA Nº 2.31 SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES DE DOS ELECTRODOS	68
FIGURA Nº 2.32 PARÁMETROS DE LAS MUTUAS ENTRE LOS ELECTRODOS "H" Y "M"	70
FIGURA Nº 2.33 PARALELISMO DE LAS RESISTENCIAS.....	71
FIGURA Nº 2.34 VOLTAJE DE PASO, DE CONTACTO Y TRANSFERIDO: VP, VC, VT R.....	73
FIGURA Nº 2.35 VOLTAJE DE PASO	74
FIGURA Nº 2.36 POTENCIALES DE CONTACTO, DE PASO Y TRANSFERIDOS EN TORNO A UNA BARRA DE TIERRA X.....	76
FIGURA Nº 2.37 CURVAS DE SEGURIDAD (I VS T) CON TRAYECTORIA MANO IZQUIERDA-PIES	79
FIGURA Nº 2.38 MODELO DE LA IMPEDANCIA DEL CUERPO HUMANO.....	82
FIGURA Nº 2.39 VALORES PORCENTUALES RELATIVOS DE LA IMPEDANCIA DEL CUERPO HUMANO PARA DIFERENTES TRAYECTORIAS.....	84
FIGURA Nº 2.40 IMPEDANCIA DEL ELECTRODO DE TIERRA	88
FIGURA Nº 2.41 MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA (RPT).....	89
FIGURA Nº 2.42 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA VERSUS DISTANCIA DE (P).....	91
FIGURA Nº 2.43 SOLAPAMIENTO DE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL	92
FIGURA Nº 2.44 CURVA DE RESISTENCIA VERSUS DISTANCIA SIN SOLAPAMIENTO DE GRADIENTES DE POTENCIAL	92
FIGURA Nº 2.45 MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN SUELOS O PAVIMENTOS.....	94
FIGURA Nº 2.46 MEDICIÓN DEL ELECTRODO UTILIZANDO PINZA	95
FIGURA Nº 2.47 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UN SISTEMA MULTIATERRIZADO	96
FIGURA Nº 3.1 VARILLA DE COBRE.....	103
FIGURA Nº 3.2 CABLE DE COBRE.....	103
FIGURA Nº 3.3 CONECTOR ANDERSON.....	104
FIGURA Nº 3.4 THOR GEL.....	104
FIGURA Nº 3.5 CEMENTO THOR CEM	105
FIGURA Nº 3.6 BENTONITA SÓDICA.....	106
FIGURA Nº 3.7 TELURÓMETRO DIGITAL MTD-20KWE	107
FIGURA Nº 4.1 CURVAS DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	110

FIGURA Nº 4.2 VARILLA ENTERRADA DIRECTAMENTE.....	114
FIGURA Nº 4.3 COMPARACIÓN RPAT - 1.....	115
FIGURA Nº 4.4 COMPARACIÓN PORCENTUAL DEL RPAT - 1.....	115
FIGURA Nº 4.5 CURVA – MÉTODO RADIAL PAT - 2	117
FIGURA Nº 4.6 CURVA – MÉTODO RADIAL PAT - 3	118
FIGURA Nº 4.7 CURVA – MÉTODO RADIAL EN PARALELO.....	119
FIGURA Nº 4.8 CURVA – CON CEMENTO CONDUCTIVO	121
FIGURA Nº 4.9 COMPARACIÓN DE LA PRIMERA Y SEGUNDA MEDICIÓN DEL SPAT - 5	122
FIGURA Nº 4.10 COMPARACIÓN DE REDUCCIÓN PORCENTUAL DE LA PRIMERA Y SEGUNDA MEDICIÓN DE LA RPAT - 5.....	122
FIGURA Nº 4.11 CURVA – CON GEL.....	124
FIGURA Nº 4.12 COMPARACIÓN DE LA PRIMERA Y SEGUNDA MEDICIÓN DEL SPAT - 5	125
FIGURA Nº 4.13 COMPARACIÓN DE REDUCCIÓN PORCENTUAL DE LA PRIMERA Y SEGUNDA MEDICIÓN DEL RPAT - 6.....	125
FIGURA Nº 4.14 CURVA – CON CEMENTO CONDUCTIVO Y BENTONITA.....	126
FIGURA Nº 4.15 COMPARACIÓN – PAT	129
FIGURA Nº 4.16 COMPARACIÓN – SPAT PORCENTUAL.....	129
FIGURA Nº 4.17 COMPARACIÓN DE COSTOS	130

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA Nº 2.1 RESISTIVIDAD SEGÚN TIPO DE TERRENO.....	53
TABLA Nº 2.2 RESISTIVIDAD SEGÚN TIPO DE TERRENO.....	54
TABLA Nº 2.3 VALORES MEDIOS DE RESISTIVIDAD DE TERRENOS.....	54
TABLA Nº 2.4 DOSIFICACIÓN DEL GEL.....	57
TABLA Nº 2.5 PORCENTAJE DE REDUCCIÓN POR LA APLICACIÓN DEL GEL.....	57
TABLA Nº 2.6 INTENSIDAD DE CORRIENTE Y EFECTOS EN EL CUERPO PARA UNA FRECUENCIA DE 50/60 HZ.....	79
TABLA Nº 2.7 FACTOR DE CORRIENTE DE CORAZÓN PARA DISTINTAS TRAYECTORIAS	85
TABLA Nº 4.1 DATOS DE LA LECTURA DEL TELURÓMETRO	109
TABLA Nº 4.2 RESISTIVIDAD PROMEDIO DEL SUELO	110
TABLA Nº 4.3 RESULTADO DE LA RPAT - 1.....	114
TABLA Nº 4.4 COSTO DE MATERIALES PARA EL PAT - 1	116
TABLA Nº 4.5 MEDICIÓN DE LA RPT - 2.....	117
TABLA Nº 4.6 COSTO DE MATERIALES PARA EL PAT - 2	117
TABLA Nº 4.7 MEDICIÓN DE LA RPT- 3.....	118
TABLA Nº 4.8 COSTO DE MATERIALES PARA EL PAT - 3	118
TABLA Nº 4.9 MEDICIÓN DE LA RPAT 4.....	119
TABLA Nº 4.10 COSTO DE MATERIALES DE LA PAT - 4.....	119
TABLA Nº 4.11 PRIMERA MEDICIÓN DE LA RPT - 5.....	121
TABLA Nº 4.12 SEGUNDA MEDICIÓN DE LA RPT - 5.....	121
TABLA Nº 4.13 COSTO DE MATERIALES DE LA PAT -5.....	122
TABLA Nº 4.14 PRIMERA MEDICIÓN RPAT - 6.....	124
TABLA Nº 4.15 SEGUNDA MEDICIÓN RPAT- 6.	124
TABLA Nº 4.16 SEGUNDA MEDICIÓN RPAT- 6.	125
TABLA Nº 4.17 MEDICIÓN – CON CEMENTO CONDUCTIVO Y BENTONITA.....	126
TABLA Nº 4.18 COSTO DE MATERIALES DE LA PAT - 7	127
TABLA Nº 4.19 MEDICIÓN – VARILLAS CON TRATAMIENTO QUÍMICO EN PARALELO	127
TABLA Nº 4.20 COSTO DE MATERIALES DE LA PAT - 8.....	127
TABLA Nº 4.21 TABLA DE RESUMEN DE VALORES FINALES DE LAS RPAT	128
TABLA Nº 4.22 TABLA DE RESUMEN DE PRECIOS FINALES DE LAS PAT	128
TABLA Nº 4.23 RESUMEN DE PRECIO VS. RESISTENCIA OBTENIDA.....	130

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N° 1 VARILLA ENTERRADA DIRECTAMENTE (PAT 1)	138
ANEXO N° 2 VARILLA CON ACOPLAMIENTOS RADIALES (PAT 2 Y PAT 3)	139
ANEXO N° 3 RADIAL EN PARALELO (PAT 4)	140
ANEXO N° 4 VARILLA CON CEMENTO CONDUCTIVO (PAT 5)	141
ANEXO N° 5 VARILLA CON GEL (PAT 6)	142
ANEXO N° 6 VARILLA CON CEMENTO CONDUCTIVO Y BENTONITA (PAT 7)	143
ANEXO N° 7 SPT 5 MÁS SPT 6 EN PARALELO (PAT 8)	144
ANEXO N° 8 PROCESO DE TOMA DE DATOS DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO	145
ANEXO N° 9 LECTURAS DEL PERFIL 1.....	146
ANEXO N° 10 LECTURAS PARA EL PERFIL 2.....	146
ANEXO N° 11 LECTURAS PARA EL PERFIL 3.....	147
ANEXO N° 12 LECTURAS PARA EL PERFIL 4.....	147
ANEXO N° 13 VARILLA ENTERRADA DIRECTAMENTE CON TIERRA CERNIDA .	148
ANEXO N° 14 PROCESO DE INSTALACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA CON ACOPLAMIENTOS RADIALES EN PARALELO	149
ANEXO N° 15 MEDICIÓN DE LA PUESTA A TIERRA CON ACOPLAMIENTOS RADIALES EN PARALELO	150
ANEXO N° 16 TRATAMIENTO DE PUESTA A TIERRA CON CEMENTO CONDUCTIVO	150
ANEXO N° 17 APLICACIÓN Y MEDICIÓN DEL CEMENTO CONDUCTIVO	151
ANEXO N° 18 TRATAMIENTO DE PUESTA A TIERRA CON GEL	152
ANEXO N° 19 TRATAMIENTO DE PUESTA A TIERRA CON CEMENTO CONDUCTIVO Y BENTONITA.....	153

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- η : Cantidad de electrones.
- cm** : Centímetro.
- π : Constante (Pi).
- C** : Columbio.
- J** : Densidad de corriente.
- E** : Diferencia de potencial.
- λ : Distancia.
- φ : Flujo eléctrico.
- $^{\circ}\text{C}$: Grado centígrado.
- Z** : Impedancia.
- I** : Intensidad de corriente.
- J** : Joule.
- M** : Metro.
- Ω : Ohm.
- R** : Resistencia eléctrica.
- P** : Resistividad eléctrica.
- PAT** : Puesta a tierra.
- SPAT** : Sistema de puesta a tierra.
- RPAT** : Resistencia de puesta a tierra.

RESUMEN

Para desarrollo del trabajo se realizó el análisis comparativo de la reducción de la resistencia de puesta a tierra de los diferentes métodos de instalación a partir del diseño de un sistema de puesta a tierra, método “varilla vertical enterrada directamente” cuya resistencia de puesta a tierra final medida fue 11.14 (Ω), para un terreno con resistividad promedio de 34.97 (Ω -m). Agregando tres acoplamientos radiales a una varilla del método antes mencionado no se obtuvo reducción en la resistencia, sin embargo, la adición de tratamientos químicos sobre la varilla como el cemento conductor, gel y cemento conductor más bentonita, si nos ofrecieron resultados favorables con reducciones en la resistencia de puesta a tierra del 62%, 59.61% y 69.30% respectivamente. Así mismo se implementó en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica un sistema de puesta a tierra, método varillas con tratamiento químico en paralelo, con una resistencia de puesta a tierra de 2.38 (Ω), donde los estudiantes de nuestra escuela antes mencionada podrán realizar mediciones como parte de las prácticas de laboratorio, como también podrán ser conectadas en paralelo a las puestas a tierra existentes en nuestra Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la una – Puno.

Palabras claves: Puesta de Tierra, Instalaciones eléctricas, protección, Puno.

ABSTRACT

For the development of the work, a comparative analysis was made of the reduction of the earthing resistance of the different installation methods based on the design of a grounding system, method "vertical rod buried directly" whose final grounding resistance measured was 11.14 (Ω), for a plot with an average resistivity of 34.97 (Ω -m). By adding three radial couplings to a rod of the aforementioned method, no reduction in strength was obtained, but nevertheless, the addition of chemical treatments on the rod as the conductive cement, conductive gel and cement plus bentonite, if they offered favorable results with reductions in grounding resistance of 62%, 59.61% and 69.30% respectively. Likewise, a grounding system was implemented in the Professional School of Electrical Mechanical Engineering. rods method with chemical treatment in parallel, with a grounding resistance of 2.38 (Ω), where the students of our aforementioned school will be able to take measurements as part of the laboratory practices, as they can also be connected in parallel to the existing earthing in our Professional School of Electrical Mechanical Engineering of the one - Puno.

Keywords: Grounding, electrical installations, protection, Puno.

CAPÍTULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo que enfoca un tema muy importante, dentro de la ciencia de la electricidad, la conexión a la masa tierra de los equipos y objetos que están alimentados por energía eléctrica. En este trabajo se hace un análisis comparativo de la ejecución o construcción de las diferentes tomas de tierra que actualmente son utilizadas en instalaciones de baja tensión.

En él **capítulo I**: En la primera parte del proyecto de tesis damos a conocer los antecedentes, objetivos, hipótesis y la justificación.

En él **capítulo II**: En la segunda parte corresponde a la revisión de literatura de la investigación. Procedimiento por el cual debemos elegir el mejor lugar de ubicación del pozo de tierra, evaluando la resistividad del terreno con diferentes métodos. Como calcular un sistema de puesta a tierra por el método de una capa de suelo, utilizando la resistividad de la capa del suelo homogénea, como hacer su cálculo; como elegir una mejor toma de tierra, bajo los estándares internacionales actuales. Incidiendo en la peligrosidad del cuerpo humano cuando entra en contacto con la electricidad; de identificar los factores a considerarse como el tiempo que se mantenga el contacto, la tensión de toque y de paso permisible o voltajes máximos que un cuerpo humano puede soportar, en las instalaciones de fuerza, así como su función en las instalaciones eléctricas como subsistema de protección, etc. para hacer un uso más eficiente.

En el **capítulo III**: Se da a conocer el planteamiento metodológico, los materiales e instrumentos utilizados para la presente tesis, también el lugar donde se realizó la investigación.

En el **capítulo IV**: Se realiza el desarrollo de la instalación en forma práctica donde se han tomado los datos respectivos que finalmente servirán para el análisis de los diferentes componentes del sistema de puesta a tierra en concordancia con las normas nacionales e internacionales, que definen la importancia de la seguridad en las instalaciones eléctricas.

Para realizar las comparaciones o análisis se instalaron estos diferentes sistemas para su uso como muestra de la investigación y además como soporte de protección a los equipos de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Finalmente se explica los resultados finales del proyecto de investigación, las conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación respecto a los temas tratados.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El problema de la presente tesis es como elegir una mejor toma de tierra, bajo los estándares internacionales actuales. Incidiendo en la peligrosidad del cuerpo humano cuando entra en contacto con la electricidad; de identificar los factores a considerarse como el tiempo que se mantenga el contacto, la tensión de toque y de paso permisible voltajes máximos que un cuerpo humano puede soportar, en las instalaciones de fuerza, así como su función en las instalaciones eléctricas como subsistema de protección. Debido a los continuos accidentes ocasionados por las corrientes de fuga, obligan que todas las edificaciones cuenten con un sistema de puesta tierra, y constituye un problema para los usuarios, definir el mejor diseño para que garantice una performance durante su utilización, que garantice que cumple la toma de tierra con su función.

1.2.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Desarrollando el trabajo de tesis sabremos cuales son los comportamientos de los diferentes sistemas de puesta a tierra enfocándonos principalmente en la resistencia de puesta a tierra.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar sistemas de puestas a tierra con aplicación de los conceptos y recomendaciones normativas que en caso de falla a tierra se presente, utilizando diferentes materiales y probar sus ventajas de uno y otro sistema, además que sirvan para prácticas de laboratorio en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la UNA-PUNO.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar la descripción y aplicación de los conceptos y recomendaciones definidos en publicaciones, normativas y prácticas de la industria orientadas a que, en caso de falla a tierra de cualquier tipo, el sistema de puesta a tierra asegure la integridad física a las personas y las instalaciones, así como la apropiada operación de los equipos y sistemas de protección.
- b) Determinar la importancia de la puesta a tierra en los circuitos eléctricos. Definir los conceptos del diseño de una malla de puesta a tierra, la resistencia de puesta a tierra, voltajes de paso y toque, máximo alza de potencial, el espaciamiento entre conductores y la profundidad de enterramiento de una malla.

- c) Implementar las puestas a tierra de forma que se utilicen como prácticas de laboratorio en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- d) Evaluar y comparar los diferentes sistemas de puesta a tierra.

1.4. HIPÓTESIS

Un buen sistema de puesta a tierra, en caso de falla de corrientes a tierra, garantiza la protección de los equipos y las personas. Si se diseña una puesta a tierra eficiente justifica el desarrollo del trabajo y mejorará la práctica y entendimiento de los estudiantes de la EPIME en implementación de tomas de tierra.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Primer Antecedente:

“Diseño y construcción de puestas a tierra para el colegio técnico industrial Gualaceo, basado en las recomendaciones prácticas para el aterrizamiento en sistemas eléctricos comerciales e industriales de la IEEE”. (Gómez, 2010), tesis que analiza las recomendaciones de la IEEE Std 81-1983, para instalación de puestas a tierra en las instalaciones del Colegio Industrial Gualaceo en Cuenca.

Segundo Antecedente:

“Estudió e implementación del laboratorio de física en el tópico de electromagnetismo para la formación científica y mejoramiento del desempeño profesional de los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica de la universidad técnica de Manabí”. (Heredia, 2015). Cuyo objetivo es implementar instrumentos y equipos de ensayo en el laboratorio de física relacionado con el tópico del electromagnetismo para la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí y sus objetivos específicos fueron desarrollar las actividades metodológicas, y procedimentales para la implementación del Laboratorio de Física, dotar al laboratorio con instrumentos y equipos de ensayo respecto al electromagnetismo, elaborar un manual de protocolo de los instrumentos y equipos de ensayo implementados.

Tercer Antecedente:

“Diseño del sistema de puesta a tierra de la estación repetidora el Alisal para sistemas de telecomunicaciones de Movistar”, (Duche, 2015) tesis para obtener

el título de Ingeniero Electricista por Duche Zabala, Emerson y Manrique Miñan Willy; Trabajo realizado para implementar el sistema de puesta a tierra para una estación de telefonía celular.

Cuarto Antecedente:

“Análisis de la malla de un sistema de puesta a Tierra de una subestación de potencia (Teotihuacán) para su mejoramiento” Segura (2010), tesis para obtener el título de Ingeniero electricista, donde se plantea el diseño y proyecto de las instalaciones eléctricas destinadas al suministro o a la utilización de la energía eléctrica en circuitos electrónicos de estado sólido, donde las altas corrientes a tierra es una de las mayores preocupaciones de los ingenieros de diseño cómo conectar a tierra los equipos eléctricos de una manera segura, eficiente y apropiada.

Quinto Antecedente:

“Análisis del sistema de puesta a tierra de la Subestación Guatemala Este”, tesis para optar el grado de Ingeniero Electricista, en la Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, (Ajín, 2012), pone en manifiesto el análisis de la puesta a tierra de la subestación Guatemala Este, como parte del sistema nacional interconectado, diseñado bajo los estándares internacionales actuales. Incidiendo en la peligrosidad de entrar en contacto con la electricidad el cuerpo humano dependiendo del tiempo que se mantenga el contacto, describe el procedimiento de cálculo, describe el voltaje de contacto y de paso permisibles o voltajes máximos que un cuerpo humano puede soportar, de tal manera que no sean sobrepasados.

2.2. FUNDAMENTOS

2.2.1. LA CARGA ELÉCTRICA

Es la propiedad de determinadas partículas subatómicas (electrón y protón) que producen una energía de interacción electromagnética, lo que rodea a estas partículas también tiene electromagnetismo por lo que la interacción entre campos es constante. Esta propiedad es intrínseca de la materia. El electrón tiene una carga eléctrica de $1,6 \times 10^{-19}$ C y una masa de $9,1 \times 10^{-31}$ kg, que es aproximadamente 1.800 veces menor que la masa del protón o a la del neutrón. El electrón es una partícula elemental que no posee ningún tipo de subestructura.

Los átomos están compuestos por un núcleo y uno o más electrones que se unen a este, el núcleo está compuesto por números similares de neutrones y protones. Los electrones son partículas subatómicas con carga negativa, los neutrones poseen carga neutra y los protones carga positiva. Un átomo tiene carga negativa cuando el número de electrones es superior al de protones.

Un átomo tiene carga neutra cuando el número de protones y electrones es igual. La materia se encuentra formada por átomos, los átomos son la unidad constituyente más pequeña; si estos cuerpos tienen moléculas con carga neutra, el cuerpo tiene carga neutra. (Brainly, 2018)

2.2.2. ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

La energía potencial es la que poseen los cuerpos por estar en una determinada posición. La Energía Potencial Eléctrica es la energía que tiene una carga eléctrica debido a su posición en relación con otra u otras cargas eléctricas. El movimiento de las cargas eléctricas es debido a esta energía. A diferencia de los cuerpos sólidos, que tienen masa y son afectados por la

gravidad de la tierra, las cargas eléctricas son afectadas por la energía de atracción o de repulsión de otra carga o conjunto de cargas, moviéndose hacia el conjunto de cargas que lo atraen, similar a la fuerza gravitatoria que atrae las masas de los cuerpos. Este movimiento de las cargas se conoce como corriente eléctrica y la energía que “lleva” es el amperaje.

2.2.3. POTENCIAL ELÉCTRICO DE LA TIERRA

Se considera a la tierra que por mucha carga eléctrica que pueda acumular su potencial eléctrico es aproximadamente cero, de manera que sus cargas se compensan o anulan entre sí. La tierra es un lugar muy grande; debido a esto es casi imposible cargar eléctricamente a la tierra, significa que cualquier conductor con cargas eléctricas conectado directamente a la tierra no puede cargar eléctricamente al planeta entero.

2.2.4. EL POZO DE TIERRA

Como su nombre lo indica es un pozo, pero no de agua sino de tierra, cuya finalidad es albergar un electrodo o varilla conductor de cargas eléctricas dispersas o sueltas que pueden ocasionar una conmoción a una persona o dañar un equipo eléctrico.

2.2.5. PUESTA A TIERRA

Todo cuerpo sobre la tierra, tiende a estar en estado neutro. Una forma de conseguir este estado es descargándose, en otro cuerpo con diferente potencial o menor, esto se logra descargando generalmente en la tierra, conectando directamente mediante un electrodo o varilla conductora un cable desde el cuerpo que se desea descargar las cargas peligrosas o sueltas, para que el cuerpo quede en estado neutro o “descargado”.

2.2.6. SISTEMA ELÉCTRICO

Un Sistema eléctrico es un conjunto de elementos que se conjugan para producir, transportar y utilizar la energía eléctrica para uso común. Y es muy probable que genera electrones libres durante su operación. Electrones que pueden ser peligrosos dependiendo de la energía o amperaje que transporta.

Los sistemas eléctricos necesitan ser aterrizados o conectados a tierra, por este motivo que tales conexiones a tierra se encuentran en casi todos los puntos del sistema eléctrico. Desde la generación hasta la distribución y utilización doméstica o industrial.

2.2.7. EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Un sistema de puesta a tierra es el conjunto de elementos que componen lo necesario para realizar la unión eléctrica de un equipo o parte de un sistema eléctrico con el planeta o simplemente la tierra.

Está constituido por una conexión fija y removible desde el equipo o parte del sistema eléctrico, con un cable conductor hasta una varilla de metal conductor denominado electrodo, donde también es fijado por una conexión fija y removible. Los accesorios que protejan contra los elementos de la intemperie y contactos peligrosos de las personas.

2.2.8. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

- EL conector
- EL cable conductor
- El electrodo
- La tapa o cubierta

A. EL CONECTOR

Es un dispositivo que sirve como elemento de conexión entre la varilla de cobre y el cable de cobre que sirve de conductor del sistema de tierra.

Figura N° 2.1 Tipos de Conectores



Fuente: (Procobre)

Los electrodos de tierra tienen que ser conectados entre sí de alguna manera y es normal que sea vía cobre desnudo si es posible, ya que esto ayudará a reducir el valor de impedancia global. Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es muy importante evitar uniones y conexiones innecesarias. Debe considerarse el valor de corriente de falla y la duración de la falla que se espera que soporte el sistema de tierra.

A continuación, se explican con mayor detalle los métodos de unión que se emplean, incluyendo métodos mecánicos, bronceados (soldadura en fuerte), soldadura exotérmica y soldados por fusión autógena.

A.1. CONEXIONES MECÁNICAS

Estas se utilizan comúnmente y pueden ser mecánicas (conexión apernada) o hidráulicas (compresión). Los conectores deben satisfacer los requerimientos de los estándares aplicables. El proceso de probar el cumplimiento de las normas involucra habitualmente una serie de pruebas de vida durante las cuales el

conector es sometido a impactos mecánicos, eléctricos y térmicos. En consecuencia, son factores importantes el diseño, tamaño y material usado particularmente ya que tales conectores pueden permanecer invisibles en el terreno por cierto número de años, antes de que sean solicitados para operar. Es esencial una conexión eléctrica de baja resistencia, especialmente en sistemas de electrodos del tipo radial. Se han dado casos en los que, durante el proceso de mantenimiento, se han descubierto conexiones con resistencia de más de 30 ohms, esto perjudica notablemente el comportamiento del sistema de electrodos. Cuando se apernan entre sí cintas de cobre, debe tenerse cuidado con el tamaño de las perforaciones efectuadas para acomodar el perno. Si son demasiado grandes, la capacidad de transporte de corriente de la cinta se perjudicará. Motivo por el que, los estándares y reglamentos de práctica normalmente limitan el diámetro de la perforación a un tercio del ancho de la cinta o menos.

Cuando se apernan metales diferentes (por ejemplo, cintas de cobre y aluminio), las superficies deben ser minuciosamente limpiadas y protegidas por un inhibidor de óxido. Una vez efectuada la conexión, el exterior debe ser cubierto por pintura bituminosa u algún otro medio para proteger contra el ingreso de humedad. Cuando se une cobre y aluminio, el cobre primero debe ser estañado. Una unión apernada de este tipo es actualmente el método recomendado preferentemente en los estándares para conectar metales diferentes, en el caso de instalaciones exteriores y en subestaciones eléctricas. Estas conexiones deben estar a una mínima distancia sobre tierra y no pueden ser enterradas. (Morales, 1999).

A.2. CONEXIONES BRONCEADAS

La conexión bronceada se aplica ampliamente al cobre y aleaciones de cobre. Este método tiene la ventaja de proporcionar una baja resistencia de unión la cual no se corroe. Actualmente, es el método preferido descrito por los estándares para conectar cintas de cobre por ejemplo en el interior de subestaciones. Sin embargo, es esencial que el bronceado sea efectivo. Puede ser difícil hacer una buena unión en terreno, particularmente donde están involucradas grandes áreas de sección transversal. Son esenciales las superficies planas limpias pues los materiales de bronceado generalmente no fluyen como la soldadura. Existe así la posibilidad de conexiones adecuadas sólo en los puntos de contacto, pero con vacíos importantes que quedan sin llenar. Para este trabajo es esencial una buena fuente de calor, particularmente para lo que son los conectores grandes. (Morales, 1999)

A.3. UNIONES EXOTÉRMICAS

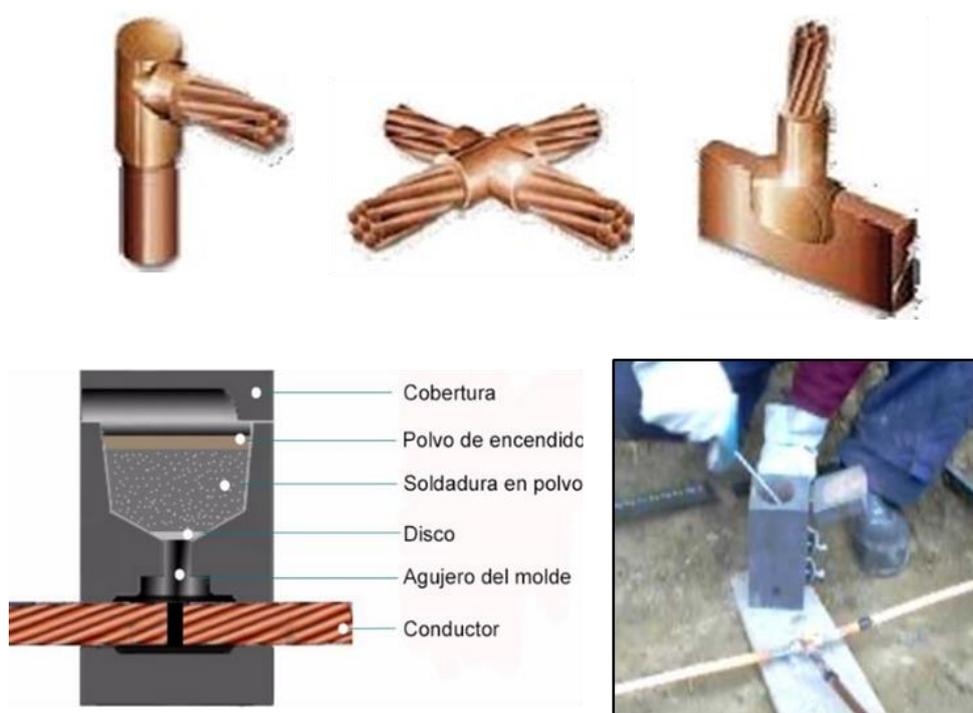
Estas uniones se realizan mediante un molde de grafito que se diseña para ajustar el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando una pistola con pedernal se enciende una mezcla de polvo de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre virtualmente puro en torno a los conductores. La reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito. Si se ocupa y mantiene adecuadamente, cada molde puede usarse para realizar entre 50 y 70 uniones. Este tipo de unión asegura los siguientes beneficios:

- Proporciona una unión permanente, de baja resistencia eléctrica y resistente a la corrosión.
- La técnica empleada no requiere adiestramiento, relativamente.

Puede operar a altas temperaturas, permitiendo así eventualmente reducir el calibre del conductor.

Actualmente este tipo de unión no es siempre permitida para conectar cobre y aluminio por ejemplo en subestaciones. Los metales que pueden conectarse son acero inoxidable, bronce, cobre, acero con recubierta de cobre, acero galvanizado, bronce y riel de acero. Hay algunos aspectos de seguridad involucrados con este tipo de unión, pero la técnica se ha desarrollado rápidamente para controlarlos, por ejemplo, reduciendo la emisión de gas. (Morales, 1999)

Figura N° 2.2 Uniones Exotérmicas



Fuente: (pararrayos-at3w.com)

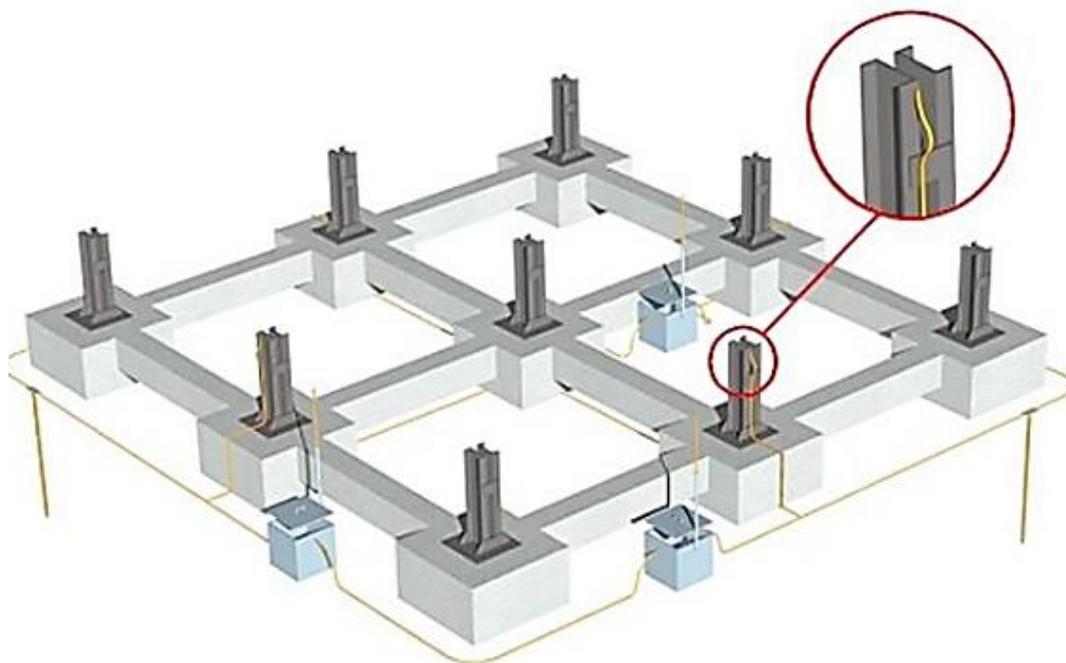
A.4. CONEXIONES SOLDADAS EN FORMA AUTÓGENA

El cobre puede unirse por soldadura de bronce o soldadura al arco. La técnica de unión por soldadura de bronce es efectiva y de bajo costo, empleada principalmente para realizar uniones en terreno (por ejemplo en trabajos con

tuberías de cobre). En esta técnica, se usa bronce como metal de relleno para formar un enlace superficial entre las partes de cobre. La técnica emplea alta temperatura y un material de relleno que es el que más se ajusta al cobre. A pesar de que la soldadura de bronce puede usarse para conectar cobre a metales ferrosos, esto normalmente no se cumple para puestas a tierra.

Cuando necesita unirse componentes de cobre de mayor medida, entonces se usa soldadura autógena en ambiente gaseoso. El arco eléctrico proporciona el calor, mientras que el área en torno al electrodo y la soldadura es envuelta por un gas tal como argón, helio o nitrógeno. Esto reduce la oxidación que toma lugar durante el proceso de soldadura. El nitrógeno se usa ampliamente como el “gas inerte” cuando se suelda el cobre. Se requieren materiales de relleno especialmente desarrollados, que son reconocidos por su buen comportamiento al soldar cobre. El aluminio puede ser soldado vía arco de gas inerte de tungsteno o arco de gas inerte de metal. (Morales, 1999).

Figura N° 2.3 Conexiones Soldadas en Forma Autógena



Fuente: (Morales, 1999)

B. El cable Conductor

Es un cable trenzado de varios hilos que garantiza que las pequeñas corrientes de fuga sean derivadas a la varilla de conexión a tierra.

Figura N° 2.4 Cable Conductor



Fuente: (pararrayos-at3w.com)

C. Electrodo de Tierra

Un electrodo de tierra es una varilla conductora que está en contacto directo con el terreno facilitando la descarga de cualquier tipo de corriente de fuga a tierra. Cuanto más grande sea su sección, más fácil será la descarga. Sus propiedades mecánicas permitirán que no se corroa, y sus propiedades eléctricas baja resistencia.

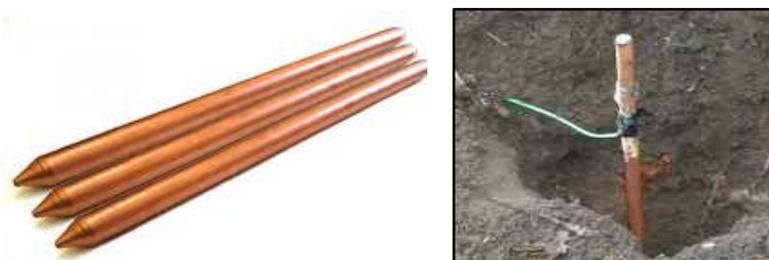
Los materiales usados son: cobre, acero galvanizado, acero inoxidable y hierro fundido, el cobre generalmente es el material preferido, el aluminio se usa algunas veces para conexiones fuera del terreno, pero la mayoría de los estándares prohíben su uso como electrodo de tierra debido al riesgo de corrosión acelerada. El producto corrosivo deja de ser conductor y reduce la efectividad de la puesta a tierra.

C.1. TIPOS COMUNES DE ELECTRODOS DE SISTEMAS A TIERRA

C.1.1. ELECTRODO VERTICAL

El electrodo más común es la barra cilíndrica vertical, porque su costo de instalación es relativamente bajo y pueden usarse para alcanzar en profundidad un suelo de baja resistividad puede tomar diversas formas pudiendo ser estas: barras verticales, placas y conductores horizontales.

Figura N° 2.5 Electrodo Vertical



Fuente: (pararrayos-at3w.com)

Generalmente ofrecen la forma más conveniente y económica de instalarse. A menudo se requiere modificar poca superficie (tal como romper superficies de concreto). Los métodos de instalación incluyen accionamiento manual, accionamiento mecánico y perforación. Las barras (hasta 1,80 m. de largo) se instalan a menudo empleando un martillo pesado (combo) operado manualmente. Los golpes relativamente cortos y frecuentes son más efectivos normalmente. Las barras están acondicionadas con una cabeza endurecida y una punta de acero para asegurar que la barra misma no se dañe durante el proceso.

C.1.2. ELECTRODOS HORIZONTALES

Los electrodos horizontales pueden ser instalados en surcos directamente en el terreno o más frecuentemente en zanjas de hasta un metro de profundidad. El uso de equipo de excavación mecánica de pala angosta puede resultar en costos

de instalación menores, en sitios donde esto es posible. La profundidad de instalación tiene normalmente un mínimo de 0,6 metros y más si es necesario pasar bajo el nivel de cultivo o de escarcha en zonas heladas. En algunos proyectos grandes, toda el área puede ser excavada para permitir obras civiles. Esto presenta a menudo una buena oportunidad para minimizar costos tendiendo el conductor del electrodo de tierra en ese momento. Hay que tener cuidado de prevenir el daño o robo del conductor, una vez tendido.

Estos están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cable flexible). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia, debido a la capacitancia levemente mayor a tierra. Puede ser más difícil de conectar (por ejemplo, a barras verticales), de modo que puede significar un costo de instalación levemente mayor. Para reducir costos globales, la cinta se puede usar para los electrodos que llevarán la mayor corriente (por ejemplo, electrodos del perímetro y conexiones principales a los equipos) mientras que el conductor flexible puede usarse en otra parte. La cinta que se instala bajo tierra es totalmente recocida de modo que puede ser plegada fácilmente. Para realizar conexiones exteriores al terreno está disponible la cinta cubierta de PVC, conductores sólidos o flexibles. También existen cintas de cobre cubiertas de plomo o estaño para aplicaciones en casos especiales. (Morales, 1999)

Figura N° 2.6 Electrodo Horizontales

Fuente: (Procobre)

C.1.3. ELECTRODOS SECUNDARIOS

Existen algunos tipos interesantes de electrodos secundarios, su propósito es mejorar el comportamiento de un electrodo de tierra. Ellos incluyen pozos de tierra y embalses de terreno, un pozo de tierra puede comprender varias tuberías largas enterradas verticalmente en el suelo, están conectadas entre sí y rodeadas por un material de baja resistividad, también pueden ser tipo espiral o muelle.

Un embalse de tierra es típicamente una cavidad en una ubicación donde se pueda mantener la humedad, que está llena con desechos metálicos y otro material conductor. Un ejemplo de electrodo secundario consiste de un tubo de cobre de 50 mm de diámetro, el cañón interior se llena parcialmente con sales metálicas en bruto y los extremos superior e inferior del tubo se sellan con tapas. Se perfora el tubo en la parte superior para ventilación y también para drenaje en la parte inferior, el material de relleno es bentonita. (Morales, 1999)

Figura N° 2.7 Tubos de Cobre

Fuente: (dicorsa.com)

El dispositivo funciona de la siguiente manera: Producto de los cambios en la presión atmosférica y del movimiento natural del aire, se bombea aire a través de los huecos de ventilación, en la parte superior del tubo. La humedad existente en el aire absorbido entra en contacto con la sal y se forman gotas de agua vía un proceso higroscópico. Al acumularse la humedad, se forma una solución electrolítica que escurre hacia la parte inferior del tubo. Con el tiempo se forma suficiente electrolito el cual fluye a través de las perforaciones inferiores de drenaje hacia el suelo circundante, mediante osmosis. De esta manera, el electrolito forma “raíces” en el terreno que lo rodea, las cuales ayudan a mantener su impedancia en un nivel bajo.

C.1.4. PLACAS

Son utilizados varios tipos de placas con el propósito de mejorar la conexión de las capas de tierra con el electrodo de tierra. (Morales, 1999)

Figura N° 2.8 Placas



Fuente: (Procobre.cl)

C.1.5. MALLAS

Las mallas son realizadas con conductores de cobre como un enrejado para propósitos de puesta a tierra, con un único electrodo que debe ser sólido y de tamaño lo suficientemente largo para su conexión, se usan para graduar potenciales y no se espera que permitan el paso de niveles de corriente de falla significativos. Se construyen las mallas de cobre o de acero recubierto de cobre o cooperweld.

Figura N° 2.9 Malla de Tierra



Fuente: (Procobre.cl)

A comienzos de siglo, las planchas eran tan comunes que a todos los electrodos de tierra se les llamaba planchas de tierra. Cuando se incrementó el uso de la electricidad, las planchas debieron manejar corrientes mayores, lo cual significó aumentar las dimensiones de la plancha. Su uso continuó por un tiempo considerable, principalmente debido a la costumbre y la práctica, a pesar de que tenían algunas desventajas. Por ejemplo, generalmente requieren excavación manual o mecánica y, por lo tanto, el costo de instalación puede ser muy alto.

Para reducir la magnitud de la excavación requerida, las planchas se instalan normalmente en un plano vertical, desde aproximadamente 0,5 metros bajo la superficie. Es fácil compactar el terreno contra la plancha cuando se rellena, si

está instalada verticalmente. Si las planchas tienen que llevar una cantidad importante de corriente, entonces su resistencia necesita ser de bajo valor. En la práctica, las resistencias combinadas no eran aún lo suficientemente bajas y las corrientes de falla generalmente seguían otras rutas. De esta manera, por lo tanto, en esta situación no se cumplía la mejor densidad de corriente, señalada como una ventaja para las planchas. Usualmente podía lograrse un arreglo mejor usando barras y electrodos horizontales. Debido al costo de instalación relativamente alto, poco se justifica usar planchas, en las existentes cuando se detecta deterioro, son reemplazadas normalmente por un conjunto de barras.

D. LA TAPA O CUBIERTA DEL POZO

Este es el accesorio necesario para proteger el conector y la varilla de tierra.

Figura N° 2.10 Tapa del pozo. (PVC)



Fuente: (promart.pe)

2.2.9. RESISTENCIA DE LA TIERRA

Es la resistencia que todo cuerpo ofrece al paso de los electrones de la corriente eléctrica. Una puesta a tierra no solo presenta resistencia, también capacitancia e inductancia, en diferentes grados que influye en la conducción de la corriente de descarga que se quiere desviar a tierra.

La resistencia de puesta a tierra, se puede considerar como una impedancia de puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra depende de la resistividad del terreno, de su composición de las capas del terreno, que varía por su estructura; húmeda, seca, sales minerales, etc.

2.2.10. LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad de los suelos se expresa en Ω -m, Ω -cm o Ω -mm, que corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cúbico de suelo o aguas, entre sus paredes Laterales (aristas) representado por la letra Griega ρ .

La resistividad del terreno está determinada por la composición del terreno, la estratigrafía, la granulometría, la humedad, la temperatura, la compactación, las sales solubles que se encuentren.

2.2.11. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD

En general los suelos de grano fino tienen poca resistividad, a medida que aumenta el tamaño del grano tiene mayor resistividad, esta característica, puede ayudar a determinar la composición de los terrenos al medir su resistividad de los suelos. Pero también existen factores que influyen en la resistividad, como la humedad, por ello cuando se agrega agua a un terreno este disminuye.

2.2.11.1. HUMEDAD (HIGROMETRÍA)

La humedad o el contenido de agua influyen en el valor de la resistividad. De acuerdo a la temporada o clima. La resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% de su relación con el peso. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Y un terreno en tiempo de secas presenta una resistividad tal que no sirve para las descargas

de pequeñas corrientes. Por eso el sistema debe ser diseñado para trabajar en el peor de los casos que es la temporada de secas, y más si está dentro de un lugar sin acceso a corrientes subterráneas o la intemperie. (Ruelas 2018)

2.2.11.2. SALINIDAD

Si agregamos agua destilada al terreno no tiene efecto, pues el agua destilada no es conductor, pero si añadimos agua salada, es un buen conductor. Las sales del terreno reducen su resistividad y aumentan su capacidad de conducción. Sin embargo se debe tener cuidado de agregar sales, porque corroen la varilla o electrodo. Sin embargo, existen composiciones químicas como el gel que mejoran la salinidad del terreno, sin afectar el electrodo. Al realizar la medición de la resistividad del suelo se determina la cantidad de electrolitos; minerales y sales disueltas del terreno.

2.2.11.3. TEMPERATURA

La temperatura incide en la humedad del terreno, a bajas temperaturas se llega a congelar el agua y aumenta la resistividad. En lugares donde existen bajas temperaturas, se recomienda colocar los electrodos a mayor profundidad. A menor temperatura se va reduciendo el movimiento de los electrolitos incrementando la resistividad de la tierra.

2.2.11.4. COMPACTACIÓN

Es importante la compactación del terreno, para que tenga buen contacto con la varilla o electrodo. Si se coloca los electrodos con máquinas de penetración, es probable que la vibración haga que no tenga contacto la varilla; por ello se debe compactar luego el terreno.

2.2.11.5. ESTRATIGRAFÍA

Al introducir la varilla, atraviesa diferentes estratos de terreno, cuya resistividad es diferente, lo que puede aumentar considerablemente la resistividad. En la mayoría de los casos, se recomienda realizar un pozo, para mejorar este factor.

2.2.11.6. GRANULOMETRÍA

La tierra de grano fino, tiene mayor adhesión y tiene mejor capacidad conductiva que la tierra de grano más grande, como la arena tiene mejor conductividad que la grava. Este factor que influye en la calidad de contacto con la varilla o electrodo, aumentando la resistividad del terreno. A mayor tamaño de granos de tierra, mayor resistividad.

Los suelos se componen de arcilla normal tiene una resistividad entre 40 a 500 ohm-m, consiguiéndose con una varilla enterrada a 3 m una resistencia a tierra de 15 a 200 ohms. Si se coloca un electrodo en un terreno rocoso de resistividad 5000 ohm-m o más es virtualmente imposible obtener menos de 100 ohm.

2.2.12. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La medida o medición de la resistividad del terreno, no es requisito para hacer una puesta de tierra para un edificio o toma de tierra local, puesto que el terreno se prepara y se adecua para su utilización.

Es obligatorio para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, siendo aconsejable ubicar la instalación en el área de más baja resistividad y hacerlo más económica.

Los terrenos, por tener diferentes estratos y composición química, presentan diferentes resistividades, para obtener el perfil de los estratos y su resistividad,

se tienen varios métodos para desarrollar su perfil de resistividad, estos son en base a ondas de electricidad que se impulsan a través de electrodos al terreno, y son medidos con instrumentos sensibles que captan la diferencia de potencial entre los electrodos. (www.geonica.com).

2.2.13. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD

Existen diferentes métodos, los podemos dividir en espectroscopia amplia y espectroscopia puntual.

2.2.13.1. ESPECTROSCOPIA AMPLIA

Para medir la resistividad del suelo requiere de equipos sofisticados que además de obtener la resistividad obtienen otros parámetros, que son de importancia para la geotécnica.

- Testificación de Sondeos (Well Logging).
- Tomografía Eléctrica Multi electrodo.
- Tomografía Eléctrica sin Electroodos.

A. TESTIFICACIÓN DE SONDEOS (WELL LOGGING)

Primeramente se realiza el sondeo; que consiste en la Testificación Geofísica de Sondeos, es una técnica de investigación del subsuelo, consistente en la medida y el registro continuo y simultáneo de diferentes parámetros físicos, a lo largo de toda la profundidad de un sondeo o pozo (Resistividad, Potencial Espontáneo, Polarización Inducida, Susceptibilidad magnética, Radiación Gamma Natural, Calibre del Sondeo, Verticalidad, etc.), utilizando para ello diferentes sondas multiparamétricas intercambiables, que se desplazan dentro del mismo, sustentadas por un cable de conexión de arrollamiento automático en un cabrestante situado en superficie.

Las señales eléctricas generadas por la sonda de medida, se transmiten por el cable hasta una Unidad Electrónica de Control situada también en superficie,

la cual se encarga de procesar y registrar los datos obtenidos, a fin de permitir la interpretación, a posteriori, de los mismos y deducir las diferentes características y propiedades de las sucesivas capas y materiales atravesados por la sonda en su recorrido ascendente a lo largo del sondeo, es decir, su litología.
(www.geonica.com)

Figura Nº 2.11 Testificación Geofísica de Sondeos



Fuente: (www.geonica.com.)

B. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA MULTIELECTRODO

Estos métodos eléctricos de prospección se basan en la existencia de variaciones de las propiedades eléctricas, en especial la resistividad de las distintas formaciones del subsuelo, teniendo como objetivo determinar la distribución en profundidad (resistividades y espesores) de los niveles geoelectrónicos presentes.

Esta técnica, proporciona conjuntamente información lateral y en profundidad. El sistema consta de un medidor de resistencia de tierra o unidad básica, un selector de electrodos y un juego de cables multi conectores que permiten utilizar hasta 64 electrodos conmutables de forma totalmente automática a través del selector de electrodos y controlado por la unidad básica de control. Estos equipos también permiten realizar medias de la resistividad utilizando dispositivos más

simples, como los sondeos eléctricos verticales (S.E.V. o en inglés Vertical Electrical Sounding V.E.S.) o las calicatas eléctricas (en inglés resistivity profiling). (www.geonica.com)

Figura N° 2.12 Tomografía Eléctrica Multielectrodo



Fuente: (www.cartomex.com)

C. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA SIN ELECTRODOS

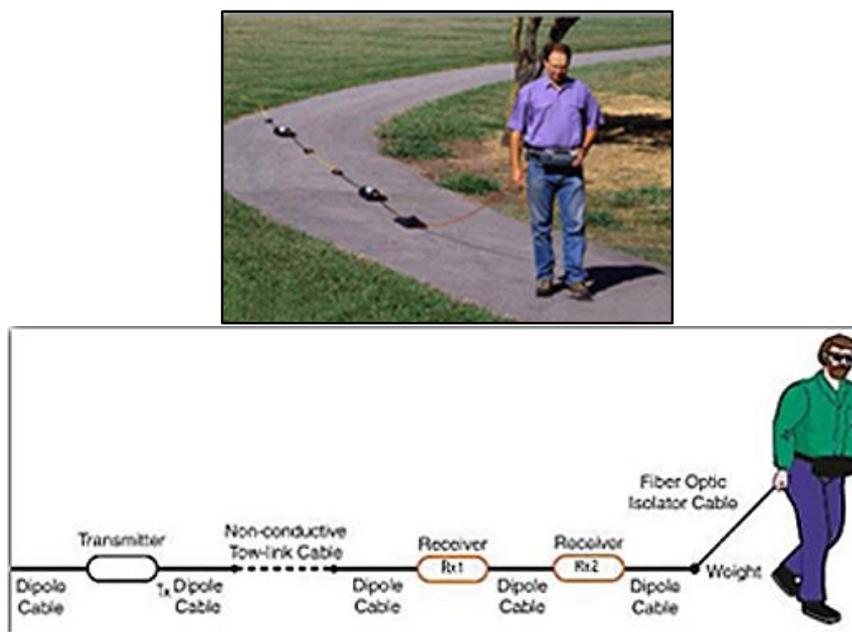
El método de prospección eléctrica del terreno mediante Acoplamiento Capacitivo (CCR-del inglés, Capacitively Coupled Resistivity), permite medir las propiedades eléctricas de suelos y rocas, sin necesidad de clavar electrodo alguno en el suelo, tal como requieren las técnicas convencionales.

Esta técnica de prospección permite realizar los trabajos en mucho menor tiempo que la técnica convencional con electrodos, ya que las medidas se llevan a cabo de modo continuo, sobre la marcha, a medida que el dispositivo lineal formado por el conjunto de antena transmisora y receptora, va siendo arrastrado por el operador. En la fotografía adjunta, se ilustra claramente la cómoda forma de trabajo.

Este modo de medir la resistividad del terreno está limitado a estudios relativamente superficiales, aunque se puede aumentar la profundidad de investigación, haciendo mayor la separación entre la antena trasmisora y la

receptora, e incluso duplicando dicho juego de antenas, formando todo siempre un único dispositivo de arrastre. (www.geonica.com)

Figura Nº 2.13 Tomografía Eléctrica sin Electrodo



Fuente: (www.geonica.com)

2.2.13.2. ESPECTROSCOPIA PUNTUAL

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un telurómetro, terrómetro o Megger .de tierras. Los instrumentos son de 2 tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero (analógico) y el de lectura directa (digital). El instrumento incluye cuatro sondas o electrodos de prueba, para incrustar en el terreno, hasta una profundidad de 60 cm asegurando que el contacto sea sólido o bien compactado. Cada sonda se conecta a un terminal correspondiente, son dos terminales de corriente (C1, C2) y dos de potencial (P1, P2) marcados claramente en el aparato como: C1 P1 P2 C2. Los cables para conexión con los electrodos de prueba tienen mínimo un calibre de 2.5 mm².

El telurómetro mediante una fuente eléctrica impulsa una corriente a las sondas o electrodos (cuyo tamaño es de una longitud de 60 cm y un diámetro

de 16 mm), con frecuencias superiores a 60 Hz, para evitar se midan voltajes ajenos a los de la medición; producida por fuentes o conductores cercanos que estén conduciendo corrientes en alta tensión e induzcan valores errados.

Los equipos de análisis con más precisión tienen cables de conducción blindados y coaxiales para filtraje, de forma que se realicen diferentes mediciones con diferentes frecuencias y los valores son similares, esto descarta posibles errores por señales externas. (Ruelas, 2018)

Figura N° 2.14 Telurómetro de Cuatro Terminales



Fuente: (HTTP://WWW.FLUKE.COM)

Para obtener un perfil de resistividad del terreno, se desarrolla las mediciones en forma radial, iniciando de un extremo y cada 90 ° rotando los electrodos en forma lineal de manera que se cubra la superficie en forma circular sobre un punto determinado del terreno.

Luego con los valores obtenidos en un diagrama de doble entrada se grafica la curva Resistividad – Distancia – profundidad de electrodo, obteniéndose el perfil del terreno según su resistividad.

Los métodos más conocidos son:

- Método de Wenner.
- El método de Schlumberger

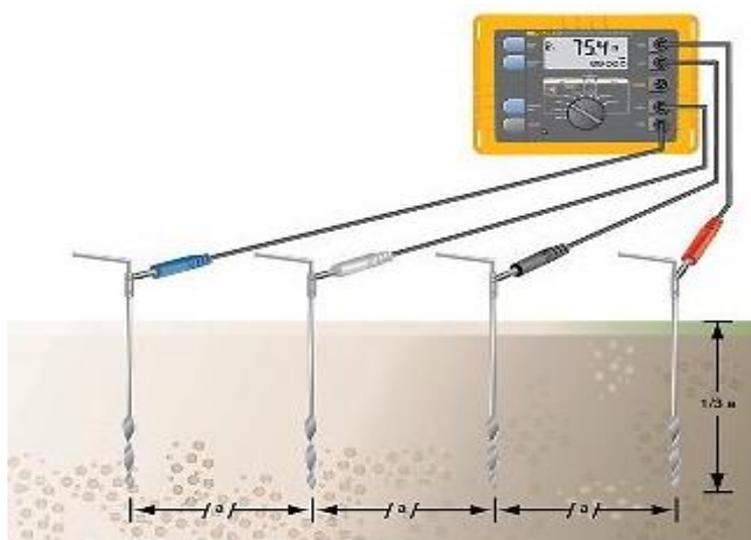
A. MÉTODO DE WENNER.

El método Wenner fue desarrollado por el Dr. Frank Wenner, miembro de la agencia de estándares de EE.UU en 1915. El procedimiento para medir la resistividad de un terreno, juntamente con la ecuación que lleva su nombre, fue aceptado desde entonces universalmente. (Wenner 1915)

Proceso de medición.

Para medir la resistividad del terreno, se conecta el telurómetro de resistencia de tierra tal y como se muestra en la figura N° 2.15.

Figura N° 2.15 Proceso de Medición



Fuente: ([HTTP://WWW.FLUKE.COM](http://www.fluke.com))

Se colocan en el terreno cuatro picas en línea recta equidistantes entre ellas. La distancia entre las picas debe ser al menos el triple que el valor de profundidad de la pica. Por lo tanto, si la profundidad de cada pica es de 30 cm, asegúrese de que la distancia entre las picas es como mínimo de 91 cm. El telurómetro genera una corriente conocida a través de las dos picas exteriores y se mide la caída en el potencial de tensión entre las dos picas interiores. Mediante la Ley de Ohm ($V = IR$), el comprobador inteligente, calcula de forma automática la

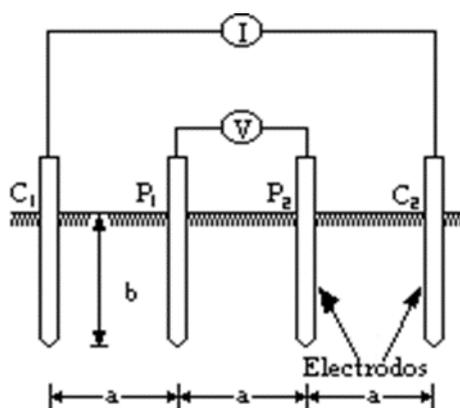
resistividad del terreno. Dado que elementos como piezas de metal enterradas o acuíferos subterráneos distorsionan e invalidan a menudo los resultados de la medición, siempre se recomienda realizar mediciones adicionales en las que los ejes de las picas se hayan girado 90 grados. Al cambiar la profundidad y la distancia varias veces, se produce un perfil que puede determinar un sistema de resistividad del terreno adecuado.

Las mediciones de resistividad del terreno a menudo se ven distorsionadas por la existencia de corrientes de tierra y sus armónicos. Para impedir que esto ocurra, el telurómetro inteligente emplea un sistema de control automático de frecuencia, el cual selecciona automáticamente la frecuencia de medición con la mínima cantidad de ruido que le permita obtener una lectura clara. (<http://www.fluke.com>)

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo. (Ruelas, 2018)

Figura N° 2.16 Principio Básico de Medición



Fuente: (Ruelas, 2018)

En la figura N° 2.16 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{\left[1 + \left[\frac{2 \cdot a}{(a^2 + 4 \cdot b^2)^{0.5}} \right] - \left[\frac{2 \cdot a}{(4 \cdot a^2 + 4 \cdot b^2)} \right] \right]} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m.

a: distancia entre electrodos en metros.

b: profundidad de enterramiento de los electrodos en metros.

R: lectura del telurómetro en ohm.

Si la distancia enterrada (b) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (a). O sea $a > 2b$, la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (2.2)$$

Donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m.

a : distancia entre electrodos en metros.

R : lectura del telurómetro en ohm.

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Como ejemplo, si la distancia entre electrodos a es de 3 metros, b es 0.15 m y la lectura del instrumento es de 0.43 ohms, la resistividad promedio del terreno a una profundidad de 3 metros, es de 8.141 ohm-m según la fórmula completa y de 8.105 ohms-m según la fórmula simplificada. (Ruelas, 2018)

Si se decide instalar varillas de toma de tierra de tres metros de longitud en su sistema de conexión a tierra. Para medir la resistividad del terreno a tres metros de profundidad, es necesario dejar una separación entre los electrodos, que en este caso sería de tres metros. Para medir la resistividad del terreno, Encienda el telurómetro y lea el valor de la resistencia en Ohmios. Supongamos que en este caso el valor de resistencia es de 100 Ohmios.

Datos: $a = 3$ metros y, $R = 100$ Ohmios. Por tanto, la resistividad del terreno sería:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

$$\rho = 2 \times 3.1416 \times 3 \text{ metros} \times 100 \text{ ohmios}$$

$$\rho = 1885 \Omega\text{-m}$$

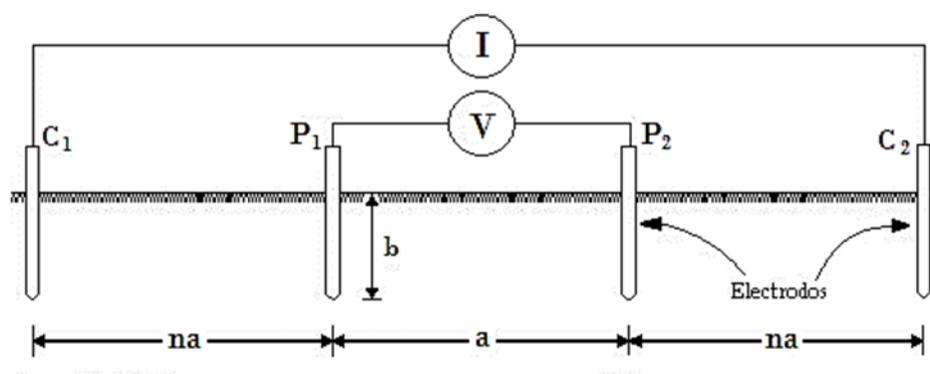
Se toma lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras para que no sean afectadas por estructuras metálicas subterráneas. Y, que con ellas se obtenga el promedio.

B. MÉTODO DE SCHLUMBERGER

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial (a) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos (na) de la separación base de los electrodos internos (a).

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura siguiente.

Figura N° 2.17 Configuración de medición por el Método Schlumberger



Fuente: (Ruelas, 2018)

Con este método la resistencia está dada por:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (n+1)na \quad (2.3)$$

Donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m.

na: distancia de electrodo exteriores.

R: lectura del telurómetro en ohm.

a: separación entre los electrodos centrales o de potencial.

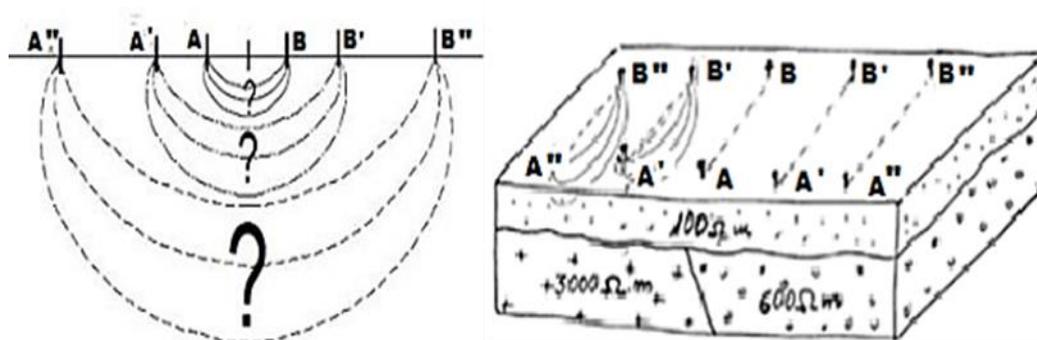
El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas. (Ruelas, 2018)

2.2.14. PERFIL DE LA RESISTIVIDAD

Toda corriente que fluye a través de un medio de alta resistividad, genera una diferencia de potencial importante en el medio. De lo que se desprende que la circulación de corriente por el terreno puede desarrollar un gradiente de potencial (y por ende un campo eléctrico) elevado y afectar extensas regiones, en particular sobre la superficie del suelo.

En general la variación de resistividad en la dirección horizontal es reducida comparada con las dimensiones normales de una puesta a tierra y puede por lo tanto ser despreciada. (Cárdenas, 2011).

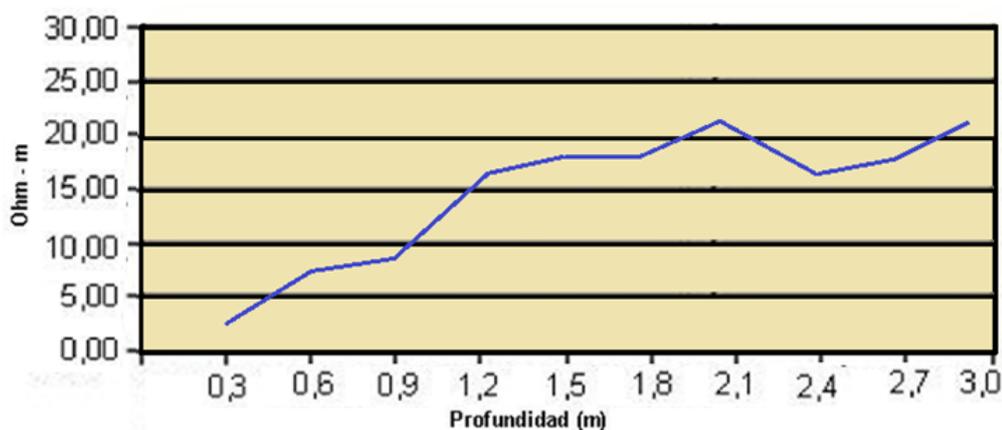
Figura N° 2.18 Variación Vertical y Horizontal del Campo Eléctrico, Según el Terreno



Fuente: (Cárdenas, 2011)

Para obtener el perfil de resistividad en un punto dado, se utiliza el Método de Wenner con espaciamientos entre electrodos de prueba cada vez mayores. Por lo general, para cada espaciamiento se toman dos lecturas de resistividad en direcciones perpendiculares entre sí. La gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad ρ contra distancia entre electrodos (a) se denomina perfil de resistividad aparente del terreno. (Ruelas, 2018)

Figura N° 2.19 Perfil de Resistividad



Fuente: (Ruelas, 2018)

2.2.15. UTILIDAD DE CONOCER LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno es útil en estudios geofísicos para encontrar la profundidad y grueso de la roca, para ubicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas. En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión. Y encontrar los lugares óptimos para localizar la malla o red de tomas de tierra de una subestación, planta generadora, sistema electrónico, cómputo o estación retransmisora de radiofrecuencia.

Los dos principales constituyentes de suelos son el óxido de aluminio y el óxido de silicio los cuales son excelentes aislantes eléctricos; no obstante, normalmente es posible detectar una conducción eléctrica apreciable en el terreno. Esto se debe a que:

- a) La cantidad de corriente transportada puede alcanzar valores importantes aún en un mal conductor, si el volumen que participa es considerable.
- b) La conductividad del suelo se debe en gran medida a la presencia de humedad y sales en solución en los intersticios dejados por las formaciones rocosas o masas minerales.

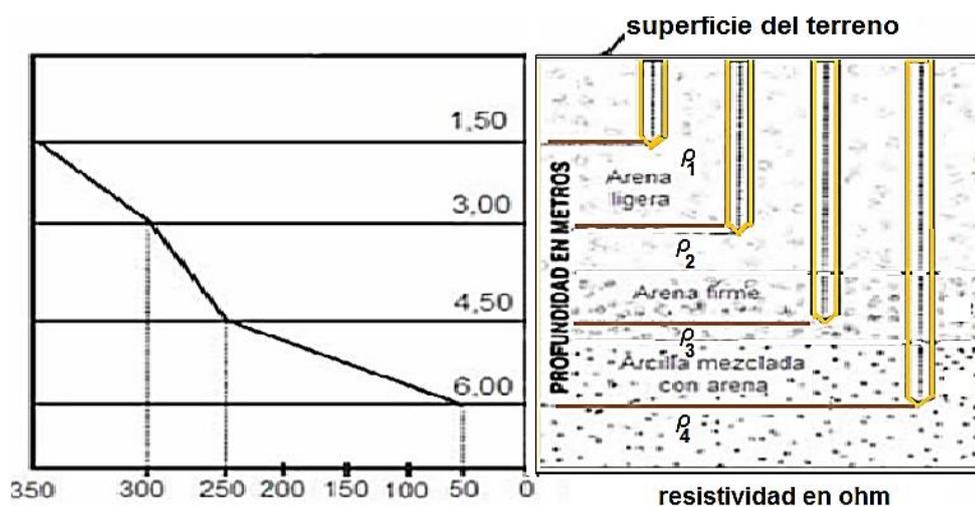
De la primera observación se deduce que el proceso de conducción en suelos es de carácter electroquímico y depende de factores como:

- Conductividad del agua que llena los poros
- Porosidad de materiales componentes del terreno
- Distribución y disposición de los poros.

El valor de resistividad obtenido de una medición de terreno es una mezcla de las resistividades de diversos materiales que componen el terreno, a este valor se denomina resistencia aparente ρ_a . (Cárdenas, 2011).

De forma práctica, se puede representar el terreno por estratos paralelos a la superficie del suelo, determinándole un espesor por cada valor constante de resistividad que se obtenga. El estrato homogéneo más profundo se considera de espesor infinito.

Figura Nº 2.20 Relación de los Electrodo con la Resistividad del Terreno



Fuente: (Cárdenas, 2011)

2.2.16. DATOS DE RESISTIVIDAD DE SUELOS TÍPICOS

Tabla Nº 2.1 Resistividad Según Tipo de Terreno

Material	Resistividad (ohm-metro)
Permafrost	3500 – 4000
Asfalto seco	2*10e6 – 30*10e6
Concreto seco	1200 – 28000
Concreto mojado	21 – 100
Compuesto GAP seco	0.032
Compuesto GAP con 30 % de agua en masa	0.015

Fuente: (Ruelas, 2018)

Tabla Nº 2.2 Resistividad Según Tipo de Terreno

Naturaleza del Terreno	Resistividad (Ohmios-metro)
Terreno pantanoso	Hasta 30
Limo	20 a 100
Humos	10 a 150
Turba Húmeda	5 a 100
Arcilla Plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas de jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Caliza blanda	100 a 300
Caliza compacta	1000 a 5000
Caliza agrietada	500 a 1000
Pizarra	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granito y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granito y gres muy alterados	100 a 600

Fuente: (osinergminorienta.gob.pe)

Tabla Nº 2.3 Valores Medios de Resistividad de Terrenos

Naturaleza Del Terreno	Valor Medio de la Resistividad (Ohm-metro)
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos.	50
Terrenos cultivables poco fértiles, terraplenes en general.	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables.	3000

Fuente: (osinergminorienta.gob.pe)

2.2.17. LA FRECUENCIA DE LA CORRIENTE

Para bajas frecuencias, bajas corrientes y valores de resistividad del suelo no muy elevados, son despreciables los efectos capacitivos y de ionización del suelo y el mismo se comporta prácticamente como una resistencia. También hay que tener en cuenta que para el caso de altas frecuencias, es necesario considerar el efecto capacitivo, principalmente en suelos de altas resistividades. Las ondas tipo rayo sufren la oposición de la reactancia inductiva de las conexiones al penetrar el suelo propiamente dicho.

2.2.18. MÉTODOS DE INSTALACIÓN.

La instalación de los electrodos de tierra debe satisfacer tres condiciones:

- Preparar el terreno adecuadamente para minimizar la resistividad del terreno.
- El material de relleno usado no debe tener un índice de acidez PH que cause corrosión al electrodo.
- Todas las uniones o conexiones bajo tierra deben ser realizadas sólidamente para que no se presente corrosión en la unión o conexión.

Elegir la mejor configuración de electrodos, que garantice una conexión a tierra por mucho tiempo.

2.2.19. MATERIAL DE RELLENO.

2.2.19.1. TIERRA COMPACTADA

La tierra obtenida en la excavación del mismo pozo, puede ser utilizada, previamente cernida, para evitar material como piedras. La tierra no debe contener silicatos, (restos de material de construcción), ácidos corrosivos (arena, polvo de ceniza) su PH entre ácido y alcalino. La arcilla no es un terreno propicio, al ser compactada es impermeable al agua.

2.2.19.2. ADITAMENTOS O ADITIVOS PARA RELLENOS

Para elevar el rendimiento de la toma de tierra o disminuir la resistividad de un terreno, se adicionan componentes químicos, que garantizan un funcionamiento regular de hasta 2 años, obteniendo reducciones en la resistencia del terreno que van de 25% al 80% del valor original sin tratamiento.

Estos componentes que se agregan a la tierra de relleno, son entre los más utilizados:

- Gel
- Cemento conductor
- Bentonita

A. GEL

Son sustancias como el Hexacianoferrato de cobre que luego de realizar la combinación la reacción que toman es la forma de una sustancia gelatinosa, que permite la conservación de la humedad y la disipación de los electrones por ser buenos conductores; cuando se mezcla en el terreno las soluciones acuosas de sus 2 componentes, el compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal o gelatinosa que forma una malla tridimensional de iones positivos y negativos, cuyos espacios vacíos pueden ser atravesados por ciertas moléculas, pero no por otras; esto lo convierte en una membrana semipermeable, que facilita el movimiento de ciertos iones dentro de la malla, de modo que pueden cruzarlo en uno u otro sentido siendo un conductor eléctrico. Tiene propiedades higrométricas o atracción por el agua, de modo que aprisiona moléculas de agua superficial que lo rodea. Esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero. Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo, constituyendo una excelente

conexión eléctrica entre el terreno de cultivo (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente. (Para-rayos.com)

Método de aplicación del THOR-GEL®- El tratamiento consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un Gel mejore la conductividad de la tierra y retenga la humedad en el pozo por un periodo prolongado de manera que se garantice una efectiva reducción de la resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima. La cantidad de dosis por metro cúbico de tierra del SPAT, varía de 1 a 3*, y está en función a la resistividad natural del terreno.

Tabla N° 2.4 Dosificación del Gel

Resistividad (Ω - m)	Dosificación
De 50 a 200	1 dosis x m3
De 200 a 400	2 dosis x m3
De 400 a mas	3 dosis x m3

Fuente: (para-rayos.com)

La saturación en el tratamiento químico se presenta en la tercera dosis por m3 Esta dosificación se aplica igualmente en el tratamiento de las zanjas de interconexión.

Tabla N° 2.5 Porcentaje de Reducción por la Aplicación del Gel

Resistencia inicial en (Ω)	% de reducción	Resistencia final en (Ω)
600	95	30
300	85	45
100	70	30
50	60	20
20	50	10
10	40	6

Fuente: (para-rayos.com)

Figura N° 2.21 Aplicación del Gel



Fuente: (para-rayos.com)

B. CEMENTO CONDUCTIVO

Es un cemento que por su composición de ciertos aditivos que incrementan en gran proporción su conductividad eléctrica. Incrementa el área de contacto del conductor y evita su corrosión creando un sistema libre de mantenimiento. Cuando es rellenada con el Cemento Conductivo absorbe la humedad del suelo circundante y se endurece para convertirse en un conductor sólido, la superficie del electrodo aumenta considerablemente, la resistencia a tierra se reduce sustancialmente y la impedancia también.

Su aplicación en el diseño de puesta a tierra es muy fácil. Los conductores con Cemento Conductivo son instalados en torno a un conductor a lo largo del electrodo. Cuando se fragua el cemento conductivo absorbe la humedad del suelo circundante y se endurece para convertirse en un conductor sólido, la superficie del electrodo aumenta considerablemente, la resistencia a tierra se reduce sustancialmente y la impedancia se reduce significativamente, porque propiedades capacitivas, y mejora su comportamiento de los sistemas de tierras físicas sometidos a condiciones de altas descargas.

Debido a su naturaleza única, el cemento conductivo tiene la habilidad de conducir electricidad en forma mucho más eficiente que el cemento regular porque la conducción ocurre tanto por medios electrolíticos como iónicos las cuales reducen dramáticamente la impedancia. La mezcla produce un efecto capacitivo que almacena y libera energía en la misma forma que un capacitor, hasta que libera dicha energía dentro de un circuito eléctrico. El cemento absorbe rápidamente altas cantidades de energía eléctrica evitando un aumento en el potencial del sistema de puesta a tierras como el caso de una descarga atmosférico.

Un conductor de cobre embebido en cemento soporta mucho más la corrosión que un conductor desnudo. Se probaron dos láminas de cobre desnudo, el primero normal y el segundo con cemento. Ambos conductores fueron probados bajo compresión y condiciones de hidratación por el terreno natural. Los resultados de la prueba demostraron que sin la presencia del cemento conductivo un electrodo se corroe más rápido. El material reduce la corrosión electrolítica en un 86% comparándolo con un conductor desnudo de cobre.

Pruebas basadas con la norma Ontario Regulation 558/00 (similar a la EPA) han demostrado que el Cemento Conductivo es seguro para el medio ambiente. Con este producto se podrá contar con una baja resistencia de puesta a tierra que es esencial para cualquier sistema de protección contra rayos. Pese a que la resistividad del suelo sea elevada, el sistema con cemento conductivo es estable. Por otro lado, no tener que dar mantenimiento periódico lo vuelve económico y seguro para el medio ambiente.

Un buen sistema de electrodos a tierra deberá proporcionar una baja resistencia y permanente resistencia a tierra. (Revistaseguridadadminera.com)

Figura N° 2.22 Cemento Conductivo

Fuente: (para-rayos.com)

C. BENTONITA

Es una arcilla de color pardo de formación natural, levemente alcalina con un pH de 10. Puede absorber casi cinco veces su peso de agua, reteniéndola y de este modo se expande hasta treinta veces su volumen cuando está seco. La bentonita absorbe la humedad del suelo circundante, propiedad que ayuda a estabilizar la impedancia del electrodo a lo largo del año. Tiene baja resistividad (aproximadamente 2-5 Ohm – metro) y no es corrosiva. Se usa más a menudo como material de relleno al enterrar barras profundas. Se compacta fácilmente y se adhiere fuertemente.

Su nombre químico es montmorillonita sódica. (Morales, 1990)

Figura N° 2.23 Bentonita

Fuente: (para-rayos.com)

2.2.19.3. ADITAMENTOS NO RECOMENDADOS

Los aditivos no calificados para rellenos de pozos son el carbón vegetal, la sal corriente, guanos de animales.

Los problemas que ocasionan son en el caso del carbón, contiene impurezas como sulfatos, que producen ácidos al mezclar con agua, al igual es el material orgánico especialmente abono de pollo que contiene silicatos; las sales tienen baja resistividad, sin embargo, estos aditamentos provocan corrosión por electrolisis en el electrodo.

2.2.20. CONFIGURACIÓN DE LOS ELECTRODOS

La disposición de los electrodos, mejora el contacto con el terreno y reduce la resistencia del terreno. Existen diferentes tipos de configuraciones que varían desde la disposición simple vertical hasta otras sofisticadas.

Las configuraciones parten de la jabalina, electrodo o varilla básica utilizada y comercial, que pueden ser:

- Cobre electrolítico puro (diámetro de 14.3 mm o 15.5 mm máximo)
- Acero estirado en frío, con recubrimiento de cobre electrolítico con un diámetro de 14.3 mm o 15.5 mm máximo y recubrimiento de 0.254mm
- Varilla galvanizada de diámetro de 13mm y 25mm máximo con espesor de recubrimiento de 0.07 a 0.08mm.
- Acero inoxidable tipo aleación 304 de diámetro 14.3mm y 15.5mm máximo.

En todos los casos la longitud es de 2.5 m a 3m.

2.2.21. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS DE TIERRA

Para definir el sistema de puesta a tierra, se consideran dos tareas:

- Obtener un valor de impedancia mínima requerida en las normas de seguridad eléctrica, por condiciones de protección.
- Asegurar que los voltajes de paso y de contacto sean satisfactorios.

2.2.21.1. VALOR DE IMPEDANCIA MÍNIMA

Factores que influyen en el valor de la impedancia:

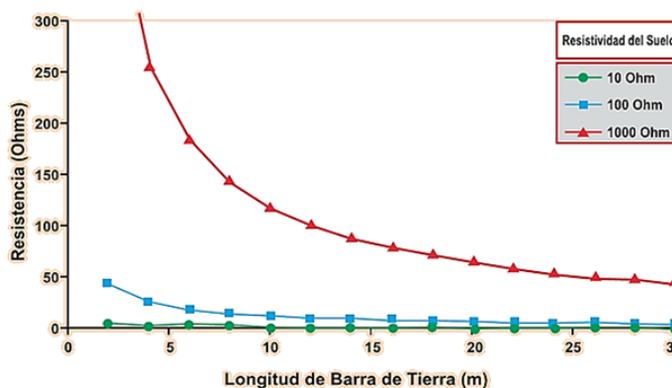
- Las dimensiones físicas, disposición y propiedades del o los electrodos,
- La composición del suelo o resistividad del terreno.
- La conexión de la varilla del pozo de tierra, con la barra distribuidora del sistema de toma de tierra.

2.2.22. EFECTO DE LAS DIMENSIONES FÍSICAS FORMA, TAMAÑO Y POSICIÓN DEL ELECTRODO

2.2.22.1. RELACIÓN LONGITUD VERTICAL – RESISTENCIA DE TIERRA

El incremento de la longitud de un electrodo a partir de los 6m de profundidad en un terreno con resistividad entre 10 y 100 ohm-m no tiene efecto significativo, como se observa en el gráfico.

Figura N° 2.24 Resistencia – Profundidad del electrodo.



Fuente: (Gómez, 2010)

Se muestra también que para resistividades mayores a 1000 ohm-m, demuestra que a mayor profundidad el mejoramiento se obtiene porque a mayor profundidad, las capas de tierra son mejores en conductividad.

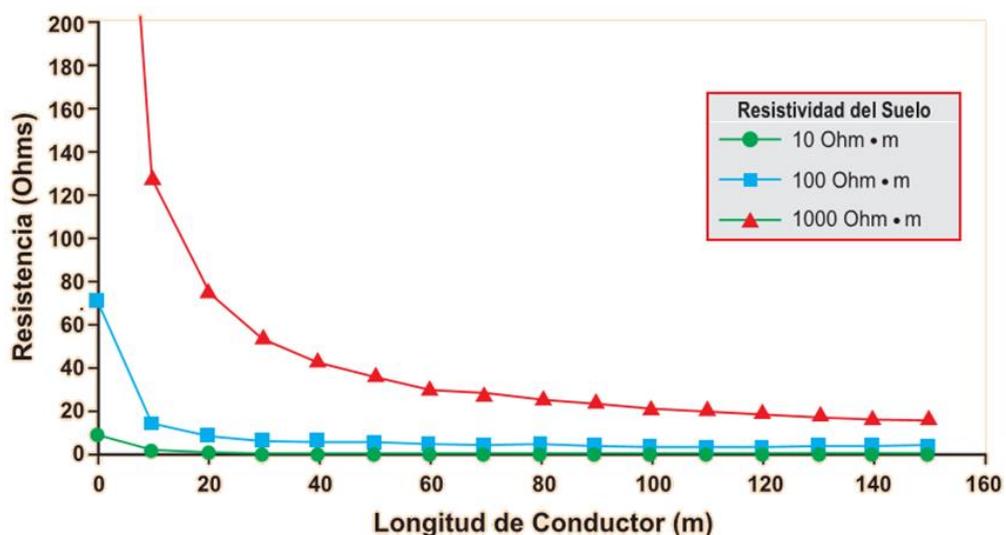
Se observa que las barras verticales al estar más profundas, mejoran la impedancia del sistema de puesta a tierra. Su longitud debe ser de una profundidad razonable, para acercarse a las capas de agua subterránea, o para mantener la humedad y la temperatura del suelo.

2.2.22.2. RELACIÓN LONGITUD HORIZONTAL – RESISTENCIA DE TIERRA

La Figura muestra la relación del incremento de longitud de un electrodo enterrado a 0.6 m de profundidad en forma horizontal y de 25 mm de diámetro.

Para electrodos que no se pueden instalar en forma vertical, la disposición horizontal es conveniente, sin embargo, la longitud del electrodo, en este caso se tiene un conductor de cobre de 25mm de diámetro, debe incrementarse considerablemente, como se observa en el gráfico; es a partir de 20m que la longitud ya no resulta significativa, manteniéndose el valor de la impedancia.

Figura N° 2.25 Resistencia - Longitud del electrodo horizontal

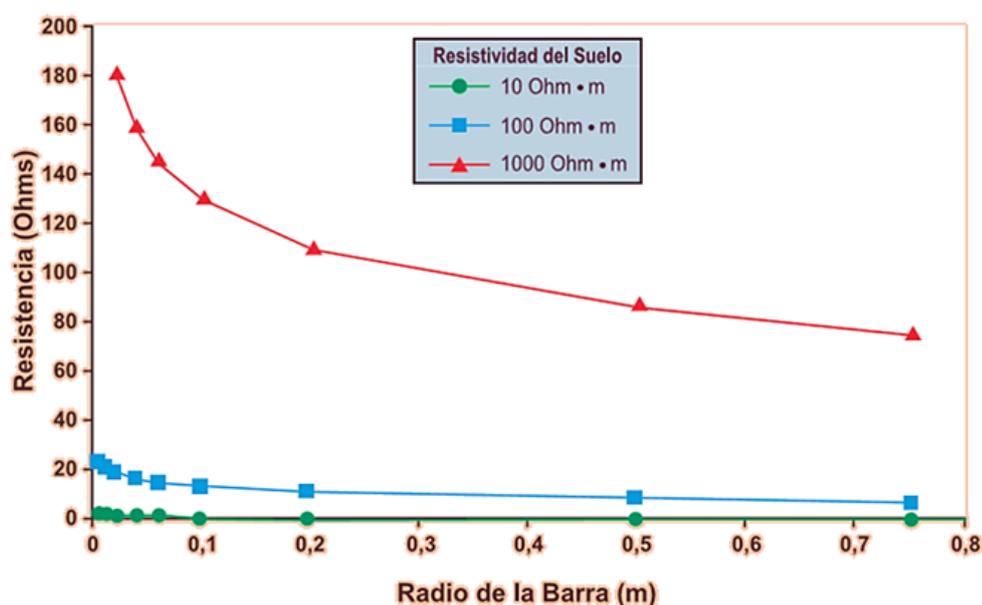


Fuente: (Gómez, 2010)

2.2.22.3. RELACIÓN RADIO DEL ELECTRODO – RESISTENCIA DE TIERRA

Al incrementar el radio del electrodo, (todos los electrodos de prueba tienen una longitud de 0.6m), se nota que hay una rápida reducción en la resistencia hasta un radio de 0.1m o 10cm, y luego no es significativo. Significa que hay poco que ganar aumentando el radio de electrodos.

Figura N° 2.26 Resistencia vs Radio de la Barra



Fuente: (Gómez, 2010)

Nota: En condiciones de suelo de alta resistividad o rocoso es mejor aumentar el diámetro efectivo del electrodo rodeándolo con material de menor resistividad que la roca, como cemento conductor, aditivos como geles.

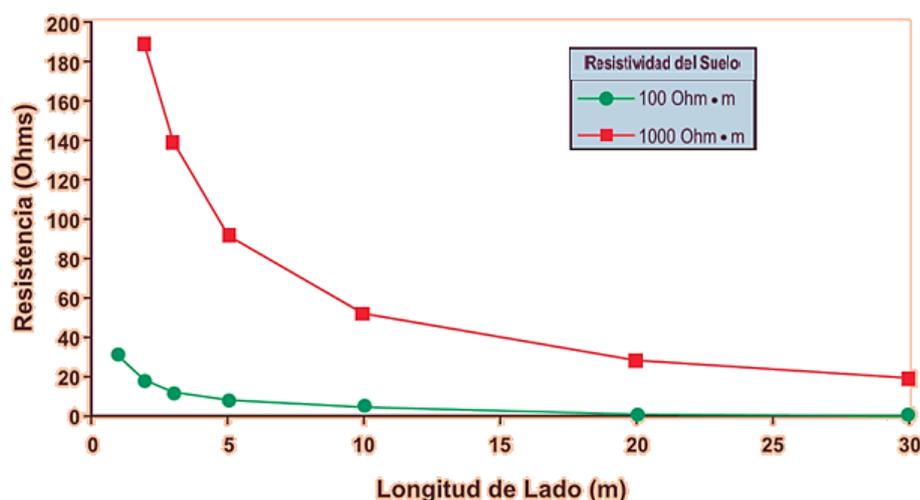
2.2.22.4. RELACIÓN LONGITUD DE MALLA CUADRADA – RESISTENCIA DE TIERRA

Una disposición adecuada para lugares donde no se puede profundizar el pozo de tierra, son las mallas. La malla del gráfico, es de conductor de cobre de 16mm de diámetro, a una profundidad de 0.6m.

Se observa que el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando el área es hasta los 5m de longitud de lado, luego la

disminución no es significativa. En sistemas de estaciones transformadoras, no es aconsejable las mallas de tierra, porque incrementan los potenciales de tensión de paso y de toque; por lo que se recomienda adicionar a la malla de tierra, electrodos con suficiente profundidad que disminuyan los potenciales de riesgo.

Figura N° 2.27 Relación longitud de malla cuadrada – Resistencia de tierra



Fuente: (Gómez, 2010)

2.2.23. DISPOSICIONES O ARREGLOS COMPLEJOS DE ELECTRODOS

En el caso de arreglos más complejos de electrodos y suelos con diferentes capas de resistividad, se requiere un análisis más detallado para definir la estructura del suelo y sus propiedades eléctricas de cada capa que afectarán el valor de resistencia a tierra del electrodo.

Existen formulaciones relativamente directas para lograr una predicción razonablemente precisa de la resistencia de electrodos en suelo de resistividad uniforme. Se destaca que distintos estándares utilizan formulación diferente y a pesar que a menudo estas proporcionan estimaciones de valores similares, esto no significa que se descuide el hecho de asegurar que se usa la formulación y el

modelo correcto, dependiendo de las especificaciones de diseño y del estándar en que se basa

a) Electrodo vertical, la fórmula es:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left(\frac{4l}{d} \right) \right] \quad (2.4)$$

Donde:

R: Resistencia de puesta a tierra (ohm)

ρ : Resistividad equivalente del suelo (ohm-m)

l: longitud de la barra (m)

d: Diámetro de la barra (m)

b) Conductor enterrado horizontalmente, la fórmula es:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left(\frac{4l^2}{dh} \right) - Q \right] \quad (2.5)$$

Donde:

R: Resistencia de puesta a tierra (ohm)

l: Longitud del conductor (m)

d: diámetro del conductor (m)

ρ : Resistividad del suelo (ohm-metro)

h: Profundidad de enterramiento (m)

Q: 1,3 para conductores circulares (de sección)

Q: 1,0 para conductores tipo cinta

Diferentes arreglos o disposiciones de electrodos y la relación de su resistencia.

Figura N° 2.28 Disposiciones de Electrodo y la Relación de su Resistencia

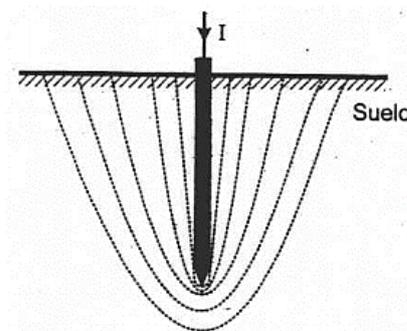
ARREGLO	VISTA PLANTA	FÓRMULA
• Para un electrodo vertical		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
• Para un electrodo horizontal		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{1,85hd} \right)$
• Para dos electrodos de puesta a tierra horizontales en "ELE"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{1,27hd} \right)$
• Para tres electrodos de puesta a tierra horizontales en "YE"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{0,787hd} \right)$
• Para cuatro electrodos de puesta a tierra horizontales en "CRUZ"		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{0,217hd} \right)$
• Para seis electrodos de puesta a tierra		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2 10^3}{9,42hd} \right)$
• Para ocho electrodos de puesta a tierra horizontales		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2 10^4}{2,69hd} \right)$
• Para un anillo cerrado		$R = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{20/A} \right) \right]$

Fuente: (Gómez,2010)

C) Interconexión de electrodos en paralelo

La interconexión de electrodos en paralelo disminuye sensiblemente el valor de la resistencia de aterramiento. El cálculo de la resistencia de electrodos paralelos interconectados no sigue la ley simple del paralelismo de resistencia eléctrica. Esto se debe a las interferencias en las zonas de actuación de las superficies equipotenciales. (kindermann, 2010)

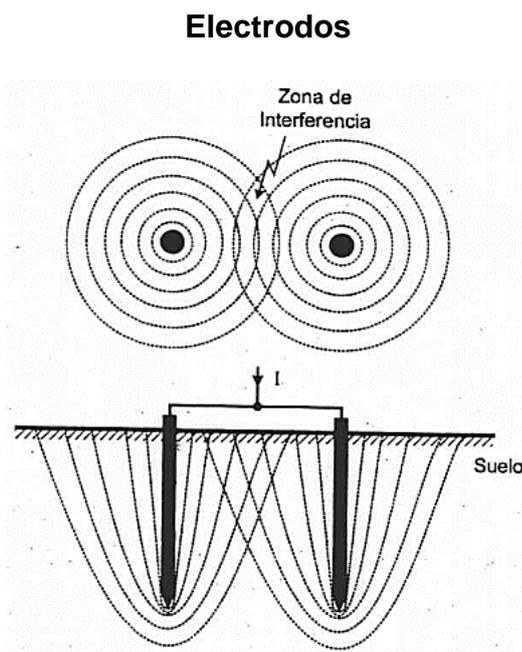
Figura N° 2.29 Superficie Equipotencial de un Electrodo



Fuente: (kindermann, 2010)

En el caso de dos electrodos clavados en el suelo homogéneo, distanciados “a” uno del otro, la siguiente figura muestra las superficies equipotenciales que cada electrodo tendría si el otro no existiese, donde se puede observar también la zona de interferencia.

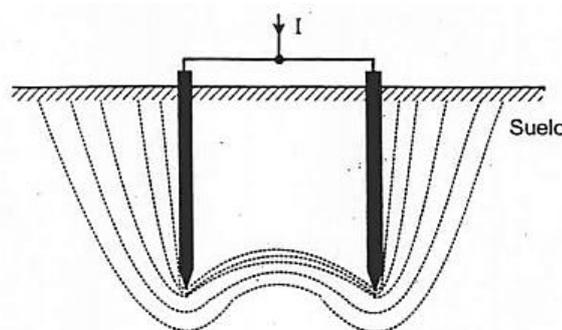
Figura N° 2.30 Zona de Interferencia de las Líneas Equipotenciales de dos



Fuente: (kindermann, 2010)

En la siguiente figura se muestra las líneas equipotenciales resultantes del conjunto formado por los dos electrodos.

Figura N° 2.31 Superficies Equipotenciales de Dos Electrodos



Fuente: (kindermann, 2010)

La zona de interferencia de las líneas equipotenciales causa un área de bloqueo del flujo de corriente de cada electrodo, resultando una mayor resistencia de tierra individual. Como el área de dispersión efectiva de la corriente de cada electrodo se reduce, la resistencia de cada electrodo dentro del conjunto aumenta. Por tanto, la resistencia eléctrica del conjunto de dos electrodos es:

$$\frac{R_{1 \text{ electrodo}}}{2} < R_{2 \text{ electrodos}} < R_{1 \text{ electrodo}}$$

Obsérvese que el aumento del espaciamiento de los electrodos paralelos hace que la interferencia disminuya. Teóricamente, para un espaciamiento infinito, la interferencia sería nula, por eso un aumento muy grande de espaciamiento entre los electrodos no sería económicamente viable. En la práctica, el espaciamiento aconsejable gira en torno a la longitud del electrodo. Se adopta mucho el espaciamiento de 3 metros.

d) Resistencia equivalente de electrodos paralelos

Para el cálculo de la resistencia equivalente de electrodos paralelos, se debe tomar en cuenta el crecimiento de la resistencia ocasionado por la interferencia entre los electrodos. La ecuación 2.6 presenta la resistencia eléctrica que cada electrodo tiene incluida en el conjunto

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm} \quad (2.6)$$

Donde:

R_h : Resistencia presentada por el electrodo "h" incluida en el conjunto considerando las interferencias de los otros electrodos.

n : Número de electrodos en paralelo.

R_{hh} : Resistencia individual de cada electrodo sin la presencia de otros electrodos

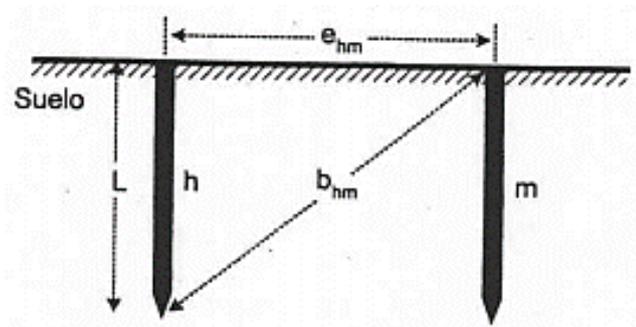
R_{hm} : Crecimiento de la resistencia en el electrodo "h" debido a la interferencia mutua del electrodo "m", dada por la ecuación 2.7.

$$R_{hm} = \frac{\rho a}{4\pi l} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (2.7)$$

e_{hm} : Espaciamiento entre el electrodo "h" y el electrodo "m" (en metros)

L : Longitud del electrodo (m)

Figura N° 2.32 Parámetros de las Mutuas entre los Electrodo "h" y "m"



Fuente: (kindermann, 2010)

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad (2.8)$$

Donde:

e_{hm} : Espaciamiento entre el electrodo "h" y el electrodo "m" (en metros)

L : Longitud del electrodo (m)

En un sistema de aterramiento se emplean electrodos iguales, lo que facilita la estandarización en la empresa, y también el cálculo de la resistencia equivalente del conjunto.

Haciendo el cálculo para todos los electrodos del conjunto se tienen los valores de la resistencia de cada electrodo:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + \dots + R_{1n}$$

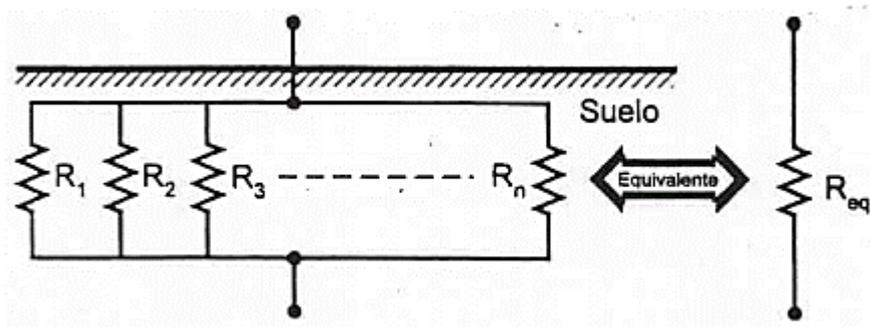
$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + \dots + R_{2n}$$

$$\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots$$

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + \dots + R_{nn}$$

Determinada la resistencia individual de cada electrodo dentro del conjunto, ya considerando los crecimientos ocasionados por las interferencias, la resistencia equivalente de los electrodos interconectados será la resultante del paralelismo de estas.

Figura Nº 2.33 Paralelismo de las Resistencias



Fuente: (kindermann, 2010)

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \tag{2.9}$$

Donde:

R_{eq} : Resistencia equivalente de los electrodos interconectados en paralelo.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \tag{2.10}$$

Donde:

R_{eq} : Resistencia equivalente de los electrodos interconectados en paralelo.

e) Índice de utilización o índice de reducción (K)

Es definido como la relación entre la resistencia equivalente del conjunto (R_{eq}) y la resistencia individual de cada electrodo sin la presencia de los otros electrodos

$$k = \frac{R_{eq}}{R_{1\text{ electrodo}}} \quad (2.11)$$

Donde:

K : Índice de utilización o índice de reducción.

R_{eq} : Resistencia equivalente de los electrodos interconectados en paralelo.

R_1 : Resistencia individual.

Despejando R_{eq} , se tiene:

$$R_{eq} = K \cdot R_{1\text{ electrodo}} \quad (2.12)$$

La ecuación 2.11 indica que la resistencia equivalente (R_{eq}) del conjunto de electrodos en paralelo esta reducida de K veces el valor de la resistencia de un electrodo individual.

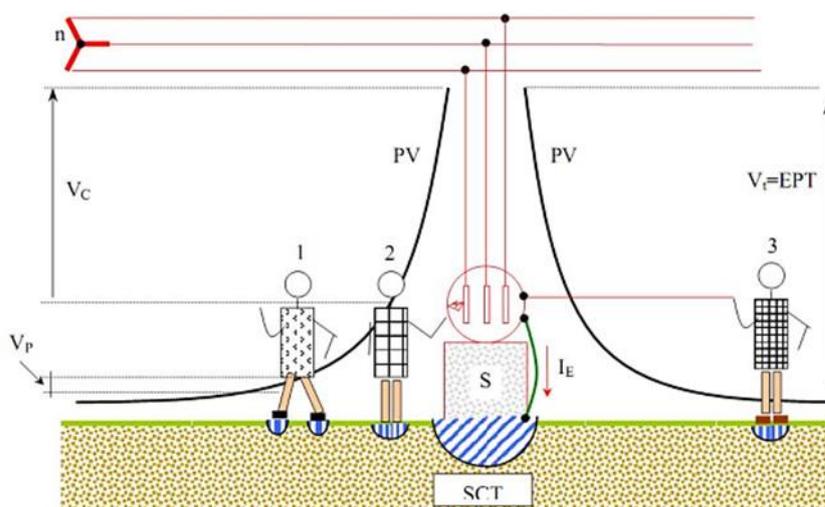
Para facilitar el cálculo de R_{eq} los valores de K son tabulados, u obtenidos a través de curvas.

2.2.24. VOLTAJE DE PASO Y DE CONTACTO

Un electrodo de puesta a tierra de una instalación eléctrica se encuentra al mismo potencial del terreno y ambos igualan el potencial de la tierra remota. Durante una falla, la porción de corriente de falla que fluye por el electrodo desde o hacia el terreno, establece un potencial para éste y una distribución de potencial en el terreno, en particular sobre la superficie. Esta elevación de potencial es proporcional a la magnitud de la corriente disipada a tierra y a la resistencia del electrodo de puesta a tierra.

Figura N° 2.34 Voltaje de Paso, de Contacto y Transferido: V_p , V_c , V_t R

Respectivamente



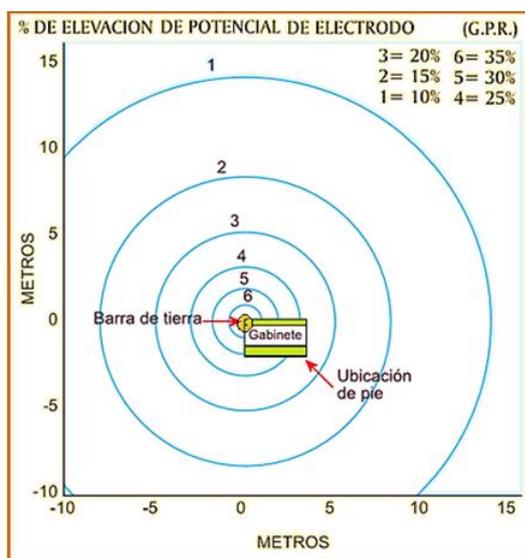
Fuente: (Canales, 2011)

En la figura se tiene un equipo S que presenta una falla tal que hay contacto eléctrico entre una fase y tierra, produciéndose una circulación de corriente I hacia la malla de puesta a tierra SCT, sobre la que se ubican tres personas en distintas posiciones. (Canales, 2011)

Cuatro situaciones básicas implican riesgo para una persona durante una falla. Cada una de estas situaciones define un voltaje aplicado al individuo, según su acción y ubicación relativa a la disposición de los conductores de la puesta a tierra:

2.2.24.1. VOLTAJE DE PASO (STEP VOLTAGE)

La persona 1 de la Figura N° 2.34, soportará una diferencia de potencial V entre sus dos pies, debido a que cada pie está en contacto con puntos a diferentes potenciales en la superficie del terreno.

Figura N° 2.35 Voltaje de Paso

Fuente: (Morales, 1999).

2.2.24.2. VOLTAJE DE CONTACTO (TOUCH VOLTAGE)

La persona 2 de la Figura N° 2.34 soportará una diferencia de potencial V_p entre la mano o parte del cuerpo que toca el equipo y sus pies, debido a que el equipo está a diferente potencial del punto de contacto de los pies con el terreno.

2.2.24.3. VOLTAJE TRANSFERIDO (TRANSFERRED VOLTAGE)

Esta es una forma particular del voltaje de contacto, agravado por el hecho de que la persona está en un punto distante del SCT (Sistema de Conexión a Tierra), y no en sus inmediaciones como en los casos anteriores. La diferencia de potencial a que está sometida la persona 3 de la Figura N° 2.34 es mayor que la de los casos anteriores. En el caso extremo de una persona ubicada en un punto remoto, la diferencia de potencial a la cual estará sometida será la denominada Elevación del Potencial de Tierra (EPT), conocida por sus siglas en idioma inglés

GPR (Ground Potential Rise). El potencial EPT de un SCT es el potencial que adquiere respecto a un punto remoto, cuando circula por él una corriente de determinado valor hacia el terreno.

2.2.24.4. VOLTAJE DE RETÍCULO (MESH VOLTAGE)

Corresponde a la situación extrema de voltaje de contacto dentro del perímetro de la malla y recibe tal denominación por el hecho de encontrarse habitualmente cerca del centro de un retículo de la malla de puesta a tierra.

Corresponde a un caso especial de voltaje de contacto, con el riesgo de que la persona quede sometida prácticamente al potencial máximo que adquiere la malla con respecto a la tierra remota, si existe conexión eléctrica entre la malla y el conductor.

Es importante evitar la conexión eléctrica de una malla de tierra con cualquier conductor que se extienda fuera del perímetro de la malla o bien evitar que una persona en un lugar remoto haga contacto directo con este conductor; no obstante, potenciales de menor magnitud pueden transferirse por elementos conductores como cañerías de agua, vías férreas u otros que pasen cerca de la malla. Deberán usarse uniones o recubrimientos aislantes en este segundo caso.

En atención al comportamiento del cuerpo humano frente al paso de corriente y a los efectos que ésta produce, todo proyecto de puesta a tierra debe incluir un estudio de la magnitud de los voltajes de paso, contacto y eventualmente transferidos fuera de la instalación.

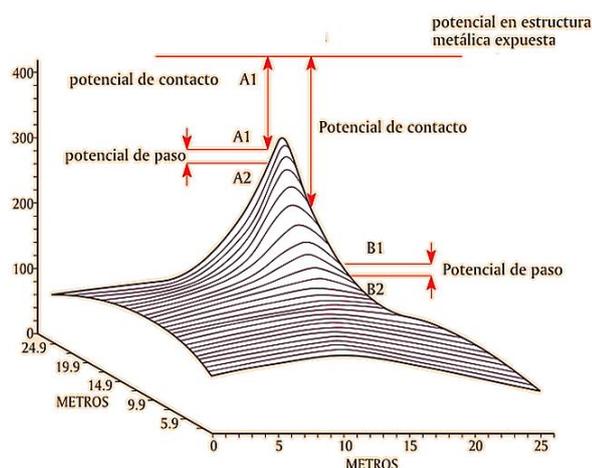
2.2.24.5. PRECAUCIONES

En la figura N° 2.36 se muestra las gradientes de los potenciales respecto a la superficie del suelo, que se genera alrededor de la barra de toma de tierra.

Si una persona está pisando entre dos líneas de gradiente, cerca al electrodo es más riesgoso, por ejemplo, en la posición A1, sería la diferencia de potencial entre los puntos A1 y A2 y se reduciría rápidamente con cada paso sucesivo (por ejemplo, es menor en la posición B1, con la diferencia de potencial entre los

puntos B1 y B2) hasta anularse a alguna distancia mayor. Este efecto es reconocido en las normas y es la base del concepto de “potencial de paso”, que es la diferencia de potencial entre dos puntos sobre la superficie del suelo, separados un metro.

Figura N° 2.36 Potenciales de Contacto, de Paso y Transferidos en Torno a una Barra de Tierra X



Fuente: (Morales, 1999).

2.2.24.6. VOLTAJES DE SEGURIDAD PARA LAS PERSONAS

El Estándar N° 80 de IEEE define en función de la resistencia del cuerpo humano y la máxima corriente tolerable, la máxima diferencia de potencial a que puede ser sometido el cuerpo humano, en base a los posibles puntos de contacto. (Guide IEEE, 2000)

Diversas publicaciones relacionadas, sugieren valores típicos entre 500 Ω y 3000 Ω para la impedancia total del cuerpo humano entre extremidades. Un valor de 1000 Ω es recomendado por la Estándar N° 80 del IEEE en su última versión. Normalmente se asume este último valor, a pesar de que el reglamento chileno sobre instalaciones en baja tensión considera 2000 Ω (Guide IEEE, 2000).

El mecanismo de muerte por descarga eléctrica más común es la fibrilación ventricular que consiste en la contracción desfasada de las fibras musculares

que forman los ventrículos, lo cual impide al corazón expulsar la sangre. Los efectos de corrientes inferiores no son permanentes y desaparecen al interrumpirse ésta, o en los casos de mayor gravedad, los individuos responden a las técnicas de respiración artificial o resucitación.

Dalziel estableció mediante experimentos realizados en animales de peso comparable al del hombre, por tiempos entre 0,03 y 3 segundos de duración, que el valor efectivo de la máxima corriente tolerable que no produce fibrilación ventricular, es función de la energía absorbida por el cuerpo y responde a la ecuación:

$$I_h = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (2.13)$$

Donde:

I_h : Máxima corriente tolerable.

K : constante empírica

t : Tiempo de exposición en la descarga

Donde K es una constante empírica relacionada con la energía absorbida en la descarga por el X% de una población. En experimentos a frecuencia industrial, se determinó que para $X = 99,5\%$, la constante K valía 0,116 para individuos de 50 kg y 0,157 para individuos de 70 kg. El valor de t corresponde al tiempo de exposición en la descarga.

Ocupando la máxima corriente tolerable para un individuo de 50 kg y sustituyendo en las expresiones de voltaje, se obtiene respectivamente los siguientes límites (Morales, 1999).

Máximo voltaje de paso permisible:

$$V_c = \frac{116 + 0.174 * c_s * \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.14)$$

Donde:

Vc: Máximo voltaje de contacto permisible:

ρ_s (Ω -m): resistividad de la capa superficial.

t (s): tiempo global de exposición.

Cs: factor de corrección debido a la presencia de la capa resistiva superficial.

$$c_c = 1 - \frac{0.09 * (1 - \rho / \rho_s)}{2 * h_s + 0.09} \quad (2.15)$$

Donde:

hs (m): corresponde al grosor de la capa resistiva superficial.

ρ_s (Ω -m): resistividad de la capa superficial.

2.2.25. EFECTOS DE LA CORRIENTE POR EL CUERPO HUMANO

La corriente eléctrica al hacer contacto con el cuerpo humano provoca efectos leves y graves, según la duración y lugar de contacto y depende de los siguientes factores:

- Intensidad de la corriente eléctrica.
- Tiempo de contacto o de paso de la corriente.
- Tensión o diferencia de potencial.
- Frecuencia (Hz) de la corriente.
- Trayectoria o recorrido de la corriente a través del cuerpo.

2.2.25.1. INTENSIDAD DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Para una persona con un peso promedio de 50 kg, y puntos de contacto de entrada y salida de la corriente son dos extremidades, se indican en la Tabla 2.6

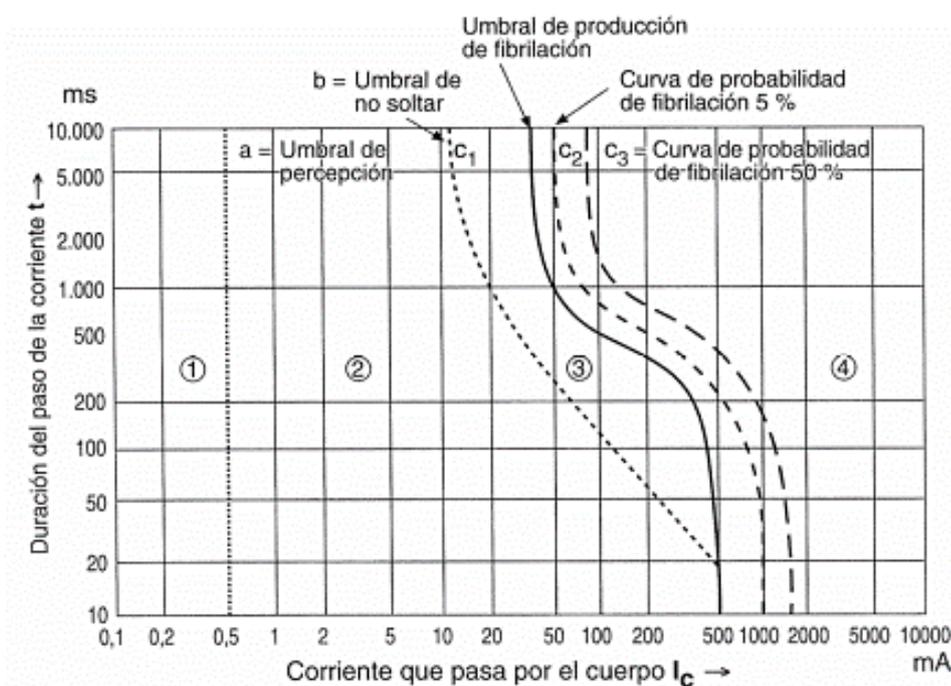
Tabla N° 2.6 Intensidad de Corriente y Efectos en el Cuerpo para una Frecuencia de 50/60 Hz

Intensidad (mA)	Efectos fisiológicos
0,4 - 1,2	Umbral de percepción: detección de leve sensación de cosquilleo.
1,2 - 6	Corrientes de reacción: sensibles pero Inhabilitan el control muscular.
6-9	Umbral de contracciones musculares Involuntarias y calambres.
9 – 25	Incapacidad para desligarse; dificultad para respirar; aumento de la presión arterial; contracciones musculares violentas.
26 – 50	Paralización de la respiración; fuerte tetanización; quemaduras.
51 – 100	Umbral de fibrilación ventricular y arritmias cardiacas.
sobre 100	Cesa circulación sanguínea; hidrólisis de a sangre.
1000	Fibrilación y paro cardiaco; quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte.

Fuente: (Canales, 2011)

La norma IEC-60479/2005 describe los efectos de la corriente eléctrica que pasa por el cuerpo humano para corrientes alternas de frecuencia comprendida entre 15 Hz y 100 Hz y establece cuatro zonas delimitadas por las curvas de la Figura N° 2.37:

Figura N° 2.37 Curvas de Seguridad (I vs t) con Trayectoria Mano Izquierda-Pies



Fuente: (Canales, 2011)

2.2.25.1.1. UMBRAL DE PERCEPCIÓN

Se define como el valor mínimo de la intensidad de corriente que provoca una sensación en una persona. Esta sensación es percibida en corriente alterna en todo momento, mientras que en continua, la percepción se tiene sólo cuando varía la intensidad. La norma IEC-60479/2005 considera un umbral de percepción de 0,5 mA en corriente alterna y 2 mA en corriente continua.

Considerando intensidades y tiempo de contacto iguales, la corriente continua tiene menores efectos que la alterna.

2.2.25.1.2. UMBRAL DE REACCIÓN

Valor mínimo de la corriente que provoca una contracción muscular.

2.2.25.1.3. UMBRAL DE NO SOLTAR

Valor máximo de la corriente que permite a una persona mantener control muscular y soltar unos electrodos. Este umbral depende del tiempo de exposición. En corriente alterna este umbral es 10 mA independiente del tiempo de exposición y en corriente continua es 25 mA. El efecto térmico provocado por la corriente está presente durante todo el periodo de exposición.

2.2.25.1.4. UMBRAL DE FIBRILACIÓN VENTRICULAR

Menor valor de la corriente que puede ocasionar la fibrilación ventricular, causa principal de la muerte por choque eléctrico. En la Figura N° 2.37 se muestra para corriente alterna este umbral y la influencia sobre el mismo del tiempo de exposición. Cabe destacar que el umbral de fibrilación para corriente continua es notablemente mayor que para corriente alterna.

2.2.25.2. TIEMPO DE CONTACTO

El tiempo o duración del contacto eléctrico es junto con la intensidad uno de los factores de mayor influencia en el tipo y magnitud de las lesiones que puede producir la electricidad.

En la Figura N° 2.37 se distinguen un conjunto de curvas que definen cuatro zonas de riesgo de la corriente eléctrica en función de la intensidad y el tiempo de exposición. En dicha Figura se aprecia la importancia del tiempo de exposición. Por ejemplo, los efectos del paso de una corriente de 200 mA por 50 ms son los mismos que los de una corriente de 20 mA durante 1 s.

2.2.25.3. INFLUENCIA DE LA TENSIÓN E IMPEDANCIA DEL CUERPO HUMANO

Según la ley de Ohm, la intensidad de la corriente es proporcional a la tensión, pero también lo es en forma inversa a la impedancia o resistencia del cuerpo humano. Esta última depende de diversos factores, estos son:

- a) Tensión de contacto.
- b) Condiciones de contacto: presión y área de contacto.
- c) Condiciones fisiológicas y estado, dureza y espesor de la piel.
- d) Recorrido de la corriente por el organismo y estado fisiológico del mismo.

Los tejidos de la piel pueden compararse con un dieléctrico formado por la dermis y epidermis, formando un sistema capacitivo similar a un condensador.

La impedancia del cuerpo humano está muy influenciada por las condiciones de humedad de la piel, como también la superficie de contacto con el electrodo o parte activa bajo tensión. El área de contacto tiene una notable influencia, ya que por ejemplo un contacto puntual de unos 100 mm (dedo), presenta una

impedancia del orden de 50 veces menor que para un contacto de unos 8.000 mm (correspondiente a la superficie de toda una mano).

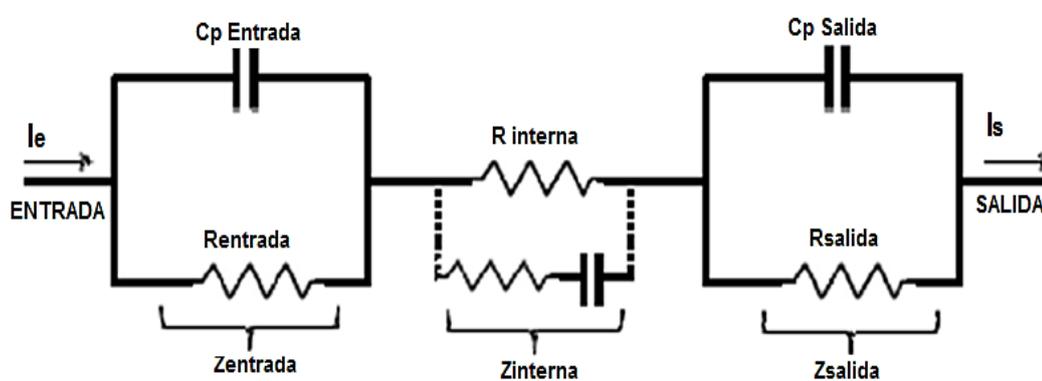
2.2.25.4. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA

La frecuencia del suministro eléctrico es de 60 Hz y otros usos que utilizan otras frecuencias, tales como: electrónica militar y aeronáutica (400 Hz), electrosoldadura (450 Hz), y electroterapia (4000 Hz).

En la impedancia del cuerpo humano participa la tensión de contacto y la frecuencia. La impedancia tiende a disminuir si aumenta la frecuencia, hecho que puede explicarse según el siguiente modelo de IEC-60479/2005.

La impedancia total que presenta el cuerpo humano al paso de la corriente se compone de tres impedancias en serie, según se muestra en la Figura N° 2.38.

Figura N° 2.38 Modelo de la Impedancia del Cuerpo Humano



Fuente: (canales, 2011)

Donde:

Z_e : Impedancia de la piel correspondiente al punto de entrada de la corriente.

Z_i : Impedancia interna del propio cuerpo.

Z_s : Impedancia de la piel correspondiente al punto de salida de la corriente.

Las impedancias de los puntos de entrada y salida del cuerpo humano (piel) se componen de una parte resistiva y otra capacitiva, mientras que la impedancia interna del cuerpo humano es prácticamente resistiva que depende de la

trayectoria de corriente y del punto de contacto, en que su mínimo valor puede considerarse de 500 Ω . Debido a la causa expuesta, la impedancia de la piel está fuertemente influida por el estado de la misma, la que más contribuye a la impedancia total del cuerpo humano. El carácter resistivo es debido a los poros de la piel, mientras que el capacitivo a la membrana semiconductor. La impedancia total de la piel viene dada por la impedancia equivalente de un circuito paralelo R-C, según la expresión:

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + (R * C * \omega)^2}} \quad (2.16)$$

Donde:

Z: Impedancia.

R: Resistencia.

C: Capacitancia.

ω : Frecuencia.

En consecuencia, tal como puede deducirse de la ecuación la impedancia de la piel disminuye con la frecuencia (f), de tal forma que, para altas frecuencias, prácticamente es despreciable, quedando como impedancia total del cuerpo, únicamente la interna del mismo (alrededor de unos 500 Ω).

El riesgo de fibrilación es menor para frecuencias muy altas ya que a partir de unos 100 kHz los efectos peliculares son apreciables. Para estas frecuencias no se conocen umbrales de no soltar ni de fibrilación cardiaca y sólo se aprecian efectos térmicos (quemaduras) si la tensión de contacto es lo suficientemente elevada como para que pase una intensidad importante por el individuo.

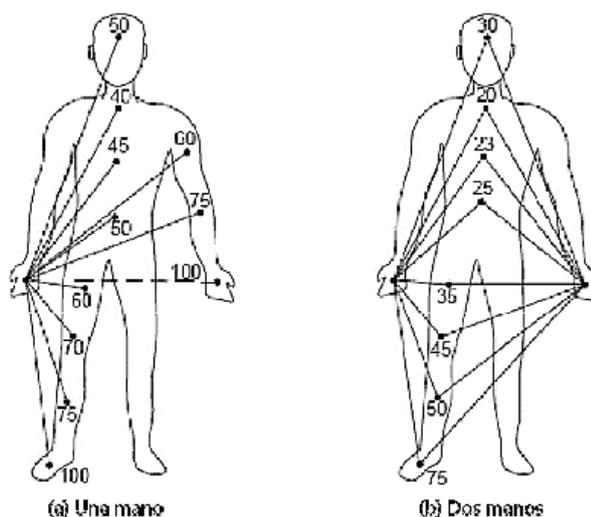
2.2.25.5. INFLUENCIA DEL RECORRIDO DE LA CORRIENTE

La gravedad de un accidente depende de la trayectoria recorrida por la corriente eléctrica a través del cuerpo humano. Generalmente, el recorrido de la

corriente sigue la trayectoria que presenta menor impedancia. Los trayectos en que se ven involucrados órganos vitales (cerebro, corazón, pulmones, etc.) presentan un mayor riesgo, por lo que los efectos de los recorridos que pasan por la cabeza y el tronco son potencialmente los de mayor gravedad.

Otros factores que pueden agravar los efectos de la corriente corresponden al sexo, a la edad o bien al estado del organismo (cansancio, miedo, ingesta de alcohol, etc.).

Figura Nº 2.39 Valores Porcentuales Relativos de la Impedancia del Cuerpo Humano Para Diferentes trayectorias



Fuente: (canales, 2011)

En la Figura Nº 2.39 se indican los porcentajes del valor de la impedancia entre una mano y diferentes partes del cuerpo (Figura a), y entre dos manos y distintas partes del cuerpo (Figura b) respecto a la impedancia correspondiente a la trayectoria mano-mano. Por ejemplo, una trayectoria mano-cabeza con un índice 30, tendrá una impedancia de tan sólo un 30% de la impedancia que corresponde a una trayectoria mano-mano.

Las curvas que indican los efectos sobre el organismo de la intensidad de corriente y el tiempo de contacto y que se muestran en la Figura, están trazadas

para el recorrido "mano izquierda - dos pies". Si la trayectoria es diferente, la intensidad (I) que produce un riesgo equivalente se determina a través de un factor F, llamado factor de corriente de corazón, que incorpora la variabilidad de la impedancia del cuerpo según el recorrido de la corriente. Para el cálculo de la intensidad equivalente se usa la siguiente expresión:

$$I_{eq} = \frac{I_{ref}}{F} \tag{2.17}$$

Donde:

I_{eq} : intensidad correspondiente al trayecto mano izquierda - dos pies.

F: factor de corriente de corazón (ver Tabla).

2.2.25.6. Trayectoria de la corriente (entra-salida) Factor de corriente de corazón (F)

Tabla Nº 2.7 Factor de Corriente de Corazón para Distintas Trayectorias

Trayectoria de la corriente (entra-salida)		Factor de corriente de corazón (F)
Mano izquierda - pecho		1,5
Mano derecha - pecho		1,3
Mano izquierda - pie derecho	Mano izquierda - dos pies	1
Mano izquierda - pie izquierdo	Dos manos - dos pies	
Mano derecha - pie izquierdo	Mano derecha - dos pies	0,8
Mano derecha - pie derecho		
Mano izquierda - nalgas	Mano izquierda - espalda	0,7
Mano derecha - nalgas	Dos manos - nalgas	
Mano - mano		0,4
Mano derecha - espalda		0,3

Fuente: (canales, 2011)

2.2.25.7. INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO

Se puede indicar que este efecto proporciona sólo una reducción marginal en la impedancia, pero a un costo relativamente alto, de modo que normalmente no es considerado. Debe recordarse sin embargo, que mientras mayor sea la profundidad de enterramiento, menores son los gradientes de voltaje en la

superficie del suelo. En el interior de una subestación, se requiere un voltaje alto sobre la posición del electrodo, para minimizar los voltajes de contacto. Sin embargo, si un electrodo de tierra se extiende fuera de la subestación, entonces se requiere un voltaje bajo en la superficie del suelo para reducir los potenciales de paso. En algunos casos es ventajoso incrementar la profundidad de los electrodos para reducir el riesgo de electrocución. En el caso de barras, esto puede obtenerse instalando una envoltura plástica alrededor de uno o dos metros en el extremo superior de cada barra.

2.2.26. DISEÑO PARA LA CONEXIÓN A TIERRA

2.2.26.1. NORMATIVA PARA EL DISEÑO

El diseño del sistema de tierra, se deberá usar las fórmulas y técnicas descritas en las normas o reglamentos para lograr un diseño que tenga potenciales de contacto inferiores a los límites aplicables.

Principales normas y reglamentos del diseño de puestas a tierra.

- IEEE Practice for Grounding of Industrial Power Systems, IEEE Green book, Std. 141-1993.
- ANSI/IEEE Std. 80: 1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- ANSI/IEEE Std. 81: 1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, Standard 42-1991 ANSI C114.1-1973 / IEEE Standard 142-1972

Las normas IEEE incluyen formulaciones para los cálculos en la alimentación de energía industrial y comercial, donde se diferencian por los límites de voltaje

de choque eléctrico donde en lo comercial son menores que las de subestaciones de instalaciones eléctricas de las empresas eléctricas.

2.2.27. DISEÑO DE SISTEMAS DE TOMA DE TIERRA.

El potencial de tensión en la superficie del suelo difiere según la posición con respecto al sistema de electrodos genera dos peligros latentes para las personas cercanas a la toma de tierra la tensión de paso y la tensión de contacto, por la corriente de falla que fluye por la impedancia del conjunto.

Si se tiene elementos metálicos cercanos, el potencial de contacto está latente, mientras la corriente de falla fluya a través de la impedancia del sistema de puesta a tierra, así como todos los metales expuestos conectados a éste experimentan un alza de voltaje, lo que hace que los elementos que conectan a una toma de tierra de pararrayos sean aislados, y la profundidad del electrodo sea lo suficiente profunda para minimizar riesgos.

Estos factores se toman en consideración en las normas, en base a casos típicos como para una resistividad de 100 ohm-metro del suelo superficial, una impedancia de 1000 ohms para el ser humano, 4000 ohms de impedancia para el calzado y una resistencia de contacto de 300 ohms puede tolerar un voltaje relativamente alto por cortos períodos de tiempo.

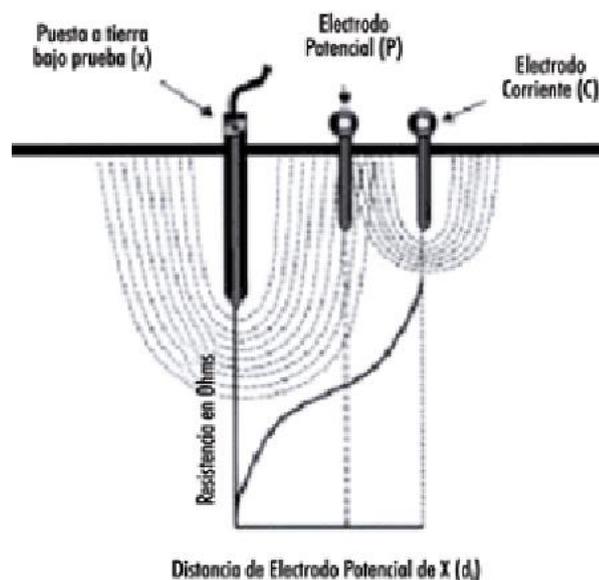
Si bien las corrientes de falla de los sistemas eléctricos de media y alta tensión, son más altas y peligrosas, que las de baja tensión, en cuanto a los voltajes de paso y contacto, los criterios de diseño son los mismos, porque el comportamiento de los electrodos es igual, diferenciándolo del nivel de resistencia que se obtenga. Mientras que, en instalaciones de media tensión, tenemos permisibilidad de resistencias de hasta 25 ohmios, en sistemas de conexión de equipos electrónicos, se requiere de 0 a 5 ohmios.

2.2.28. DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA EDIFICIOS

Al efectuar el diseño debe asegurarse que la impedancia del conductor de protección esté coordinada con las características del equipo de protección de modo que, durante una falla a tierra, cualquier voltaje sobre el equipo expuesto que pueda ser tocado simultáneamente sea de magnitud y duración tal que no produzca peligro. La elevación de voltaje en un área durante una falla tiene que limitarse a un valor establecido en las normas y este valor se determina colocando un valor mínimo de impedancia del bucle de tierra. Es esencial que los conductores de protección de cobre usados tengan un área transversal suficientemente grande.

2.2.29. MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA DEL ELECTRODO DE TIERRA

Figura N° 2.40 Impedancia del Electrodo de Tierra



Fuente: (Aguilar, 2010)

La medición del valor óhmico de un electrodo enterrado se realiza por dos razones:

- Revisar su valor, posteriormente a la instalación y previo a la conexión del equipo, con las especificaciones de diseño.

- Como parte del mantenimiento de rutina, para confirmar que su valor no ha aumentado sustancialmente respecto del valor medido originalmente o de su valor de diseño.

El método más común para medir el valor de resistencia a tierra de electrodos de pequeño o mediano tamaño, se conoce como el método de “caída de potencial”.

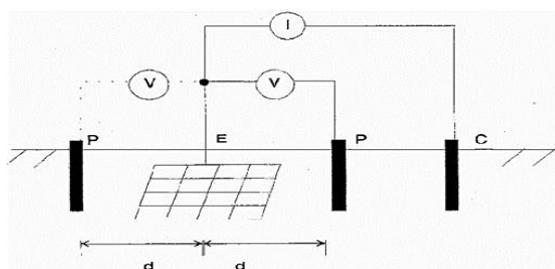
2.2.29.1. EQUIPO NECESARIO

Para la medición se recurre a un instrumento probador de resistencia a tierra (telurómetro) de tres terminales. Puede ser el mismo instrumento usado para medida de la resistividad de cuatro terminales. El instrumento incluye una fuente, amplificador de potencia, una fuente de frecuencia variable y un fusible de 100 mA. Un terminal de potencial P1, un terminal C1 y un terminal X para el electrodo de prueba.

2.2.29.2. MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL PARA MEDIR LA RPT

La resistencia de puesta a tierra debe ser medida antes de la puesta en funcionamiento de un sistema eléctrico, para su medición se debe aplicar el método de Caída de Potencial, cuya disposición de montaje para medición se muestra en la Figura N° 2.41.

Figura N° 2.41 Método de la Caída de Potencial para medir la Resistencia de Puesta a Tierra (RPT).



Fuente: (Aguilar, 2010)

Este método para medir la Resistencia de Puesta a Tierra (RPT) consiste en pasar una corriente entre el electrodo o sistema de puesta a tierra a medir y un electrodo de corriente auxiliar (C) y medir el voltaje con la ayuda de un electrodo auxiliar (P) ilustrado en la figura N° 2.41. Para poder minimizar la influencia entre electrodos, el electrodo de corriente, se coloca generalmente a una sustancial distancia del sistema de puesta a tierra, esta distancia debe ser cinco veces superior a la dimensión más grande del sistema de puesta a tierra bajo estudio.

El electrodo de voltaje debe ser colocado en la misma dirección del electrodo de corriente, pero también puede ser colocado en la dirección opuesta como se ve en la Figura N° 2.41. Cuando se realice la práctica, la distancia "d" para el electrodo de voltaje se elige al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta mencionada distancia está basada en la posición teóricamente correcta para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo en donde su resistividad sea homogénea.

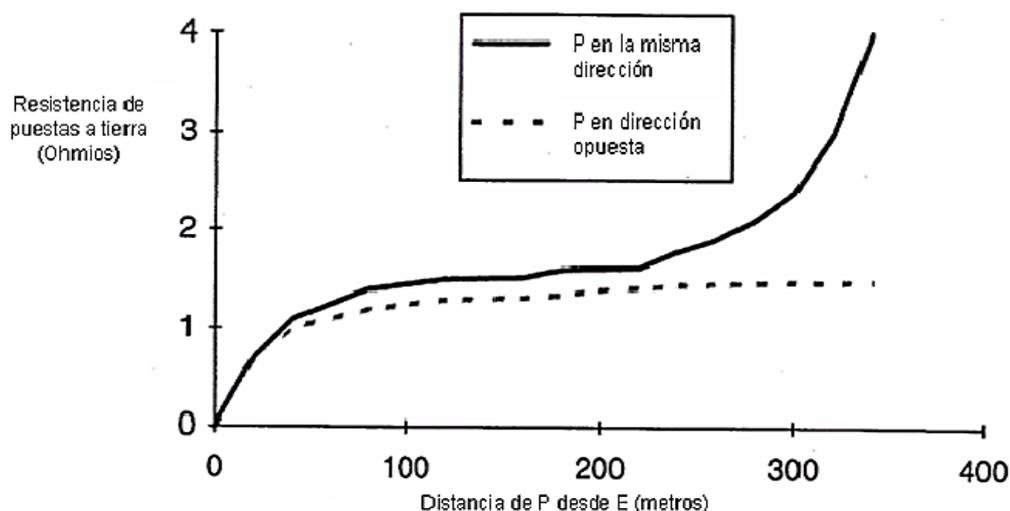
El encontrar la localización del electrodo de voltaje, es muy crítico para medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra. Esta localización debe estar libre de cualquier influencia del sistema de puesta tierra bajo medida y del electrodo auxiliar de corriente. La manera más clara y práctica de determinar si el electrodo de voltaje esta fuera de la zona de influencia de los electrodos es obtener varias lecturas de resistencias moviendo el electrodo de voltaje en varios puntos entre el sistema de puesta a tierra y el electrodo de corriente.

Dos o tres lecturas constantes y consecutivas pueden asumirse como representativas del valor de resistencia verdadera.

Ahora se puede observar mediante la figura N° 2.42 una gráfica de resistencia contra distancia del electrodo de voltaje (P). La curva muestra como la

resistencia es cercana a cero cuando (P) se acerca al sistema de puesta a tierra y se aproxima al infinito hacia la localización del electrodo de corriente (C). El punto de inflexión en la curva corresponderá a la resistencia de puesta a tierra del sistema bajo estudio. (Aguilar, 2010)

Figura N° 2.42 Resistencia de Puesta a Tierra Versus Distancia de (P).

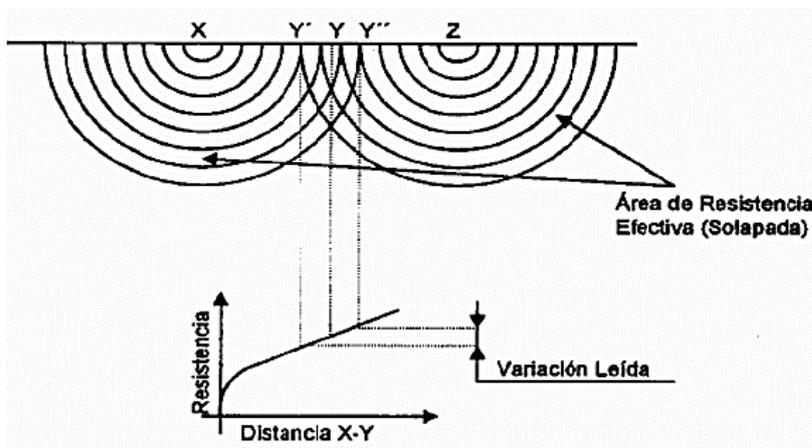


Fuente: (Aguilar, 2010)

2.2.29.3. GRADIENTES DE POTENCIAL.

El método de Caída de Potencial para la medición de la RPT, es el producto de la inyección de corriente por tierra a través del electrodo de corriente. Por ello, si el electrodo de corriente, el de potencial y el sistema de puesta a tierra se encuentran muy cercanos entre sí, va a existir un solapamiento de los gradientes de potencial generados por cada electrodo, resultando una curva en la cual el valor de resistencia medida se incrementará con respecto a la distancia, se puede observar en la figura N° 2.43.

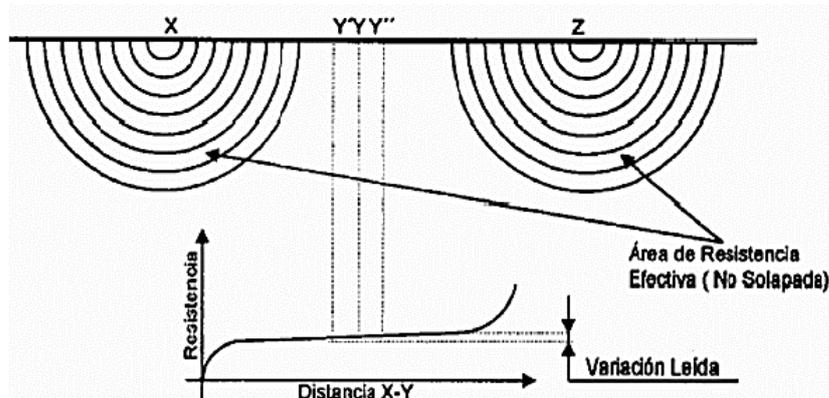
Figura N° 2.43 Solapamiento de los gradientes de potencial



Fuente: (Aguilar, 2010)

Al ubicarse el electrodo a una distancia lo suficientemente lejos del sistema de puesta a tierra a medir, la variación de posición del electrodo de potencial, desde la puesta a tierra hasta el electrodo de corriente, no producirá solapamiento entre los gradientes de cada electrodo, originándose entonces una curva como la mostrada en la figura N° 2.44.

Figura N° 2.44 Curva de Resistencia Versus Distancia sin Solapamiento de Gradientes de Potencial



Fuente: (Aguilar, 2010)

Entonces en la figura N° 2.44 puede observarse como existe una porción de la curva que permanece casi invariable, la cual será más prolongada o más corta esto se dará dependiendo de la separación de los electrodos de corriente (Z) y bajo prueba (X)

La valoración de resistencia asociada a este sector de la curva, será el correcto valor de resistencia de puesta a tierra del estudio. (Aguilar, 2010)

2.2.29.4. MEDIDA DE SISTEMAS DE ELECTRODOS DE GRAN ÁREA

El método de la caída de potencial puede usarse en sistemas de electrodos más grandes, pero se sugiere que el electrodo de corriente se ubique a una distancia entre 6 y 10 veces la distancia diagonal del sistema de electrodos. Esto normalmente no es práctico, de modo que se han desarrollado varias alternativas al método de caída de potencial. Estas incluyen el método de pendiente (donde se calcula el gradiente entre puntos de medida adyacentes) y el método de intersección de curvas.

En otra variación de la prueba, la pica de voltaje se desplaza en ángulo recto con respecto a la dirección malla-pica de corriente. La distancia de la pica de voltaje a la malla se aumenta progresivamente hasta que el valor medido apenas cambie. Este valor debe estar entonces justo bajo el valor de impedancia real de la malla.

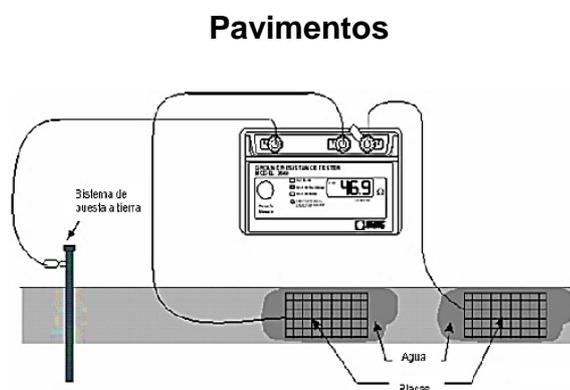
Si existen cables o tuberías metálicas enterradas en la misma dirección que las rutas de los cables de prueba, producirán siempre una lectura incorrecta del valor de impedancia a tierra. Cuando la malla de tierra es muy grande o tiene conexiones radiales largas, por ejemplo, hacia pantallas de cables o cable de guardia de líneas de transmisión áreas, el tamaño efectivo resultante de la malla de tierra es tan grande que la medida tradicional por caída de potencial es

impracticable. Aún se puede conseguir algunas veces una estimación mediante una serie de medidas de campo, respaldadas por simulación computacional. Otro método llamado de inyección de alta corriente, hace circular varios cientos de amperes entre la malla y un sistema de electrodos de corriente alejado, usando un circuito de potencia. Se mide la elevación de potencial real con referencia al electrodo remoto y puede calcularse la impedancia del electrodo. Sin embargo, este método es caro y puede aún estar sujeto a errores. Un error común es no considerar para el cálculo de la impedancia, la impedancia de los circuitos metálicos que interconectan los dos sistemas empleados (interconexión de bajo voltaje, circuitos de comunicación, etc. (Aguilar, 2010)

2.2.29.5. MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA SOBRE PAVIMENTOS O SUELOS DE CONCRETO.

En algunas ocasiones el sistema de puesta a tierra se encuentra rodeado de suelos cubiertos por pavimentos, concreto o cemento y en los cuales no es tan fácil la colocación de los electrodos de prueba tipo varilla. En estos casos se pueden usar placas de cobre para reemplazar los electrodos auxiliares y también se utiliza agua para remojar el punto y de esta manera disminuir la resistencia de contacto con el suelo, esto se puede observar en la figura N° 2.45.

Figura N° 2.45 Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra en Suelos o



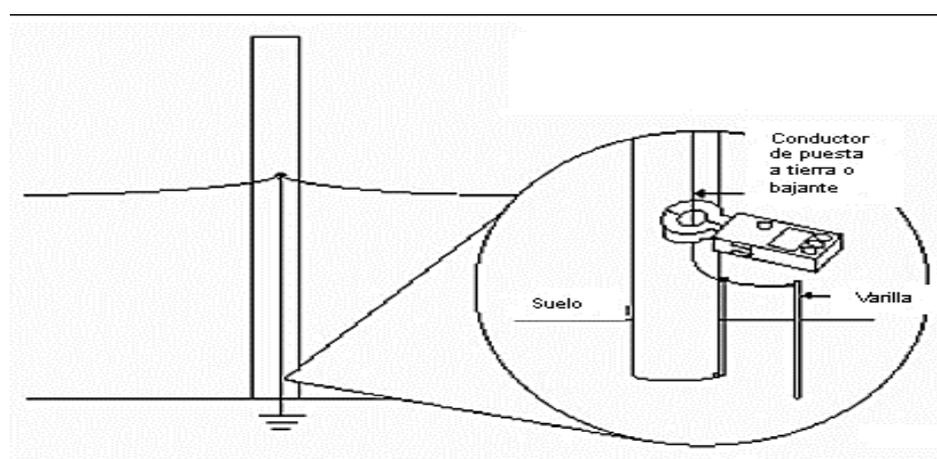
Fuente: (Aguilar, 2010)

Deberán ubicarse las placas de cobre a la misma distancia en que se colocarían los electrodos auxiliares de acuerdo al método de la Caída de Potencial antes descrito. Las dimensiones de la placa deberán ser de 30x30 cm y espesor de 3.8 cm. También se debe verter agua sobre las placas y remojar el lugar en donde serán ubicadas para mejorar el contacto con el suelo. Es importante mencionar que las placas realizarán la misma función de los electrodos auxiliares.

2.2.29.6. MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE MEDIDOR TIPO PINZA.

Este es un método práctico que viene siendo ampliamente usado para medir la puesta a tierra en sitios donde es imposible usar el método convencional de caída de potencial, como es el caso de lugares densamente poblados, celdas subterráneas, centros de grandes ciudades, etc. El medidor tipo pinza mide la resistencia de puesta a tierra de una varilla o sistema de puesta a tierra simplemente abrazando el conductor de puesta a tierra o bajante como lo ilustra la figura N° 2.46. (Aguilar, 2010)

Figura N° 2.46 Medición del Electrodo Utilizando Pinza



Fuente: (Aguilar, 2010)

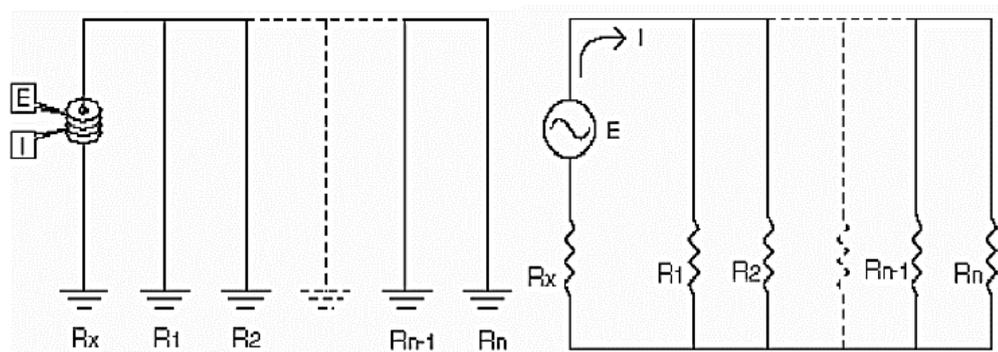
2.2.29.7. PRINCIPIO DE MEDICIÓN

En primera instancia el neutro de un sistema multiaterrizado puede ser representado como un circuito simple de resistencias de puesta a tierra en paralelo como se puede observar en la figura N° 2.47.

Entonces si un voltaje “E” es aplicado al electrodo o sistema de puesta a tierra Rx, la corriente “I” resultante fluirá a través del circuito antes citado.

Se tendrá en cuenta que los instrumentos poseen un oscilador de voltaje a una frecuencia de 1.6 kHz y la corriente a la frecuencia generada es recolectada por un receptor de corriente. Un filtro interno elimina las corrientes de tierra y ruido de alta frecuencia.

Figura N° 2.47 Circuito Equivalente para un Sistema Multiaterrizado



Fuente: (Aguilar, 2010)

Entre el voltaje y la corriente existe una relación la misma que es determinada por el instrumento y desplegada en forma digital. El método está basado en la suposición de que la impedancia del neutro del sistema multiaterrizado, excluyendo el electrodo bajo medida, es muy pequeña y puede ser asumida igual a cero.

Teniendo en cuenta esta suposición, la lectura indicada nos va a representar la resistencia de puesta a tierra del sistema o electrodo que se está midiendo.

Este método posee las siguientes limitaciones:

- La aplicación es limitada a electrodos conectados a sistemas multiaterrizados de baja impedancia.
- Conexiones corroídas o partidas del neutro del sistema, pueden influenciar las lecturas.
- No es aplicable a sistemas de puesta a tierra aterrizados en múltiples puntos.
- El ruido de alta frecuencia en el sistema podría influenciar en las lecturas a tomarse.

Podrían existir altas resistencias en las conexiones con el electrodo de puesta a tierra. (Aguilar, 2010)

2.2.29.8. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD EN LOS PROCEDIMIENTOS DE MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Cuando se esté efectuando el proceso de medición de la resistencia de puesta a tierra se podría quedar expuesto a gradientes de potencial letales que pueden existir entre la tierra a medir y la tierra remota.

Motivo por el cual es muy importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- No se deberán realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas.
- Debe estar la puesta a tierra desconectada de las bajantes de los pararrayos, del neutro del sistema y de las tierras de los equipos.
- Antes de efectuar la medición, debe medirse la tensión originada por corrientes expurgas, debiéndose tener muy en cuenta que, si esta supera los 30 V, no debe medirse la resistencia y deberá localizarse la falla.

- Deberá el operario utilizar guantes aislados y calzados con suela dieléctrica.
- Principalmente uno de los objetivos de la medición es establecer la localización de la tierra remota tanto para los electrodos de potencial como de corriente, es así que, de esta manera, las conexiones de estos electrodos deben ser tratados como una fuente de posible potencial entre los cables de conexión y cualquier punto sobre la malla
- En ninguna circunstancia se deben tener las dos manos o partes del cuerpo humano que complete o cierre el circuito entre los extremos de posible diferencia de alto potencial. (Aguilar, 2010)

2.2.29.9. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD EN LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN PARARRAYOS

Es muy importante tomar en cuenta que la medición es de especial cuidado debido a que pueden aparecer, en el momento de la medida, corrientes extremadamente altas de corta duración producto de descargas atmosféricas por el funcionamiento propio del pararrayo.

En un pararrayos aislado y puesto a tierra, la bajante o conductor de puesta a tierra nunca debe ser desconectada para realizar la medición porque la base del pararrayos puede estar elevada al potencial de la línea. (Aguilar, 2010)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN

El método a utilizar es la de diseñar diferentes formas de instalar y comparar los resultados de las pruebas en las tomas de tierra de varilla enterrada directamente, varilla con gel, varilla con cemento conductor, varilla con cemento conductor más bentonita y varillas con acoplamientos radiales en paralelo, evaluarlos y determinar el más eficiente. Luego de determinar el más óptimo, se procederá a implementar y realizar la toma de datos que comprueben o descarten los cálculos previamente definidos, para luego corregirlos o mejorarlos.

3.2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

El ámbito de estudio donde se implementara los SPT y se desarrollaran las pruebas se ubica:

Región : Puno

Provincia : Puno

Distrito : Puno

Con la siguiente dirección Av. Floral 1153 ciudad universitaria pabellón de Ing. Mecánica eléctrica.

3.3. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.3.1. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación para su difusión científica y tecnológica, define en la actualidad la Investigación y desarrollo experimental I+D, que comprende el trabajo creativo para incrementar los conocimientos y para crear nuevas

aplicaciones que engloba tres actividades: investigación básica, investigación aplicada y desarrollo experimental.

Dentro del Proyecto de Investigación se tiene la investigación básica cuyo propósito es generar nuevos conocimientos o afirmar conocimientos sobre fundamentos de fenómenos y hechos, sin prever ninguna aplicación específica inmediata y la investigación aplicada, cuyos proyectos de investigación son dirigidos principalmente hacia un fin u objetivo práctico. Dentro de Investigación de Desarrollo comprende las actividades de innovación que son “todas aquellas acciones llevadas a cabo para poner en práctica conceptos, ideas y métodos necesarios para la adquisición, asimilación e incorporación de nuevos conocimientos para obtener como resultado un cambio técnico, lo cual se refleja en un mejor desempeño.

Entonces el tipo de Investigación es Aplicada, de innovación tecnológica. Porque se espera un mejor desempeño en las tomas de tierra.

Para su diseño, el tipo es Investigación descriptiva y explicativa.

Los estudios explicativos van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas.

3.3.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Teniendo en cuenta que se tendrán varios parámetros de diseño, su procesamiento implicará un análisis multivariado, que nos permitirá analizar las relaciones entre variables independientes y dependientes.

Se considera como variable independiente la evaluación del terreno para el pozo a tierra, su tratamiento e instalación. Como variable dependiente, se considera la evaluación de los resultados en ohmios del sistema de tierra en prueba.

3.3.3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS

Para los análisis de datos se utilizan las fórmulas ya definidas y desarrolladas en el fundamento teórico, utilizando las correspondientes a cada caso.

3.3.4. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología empleada en la investigación y evaluación del comportamiento de los diferentes métodos de puestas a tierra, varilla enterrada directamente, varilla con acoplamiento radiales, varillas con acoplamiento radiales en paralelo, varilla más cemento conductor, varilla más gel, varilla más cemento conductor y bentonita, consta fundamentalmente de los siguientes pasos:

- Búsqueda de información existente de los tipos de sistemas de puestas a tierra, formas constructivas, materiales y métodos. Tesis relacionadas, artículos, normativas, guías técnicas y revistas.
- Se realizará la medición de la resistividad del terreno.
- Se diseñará el sistema de puesta a tierra varilla vertical y en paralelo.
- Se adquirirá los materiales necesarios para su implementación de los diferentes sistemas de puesta a tierra.
- Se realizará la implementación para las pruebas de resistencia de puesta a tierra de los sistemas de puesta a tierra planteados.

3.3.5. UNIDADES DE INFORMACIÓN

La unidad de observación, es aquella por medio de la cual se obtiene la información; es decir, es la unidad informante. “la unidad de investigación es aquella que contiene elementos que van a ser estudiados”. Para dar respuesta a la unidad de investigación y cumplir con los objetivos. (Parra, 1998)

Se tuvo la asesoría, participación de ingenieros y técnicos expertos en el tratamiento y evaluación de puestas a tierra con diferentes métodos, cumpliéndose los propósitos y objetivos específicos de la investigación, diseño e implementación de diferentes sistemas de puestas a tierra para los laboratorios de ingeniería mecánica eléctrica de la UNA – Puno.

3.4. EQUIPOS, MATERIALES E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

3.4.1. MATERIALES

En los métodos de puestas a tierra son importantes los materiales utilizados, los más importantes son: varilla de cobre 5/8” (15.875mm), cable de cobre (16mm²), conectores Anderson (5/8” y 3/4”), gel, cemento conductivo, bentonita.

3.4.1.1. VARILLA DE COBRE

Posee una excelente conductividad eléctrica, dureza y resistencia a la tracción. Su instalación eléctrica es al sub suelo y su función disipar la energía proveniente de descargas atmosféricas, sobretensiones internas, cargas estáticas y eventos de cortocircuito.

Características:

1. Material: Cobre
2. Longitud: 2.40m
3. Diámetro: 5/8” (0.016 m)
4. Procedencia: Nacional

Figura N° 3.1 Varilla de Cobre

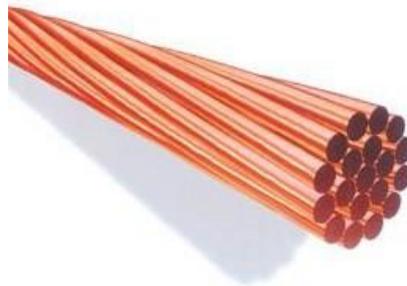
Fuente: (www.promart.pe.)

3.4.1.2. CABLE DE COBRE:

Conductor que se utiliza para los acoplamiento radiales y conectar las varillas.

Características:

1. Marca: Indeco.
2. Longitud: 10m.
3. Sección: 16mm².

Figura N° 3.2 Cable de Cobre.

Fuente: (itc-businessgroup.com)

3.4.1.3. CONECTOR ANDERSON

Conector diseñado para sujetar una varilla con el cable.

Características:

- Marca: Tkl
- Material: Cobre
- Sección de acción: 5/8" (0.016 m)

Figura N° 3.3 Conector Anderson

Fuente: (www.promart.pe.)

3.4.1.4. GEL

Reductor de resistencia para Puestas a Tierra fabricado en el Perú desde 1984.

Características:

- Marca: Thor Gel
- Material: Gel semiconductor
- Peso: 5 kg
- Procedencia: Nacional
- Beneficios: No inflamable, no perecible. Insoluble e higroscópico para puesta a tierra.

Figura N° 3.4 Thor Gel

Fuente: (www.promart.pe.)

3.4.1.5. CEMENTO CONDUCTIVO

No inflamable y libre de mantenimiento, incrementa el área de contacto del conductor y evita su corrosión creando un sistema libre de mantenimiento.

Características:

- Marca: Thor Cem
- Material: Cemento
- Peso: 25 kg
- Vida útil mínima: 20 años
- Procedencia: Nacional
- Beneficios: No requiere mantenimiento, seguro para el medio ambiente.

Figura N° 3.5 Cemento THOR CEM



Fuente: (www.promart.pe.)

3.4.1.6. BENTONITA

Características:

- Marca: Tierra Gel.
- Material: Bentonita.
- Peso: 30 kg

Figura N° 3.6 Bentonita Sódica

Fuente: (WWW.SODIMAC.COM.PE)

3.4.2. EQUIPOS

3.4.2.1. TELURÓMETRO DIGITAL MTD-20KWE

Aplicación:

Medición de resistencias de puesta a tierra (con 3 bornes), resistividad del suelo por el método de Wenner (con 4 bornes) y tensiones presentes en el terreno.

Método de medición de resistencia:

El telurómetro inyecta en el terreno una corriente estabilizada electrónicamente (por lo que no se requieren ajustes previos a la medición), y mide con alta precisión la tensión que se desarrolla en el terreno por la circulación de esa corriente a través de la resistencia de difusión del electrodo hincado. La lectura de R es directa en el visor.

Funcionamiento como voltímetro:

En la función voltímetro, el equipo opera como voltímetro convencional de C.A. y permite verificar la presencia y medir las tensiones generadas por las corrientes parásitas.

Escalas de medición:

- Resistencias: 0-20 Ω ; 0-200 Ω ; 0-2.000 Ω ; 0-20 k Ω .
- Tensión: 0-200 V~.

Exactitud:

- Medición de resistencias:
 $\pm 2\%$ del valor medido $\pm 1\%$ del fondo de escala.
- Medición de tensión:
 $\pm 2\%$ del valor medido $\pm 1\%$ del fondo de escala.

Potencia y corriente de salida: Opera con potencia de salida inferior a 0,5 W y con una corriente inferior a 15 mA (pico a pico).

Temperatura de operación: -10°C a 50°C.

Temperatura de almacenamiento: -25°C a 65°C.

Humedad: 95% UR (sin condensación).

Altura máxima: 5000 m sobre el nivel del mar.

Serial Nro.: MO 3095 E.

Certificación: nro. 26408.

Calibración: 01/05/2010.

Figura N° 3.7 Telurómetro digital MTD-20KWe



Fuente: (www.megabras.com)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1.1. DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Se determinó la resistividad del suelo por el método wenner, se desarrolló de acuerdo a la sección 2.2.13.2 del marco teórico.

Siguiendo la siguiente configuración de la figura N° 2.16, se procedió de la siguiente manera.

- Se clavaron cuatro electrodos, separados a una distancia “a” en metros a una profundidad de 15 cm.
- Por medio de los electrodos extremos se inyecta corriente, mientras que en los electrodos intermedios se mide el potencial (en función de la resistencia) utilizando el telurómetro.
- Para asegurar la medición de la resistividad del terreno se trazó cuatro perfiles y por cada perfil se realiza seis mediciones variando la distancia “a”.

La tabla N° 4.1 muestra los registros del valor de la lectura del telurómetro durante el proceso de medición de la resistividad del suelo el 19 de mayo del presente año en patio de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, cada uno de estos datos serán ingresados en la Ecu. 2.1 para obtener la resistividad promedio del suelo.

Tabla N° 4.1 Datos de la Lectura del Telurómetro

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	Ra4 (Ω)
1	5.36	7.03	6.93	5.66
2	2.74	3.58	4.09	3.61
3	1.86	1.75	2.25	3.63
4	1.05	1.10	1.23	2.20
5	0.59	1.00	0.63	0.95
6	0.35	0.68	0.69	0.60

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla N° 4.1 se ingresaron a la Ecu. 2.1 para el cálculo de la resistividad del suelo por el método wenner.

De la Ecu. 2.1.

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{\left[1 + \left[\frac{2 \cdot a}{(a^2 + 4 \cdot b^2)^{0.5}} \right] - \left[\frac{2 \cdot a}{(4 \cdot a^2 + 4 \cdot b^2)} \right] \right]}$$

Para cada una de las rutas o perfiles trazados en el terreno, los valores de la lectura del telurómetro (ver tabla N° 4.1) se tabulará en la tabla N° 4.2 en función del espaciamiento "a", y se calculará.

Primero: el promedio aritmético para cada fila a partir de los valores de la resistividad aparente (ρ_a).

Segundo: promedio aritmético total a partir del promedio aritmético de cada fila

Tabla N° 4.2 Resistividad Promedio del Suelo

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Resistividad promedio $\rho_a(\Omega \cdot m)$
	$\rho_{a1}(\Omega \cdot m)$	$\rho_{a2}(\Omega \cdot m)$	$\rho_{a3}(\Omega \cdot m)$	$\rho_{a4}(\Omega \cdot m)$	
1	33.68	44.17	43.54	35.56	39.24
2	34.43	44.99	51.40	45.36	44.05
3	35.06	32.99	42.41	68.42	44.72
4	26.39	27.65	30.91	55.29	35.06
5	18.54	31.42	19.79	29.85	24.90
6	13.19	25.64	26.01	22.62	21.87
Resistividad promedio total (ρ_{PT})					34.97

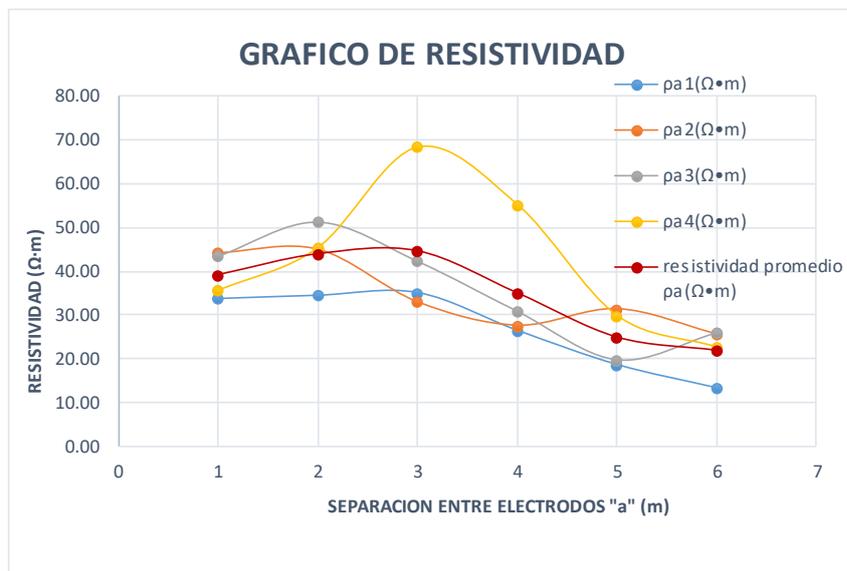
Elaboración: Propia.

Donde 34.97 ($\Omega \cdot m$) es la resistividad promedio total del terreno, este dato será ingresado en la Ecu. 2.4

4.1.2. CURVAS DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

En la figura N° 4.1 se muestra cuatro perfiles de la resistividad del terreno en estudio y el perfil de resistividad media.

Figura N° 4.1 Curvas de la resistividad del suelo



Elaboración: Propia.

En las curvas de la figura se observa que el perfil con más baja resistividad es el perfil (ρ_1).

4.1.3. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA VARILLA VERTICAL

De la EC. 2.4

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4(l)}{d} \quad (4.1)$$

$$R = \frac{34.97}{2\pi \cdot 2.4} \cdot \ln \frac{4(2.4)}{0.016} = 14.83 (\Omega)$$

Al tener un terreno con baja resistividad se obtiene una resistencia de puesta a tierra de 14.83 (Ω),

4.1.4. CALCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA FORMADO POR VARILLAS ALINEADAS EN PARALELO

- Calculo de la resistencia equivalente de electrodos en paralelo.

De la EC. 2.6 se tiene:

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm}$$

De modo que:

$$R_{hh} = R_{11} = R_{22} = R = 14.83. \quad (4.2)$$

- Calculo de R_{hh} es la resistencia individual de cada varilla sin la presencia de otras varillas (R_{hh}).

De la EC. 2.7 se tiene:

$$R_{hm} = \frac{\rho a}{4\pi l} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (4.3)$$

Donde:

$$e_{hm} = 5m.$$

$$L = 2.4m.$$

- Calculo de la distancia (b_{hm})

De la EC. 2.8

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} = \sqrt{2.4^2 + 5^2} = 5.55\text{m} \quad (4.4)$$

Reemplazando datos en EC. 2.7 tenemos:

$$R_{hm} = R_{12} = R_{21} = \frac{34.97}{4\pi 2.40} \ln \left[\frac{(5.55 + 2.4)^2 - 5^2}{5^2 - (5.55 - 2.4)^2} \right] \quad (4.5)$$

$$R_{hm} = R_{12} = R_{21} = 1.078(\Omega)$$

- Calculo de R_1 y R_2 :

$$R_1 = R_{11} + R_{12} = 14.83 + 1.078 = 15.90 (\Omega)$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = 1.078 + 1.078 = 15.90 (\Omega)$$

- Calculo de la resistencia equivalente de dos varillas conectadas en paralelo

De la EC. 2.10 tenemos:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (4.6)$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{15.90} + \frac{1}{15.90}} = 7.95(\Omega)$$

Obtenemos una resistencia equivalente de 7.95 para dos varillas conectadas en paralelo.

- Índice de utilización o índice de reducción (K)

De la EC. 2.11 se tiene:

$$k = \frac{R_{eq}}{R_{1\text{electrodo}}} \quad (4.6)$$

$$k = \frac{7.95}{14.83} = 0.536$$

4.2. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE PUESTAS A TIERRA

4.2.1. MÉTODO VARILLA ENTERRADA DIRECTAMENTE

4.2.1.1. PUESTA A TIERRA 1 (PAT - 1)

Entenderemos por varilla enterrada directamente al proceso en el cual se enterrará una varilla verticalmente, y a esta no se le agregará tratamiento químico (cemento conductivo, gel, ni aditivos) ni se le agregará acoplamientos radiales. La RPAT - 1 nos servirá como punto de partida para la comparación con las demás RPAT a construirse.

a) Construcción del PAT - 1

- Para esta primera prueba se excavo pozo 1.20 con 0.5 metro de diámetro y una profundidad de 1 m.
- En el proceso de excavación de los pozos para la PAT - 2 y para la PAT - 3 que se verá más adelante se observó que a 0.8m de profundidad de la superficie el terreno era pedregoso y de ahí en adelante era un terreno uniforme con baja granulometría.
- Con la consideración anterior se tomó la decisión de excavar el primer pozo 1.20 metros de profundidad con 0.5 metro de diámetro.
- Para introducir completamente la varilla 1 de 2.40 metros de longitud y a 0.3m por debajo de la superficie del terreno se golpeó con una comba hasta que el resultado final sea tal como se muestra en el (ANEXO N° 1)

b) Medición de la resistencia de puesta a tierra (RPAT) del PAT - 1

Para medir la RPAT - 1 se utilizó el método de caída de potencial, citado en la sección 2.2.29.2, se utilizará para la medición la configuración de la figura N° 2.41.

Para obtener mejores resultados en la medición se trazaron tres perfiles y por cada perfil se realizaron 3 mediciones variando el espaciamiento “a” de las picas del telurómetro.

Se calculó el promedio aritmético de la RPAT - 1 para cada fila.

Finalmente se calculó la RPT – 1 sumando los tres promedios de la última columna de la tabla N° 4.3.

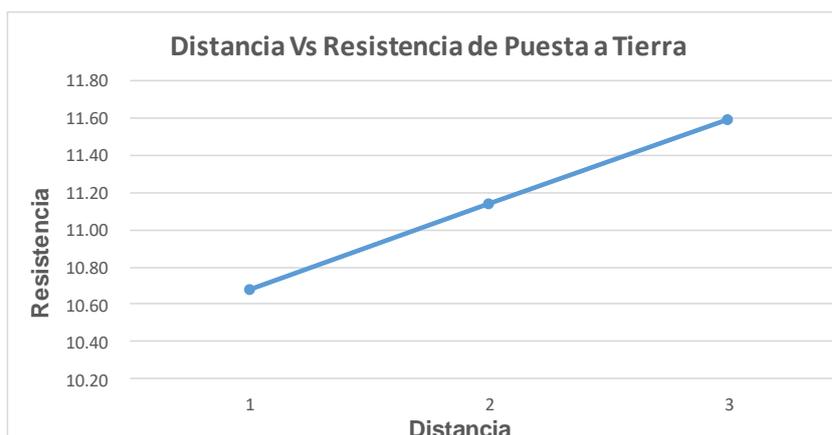
Tabla N° 4.3 Resultado de la RPAT - 1

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	"Ra" (Ω)
1	10.90	10.7	10.44	10.68
2	11.25	11.03	11.14	11.14
3	11.72	11.43	11.62	11.59
Resistencia promedio total (RPT)				11.14

Elaboración: Propia.

En la tabla N° 4.3 observamos que obtenemos una resistencia promedio de 11.14 (Ω). Para la puesta a tierra con varilla vertical enterrada directamente, siendo 3.69 (Ω) menor a la calculada.

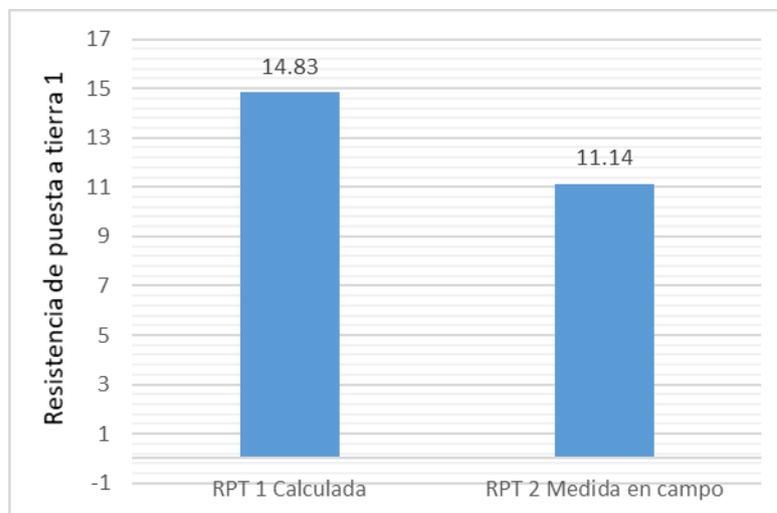
Figura N° 4.2 Varilla Enterrada Directamente



Elaboración: Propia.

En el diagrama de barras de la figura N° 4.3 se presenta la RPAT - 1 calculada mediante la Ecu. 2.4 y la RPT1 medida en campo.

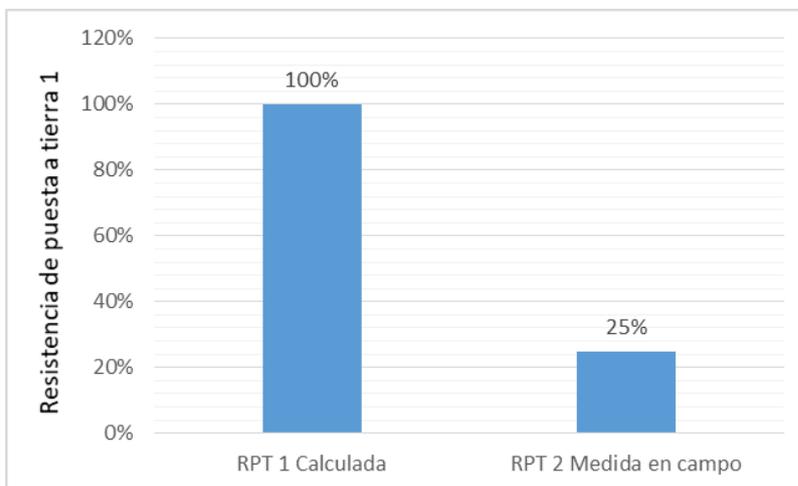
Figura N° 4.3 Comparación RPAT - 1



Elaboración: Propia.

En la figura N° 4.4 se observa que la resistencia medida en campo es un 25% menor a la calculada.

Figura N° 4.4 Comparación porcentual del RPAT - 1



Elaboración: Propia.

En la tabla N° 4.4 se puede ver el costo de materiales para la PAT - 1

Tabla N° 4.4 Costo de Materiales Para el PAT - 1

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	1	140.00	140.00
2	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	1	1.00	7.00
3	Caja de registro	-	1	60.00	60.00
TOTAL					207.00

Elaboración: Propia.

4.2.2. MÉTODO VARILLA CON ACOPLAMIENTOS RADIALES EN PARALELO

4.2.2.1. PUESTA A TIERRA - 2 (PAT - 2), PUESTA A TIERRA - 3 (PAT - 3)

Se entenderá por puesta a tierra con acoplamiento radiales para el presente trabajo al ensamble de tres acoplamiento radiales a una varilla vertical como se muestra en el (ANEXO N° 2).

a) Construcción del (PAT - 2) y (PAT - 3)

- Para construcción del PAT - 2 Y PAT - 3 se excavo dos pozos de 2.8 metros de profundidad y 1 metro de diámetro.
- Se acoplo en la varilla 2 y varilla 3 tres acoplamiento radiales respectivamente como se muestra en el Anexo N° 14 a una misma separación.
- Finalmente se procedió a enterrar la varilla 2 y la varilla 3 en cada pozo compactando cada 0.2 metros.

b) Medición de la resistencia de puesta a tierra (RPAT) del PTA - 2 y PAT - 3

Para medir la RPAT de la PAT - 2 y PAT - 3 se utilizó la misma metodología y procedimiento utilizado para medir la PAT - 1. Los resultados se muestran en la tabla N° 4.5 y 4.7 respectivamente.

Tabla N° 4.5 Medición de la RPT - 2

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio "Ra" (Ω)
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	
1	15.44	13.86	13.36	14.22
2	12.88	13.06	13.14	13.03
3	13.22	13.03	12.94	13.06
Resistencia promedio total (RPT)				13.44

Elaboración: Propia.

En la figura N° 4.5 se observa la curva de resistencia Vs distancia

Figura N° 4.5 Curva – Método Radial PAT - 2



Elaboración: Propia..

En la tabla N° 4.6 se puede ver el costo de materiales para la PAT - 2

Tabla N° 4.6 Costo de Materiales Para el PAT - 2

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	1	140.00	140.00
2	Conductor de cobre 16.00 mm2	m	5	6.50	32.50
3	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	3	7.00	21.00
4	Caja de registro	-	1	60.00	60.00
TOTAL					253.50

Elaboración: Propia..

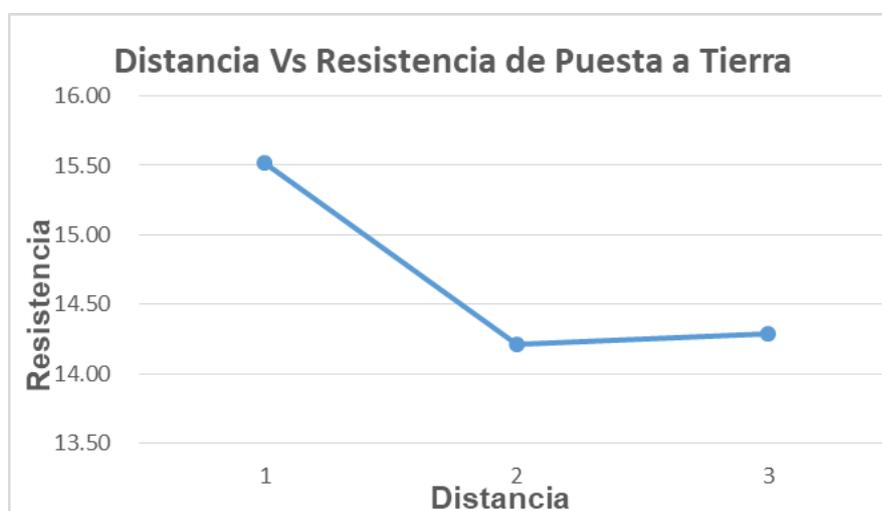
Tabla N° 4.7 Medición de la RPT- 3

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	"Ra" (Ω)
1	15.39	15.20	15.96	15.52
2	14.32	14.07	14.26	14.22
3	14.41	14.30	14.15	14.29
Resistencia promedio total (RPT)				14.67

Elaboración: Propia.

En la figura N° 4.6 se observa la curva de resistencia Vs distancia

Figura N° 4.6 Curva – Método Radial PAT - 3



Elaboración: Propia.

En la tabla N° 4.8 se puede ver el costo de materiales para la PAT - 3

Tabla N° 4.8 Costo de materiales para el PAT - 3

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	1	140.00	140.00
2	Conductor de cobre 16.00 mm ²	m	5	6.50	32.50
3	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	3	7.00	21.00
4	Caja de registro	-	1	60.00	60.00
TOTAL					253.50

Elaboración: Propia.

4.2.2.2. PUESTA A TIERRA (PAT - 4)

Para la evaluación del comportamiento de la PAT - 4 se conectó la PAT - 2 y la PAT - 3 por medio de un cable desnudo de 16 mm de diámetro la PAT - 2 y PTA - 3 tenían una separación de 5m de distancia una de la otra (ANEXO N° 3).

a) Medición de la resistencia de puesta a tierra. (RPAT - 4)

Para medir la RPAT - 4 se utilizó la misma metodología y procedimiento utilizado para medir la PAT - 1. Los resultados se muestran en la tabla N° 4.9.

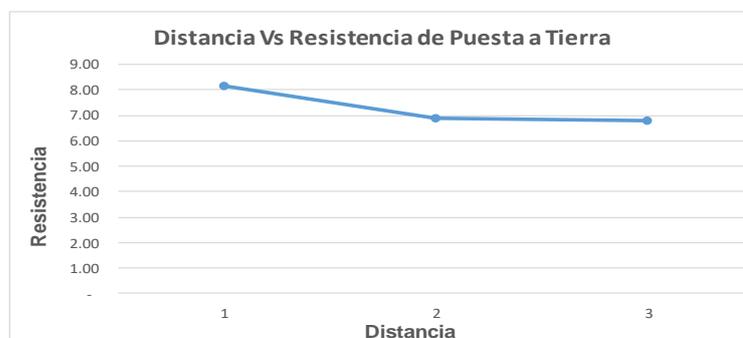
Tabla N° 4.9 Medición de la RPAT 4

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	"Ra" (Ω)
1	8.51	8.40	7.58	8.16
2	7.09	7.15	6.49	6.91
3	6.98	6.88	6.54	6.80
Resistencia promedio total (R _{PT})				7.29

Elaboración: Propia.

En la figura N° 4.7 se observa la curva de resistencia Vs distancia.

Figura N° 4.7 Curva – Método Radial en Paralelo



Elaboración: Propia.

Tabla N° 4.10 Costo de Materiales de la PAT - 4

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	2	140.00	280.00
2	Conductor de cobre 16.00 mm ²	m	10	6.50	65.00
3	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	8	7.00	56.00
4	Caja de registro	-	2	60.00	120.00
TOTAL					521.00

Elaboración: Propia.

4.2.3. MÉTODO VARILLA CON CEMENTO CONDUCTOR

4.2.3.1. PUESTA A TIERRA - 5 (PAT - 5)

Para realizar la evaluación del comportamiento de la PAT - 5 con el método varilla con cemento conductor se le aplicó un bloque de cemento conductor de 25kgms.

a) Construcción del PAT - 5

- Se excavó un pozo 2.8 metros de profundidad con 0.5 metro de diámetro.
- Se ubicó la varilla de cobre de 16 mm diámetro en el centro del pozo
- Se mantuvo en equilibrio vertical dentro de un tubo de 4" a la varilla de cobre.
- Se agregó al cemento conductor agua de tal manera que quede una mezcla homogénea para realizar el baseado de la varilla dentro del tubo como lo muestra el (ANEXO N° 4).
- A medida que se iba baseando el cemento conductor alrededor de la varilla se llenaba el pozo con tierra cernida y también al mismo tiempo se le compactaba

b) Medición de la resistencia de puesta a tierra 5 (RPAT - 5)

Para medir la RPAT - 5 utilizó la misma metodología y procedimiento utilizado para medir la PAT - 1. Se realizó mediciones en dos periodos de tiempo.

- Las primeras mediciones se realizaron 5 días después instalada la puesta tierra con cemento conductor. Los resultados se muestran en la tabla N° 4.1
- Las segundas mediciones se realizaron 25 días después instalada la puesta tierra con cemento conductor. Los resultados se muestran en la tabla N° 4.11 y tabla N° 4.12 respectivamente.

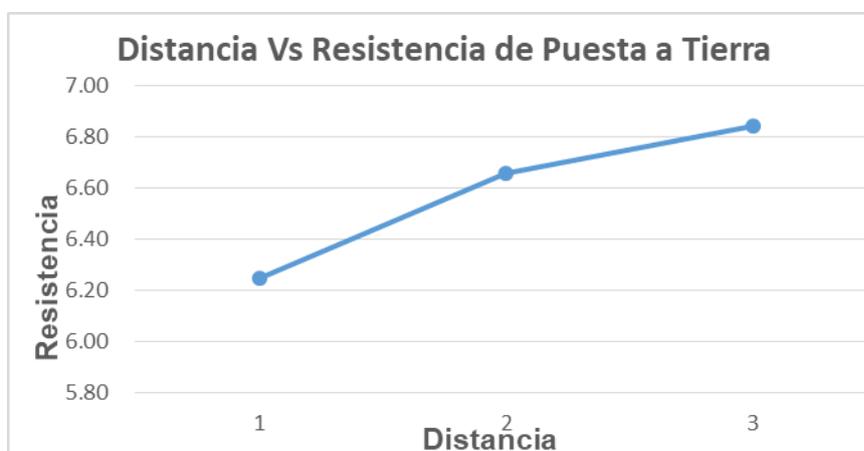
Tabla N° 4.11 Primera Medición de la RPT - 5

Espaciamento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio "Ra" (Ω)
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	
1	6.22	6.69	5.83	6.25
2	6.65	6.59	6.73	6.66
3	6.73	6.77	7.02	6.84
Resistencia promedio total (RPT)				6.58

Elaboración: Propia.

En la figura N° 4.8 se observa la curva de resistencia Vs distancia

Figura N° 4.8 Curva – con Cemento Conductivo



Elaboración: Propia.

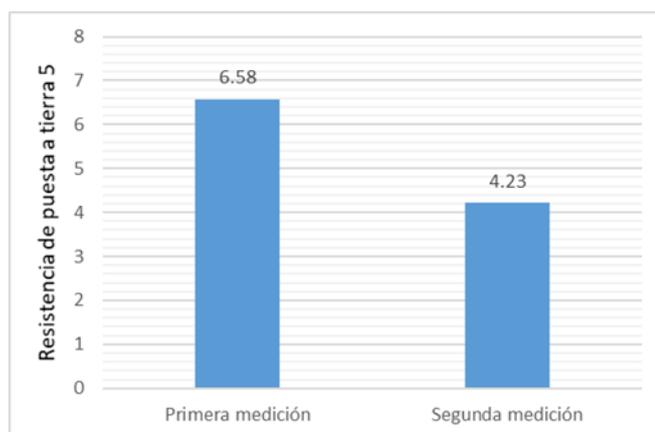
Tabla N° 4.12 Segunda Medición de la RPT - 5

Espaciamento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio "Ra" (Ω)
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	
1	4.36	4.68	3.71	4.25
2	3.93	3.88	4.72	4.18
3	4.18	4.14	4.43	4.25
Resistencia promedio total (RPT)				4.23

Elaboración: Propia.

En el diagrama de barras de la figura N° 4.9 se muestra la reducción de la RPAT de 6.58 (Ω) a 4.23 (Ω). Dichas mediciones se dieron 5 y 25 días después de la instalación de la PAT – 5.

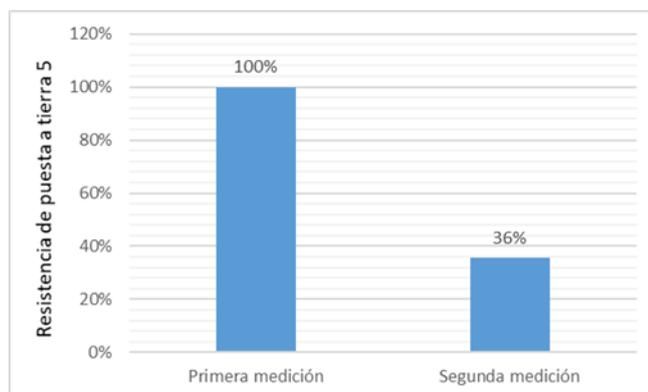
Figura Nº 4.9 Comparación de la primera y segunda medición del SPAT - 5



Elaboración: Propia.

En la figura Nº 4.10 se observa que existe una reducción de la segunda medición respecto a la primera medición de la RPT5 de 36%

Figura Nº 4.10 Comparación de Reducción Porcentual de la Primera y Segunda Medición de la RPAT - 5.



Elaboración: Propia.

Tabla Nº 4.13 Costo de materiales de la PAT -5

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	1	140.00	140.00
2	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	1	1.00	7.00
3	Cemento conductivo (Thor Gem)	Kg	25	85.00	85.00
4	Caja de registro	-	1	60.00	60.00
TOTAL					292.00

Elaboración: Propia.

4.2.4. MÉTODO VARILLA MÁS GEL

4.2.4.1. PUESTA A TIERRA 6 (PAT - 6)

El método a aplicar será varilla más gel (ANEXO N° 5).

a) Construcción de la PT - 6

1. Se excavo un pozo 2.8 metros de profundidad con 0.5 metro de diámetro.
2. Se ubicó la varilla de cobre de 16 mm diámetro en el centro del pozo
3. Se llenó el pozo con tierra cernida compactando cada 0.2 metros hasta 1 metro de altura y se formó una concavidad de 0.15 metros de profundidad por 0.3 metro de diámetro alrededor del electrodo.
4. Cada caja de Thor – Gel contiene dos bolsas una azul y otra crema, cada contenido de cada bolsa se disuelve en 20 litros de agua respectivamente.
5. Se vierte el contenido del líquido azul sobre la concavidad hecha anteriormente hasta que pozo absorba el líquido azul y luego se vierte el líquido blanco. Se presencié la formación un color marrón rojizo luego de verter los dos líquido que son de color característico del hexacianoferrato de cobre 2
6. se procedió a continuar llenando el pozo y se repitió los pasos 3, 4 y 5 por cada metro hasta culminar el pozo.

b) Medición de la resistencia de puesta a tierra - 6 (RPAT - 6)

Para medir la RPAT - 6 de la PAT - 6 utilizó la misma metodología y procedimiento utilizado para medir la RPT - 1. Se realizó mediciones en dos periodos de tiempo.

- Las primeras mediciones se realizaron 5 días después instalada la puesta tierra con cemento conductor. Los resultados se muestran en la tabla N° 4.14

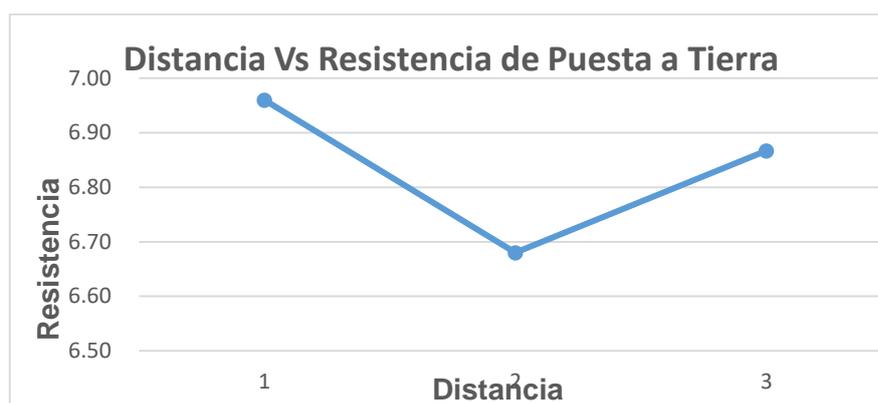
- Las segundas mediciones se realizaron 25 días después instalada la puesta tierra con cemento conductor. Los resultados se muestran en la tabla 4.15.

Tabla Nº 4.14 Primera Medición RPAT - 6

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio "Ra" (Ω)
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	
1	7.30	6.98	6.6	6.96
2	6.64	6.71	6.69	6.68
3	6.82	6.94	6.84	6.87
Resistencia promedio total (R _{PT})				6.84

Elaboración: Propia.

Figura Nº 4.11 Curva – con Gel



Elaboración: Propia.

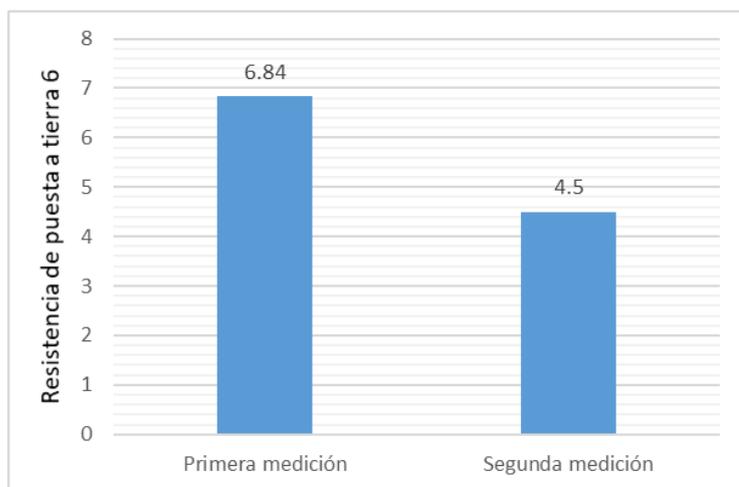
Tabla Nº 4.15 Segunda Medición RPAT- 6.

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio "Ra" (Ω)
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	
1	5.75	4.38	4.79	4.97
2	4.40	4.15	4.13	4.23
3	4.15	4.37	4.38	4.30
Resistencia promedio total (R _{PT})				4.50

Elaboración: Propia.

Figura N° 4.12 Comparación de la Primera y Segunda Medición del SPAT -

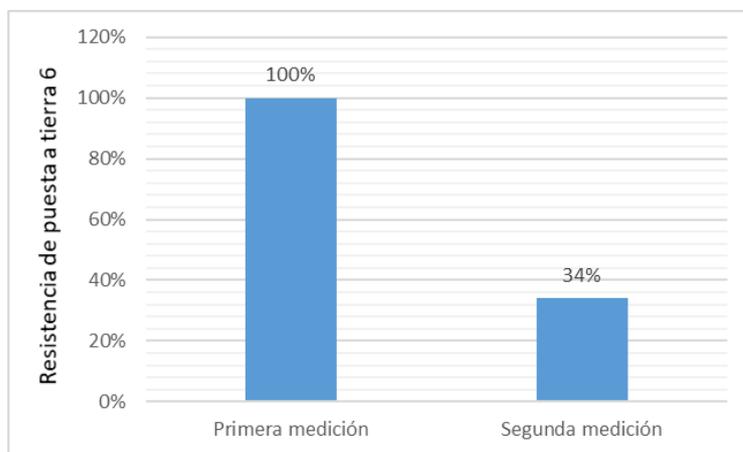
5



Elaboración: Propia.

En la figura N° 4.13 se observa que existe una reducción de la segunda medición respecto a la primera medición de la RPAT - 6 de 34%

Figura N° 4.13 Comparación de Reducción Porcentual de la Primera y Segunda Medición del RPAT - 6



Elaboración: Propia.

Tabla N° 4.16 Segunda Medición RPAT- 6.

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	1	140.00	140.00
2	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	1	7.00	7.00
3	Gel (Thor Gel)	caja	2	70.00	140.00
4	Caja de registro	-	1	60.00	60.00
TOTAL					347.00

Elaboración: Propia.

4.2.5. MÉTODO VARILLA MÁS CEMENTO CONDUCTIVO Y BENTONITA

4.2.5.1. PUESTA A TIERRA 7 (PT7)

Para realizar las pruebas del tratamiento de la puesta tierra con cemento conductivo y aditivos se le aplicó una bolsa de cemento conductivo de 25kg. y una bentonita sódica de 30kg (ANEXO N° 17).

Para la construcción de la PAT 7 el proceso fue similar la construcción del PAT 4, con la diferencia q los 30kg de bentonita sódica fueron mezclados con la tierra cernida.

a) Medición de la resistencia de puesta a tierra 7 (PAT 7)

Para medir la RPT de la PT7 utilizó la misma metodología y procedimiento utilizada para medir la PT1.

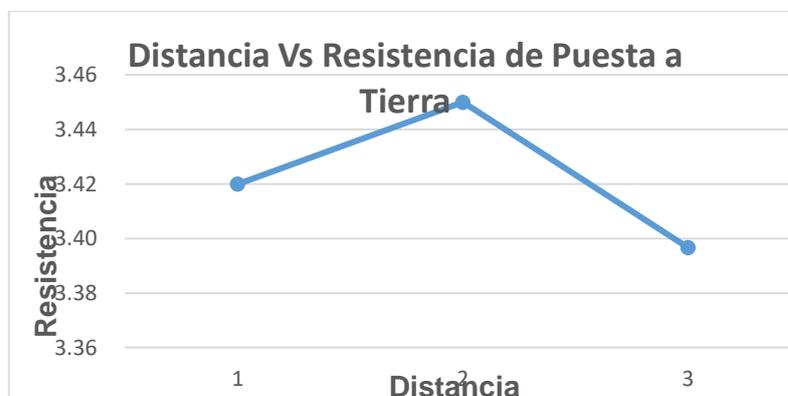
La tabla N° 4.17 muestra los resultados de la medición de la RPAT 7.

Tabla N° 4.17 Medición – con Cemento Conductivo y Bentonita

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio "Ra" (Ω)
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	
1	3.38	3.31	3.57	3.42
2	3.35	3.34	3.66	3.45
3	3.32	3.37	3.5	3.40
Resistencia promedio total (R _{PT})				3.42

Elaboración: Propia.

Figura N° 4.14 Curva – con Cemento Conductivo y Bentonita



Elaboración: Propia.

La tabla N° 4.18 muestra los costos para una PAT - 7

Tabla N° 4.18 Costo de materiales de la PAT - 7

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	1	140.00	140.00
2	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	1	1.00	7.00
3	Cemento conductivo (Thor Gem)	-	1	85.00	85.00
4	Bentonita	Kg	30	30.00	30.00
5	Caja de registro	-	1	60.00	60.00
TOTAL					322.00

Elaboración: Propia.

4.2.6. MÉTODO, VARILLAS CON TRATAMIENTO QUÍMICO EN PARALELO

4.2.6.1. PUESTA A TIERRA (PAT - 8)

Para la evaluación del comportamiento de la PAT - 8 se conectó la PAT - 5 y la PAT 6 por medio de un cable desnudo de 16 mm de diámetro, la PAT - 5 y PTA - 6 tenían una separación de 5m de distancia una de la otra (ANEXO N° 3).

a) Medición de la resistencia de puesta a tierra. (RPAT 8)

Para medir la RPAT 8 se utilizó la misma metodología y procedimiento utilizado para medir la PAT - 1. Los resultados se muestran en la tabla N° 4.19.

Tabla N° 4.19 Medición – Varillas con Tratamiento Químico en Paralelo

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Promedio "Ra" (Ω)
	Ra1 (Ω)	Ra2 (Ω)	Ra3 (Ω)	
1	2.20	2.34	2.37	2.30
2	1.82	2.23	2.39	2.15
3	3.09	2.21	2.80	2.70
Resistencia promedio total (R _{PT})				2.38

Elaboración: Propia.

Tabla N° 4.20 Costo de Materiales de la PAT - 8

COSTO DE MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO S/	PRECIO S/
1	Conductor de cobre 16.00 mm ²	m	6	6.50	39.00
2	Varilla de cobre 5/8" 2.40 m	-	2	140.00	280.00
3	Conector de cobre tipo AB(Anderson) 5/8 de diametro	-	2	7.00	14.00
4	Cemento conductivo (Thor Gem)	Kg	25	85.00	85.00
5	Gel (Thor Gel)	caja	2	70.00	140.00
6	Caja de registro	-	2	60.00	120.00
TOTAL					678.00

Elaboración: Propia.

4.3. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN LAS TOMAS DE TIERRA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS REALIZADOS

En la tabla Nº 4.21 se presentan los valores finales de las resistencias de puesta a tierra de los diferentes métodos realizados.

Tabla Nº 4.21 de Resumen de Valores Finales de las RPAT

Sistema	RPT final (medida en campo) (Ω)
SPAT 1 (varilla enterrada directamente)	11.14
SPAT 2 (Varilla con tres acoplamientos radiales)	13.44
SPAT 3 (varilla con tres acoplamientos radiales)	14.67
SPAT 4 método varillas con acoplamientos radiales en paralelo).	7.29
SPAT 5 (varilla tratada con cemento conductor)	4.23
SPAT 6 (varilla tratada con gel)	4.50
SPAT 7 (varilla tratada con cemento conductor y bentonita.	3.42
SPAT 8 (SPT5 y SPT6 conectados en paralelo)	2.38

Elaboración: Propia.

Tabla Nº 4.22 Resumen de Precios Finales de las PAT

ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO S/	RPT Final (Medida en campo)(Ω)
1	Varilla Enterrada Directamente (PAT 1)	207	11.14
2	Varilla Con Acoplamientos Radiales (PAT 2)	253.5	13.44
3	Varilla Con Acoplamientos Radiales (PAT 3)	253.5	14.67
4	Radial en Paralelo (PAT 4)	521	7.29
5	Varilla con Cemento Conductor (SPAT 5)	292	4.23
6	Varilla con Gel (SPAT 6)	347	4.5
7	Varilla con Cemneto Conductor y Bentonita (SPAT 7)	392	3.42
8	SPT 5 mas SPT 6 en Paralelo (SPAT 8)	678	2.38

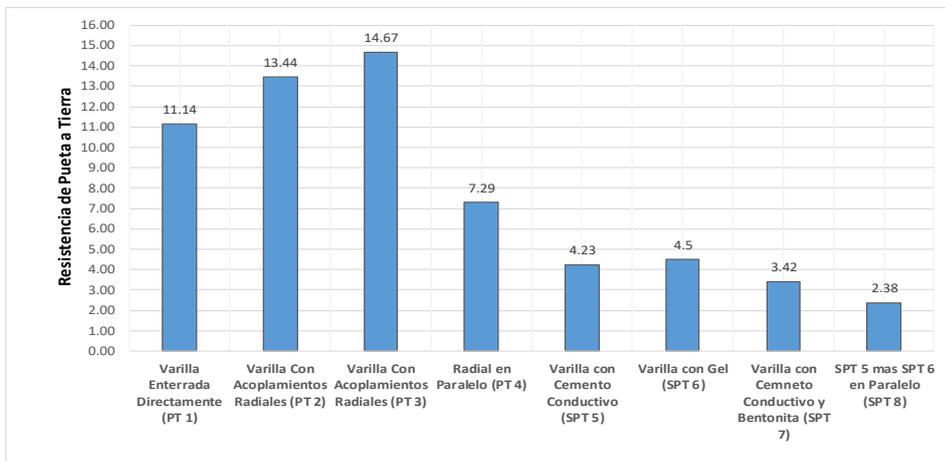
Elaboración: Propia.

4.4. COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Para un mejor análisis en el diagrama de barras de la figura N° 4.15 se presenta una comparación de las RPAT finales obtenidas en la medición de campo. En la figura N° 4.16 se presenta una comparación porcentual de las RPAT finales obtenidas en la medición de campo tomando como referencia la RPAT 1

a) Comparación de las RPAT finales obtenidas en medición de campo

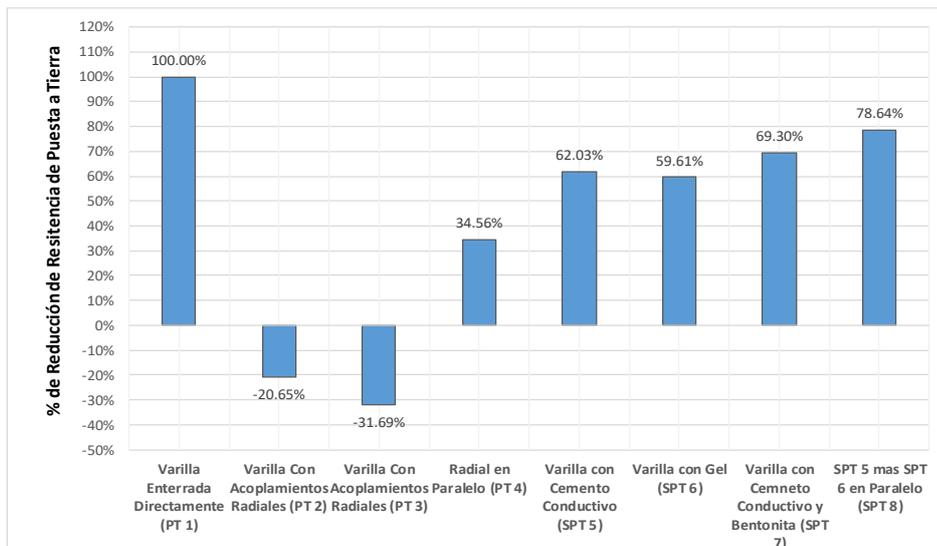
Figura N° 4.15 Comparación – PAT



Elaboración: Propia.

b) comparación porcentual de los sistemas de puesta a tierra.

Figura N° 4.16 Comparación – SPAT Porcentual



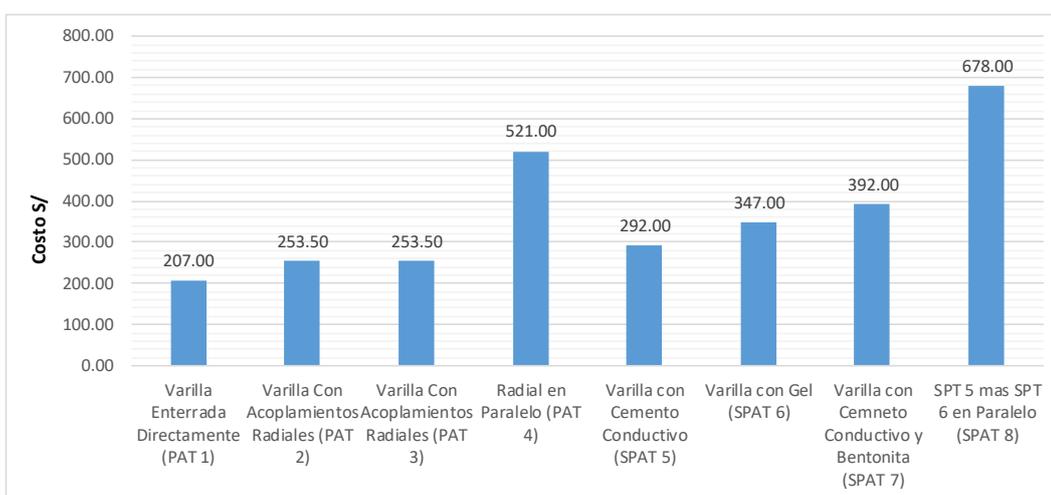
Elaboración: Propia.

Tabla Nº 4.23 Resumen de Precio VS. Resistencia Obtenida

ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO S/	RPT Final (Medida en campo)(Ω)
1	Varilla Enterrada Directamente (PAT 1)	207	11.14
2	Varilla Con Acoplamiento Radiales (PAT 2)	253.5	13.44
3	Varilla Con Acoplamiento Radiales (PAT 3)	253.5	14.67
4	Radial en Paralelo (PAT 4)	521	7.29
5	Varilla con Cemento Conductivo (SPAT 5)	292	4.23
6	Varilla con Gel (SPAT 6)	347	4.5
7	Varilla con Cemento Conductivo y Bentonita (SPAT 7)	392	3.42
8	SPT 5 mas SPT 6 en Paralelo (SPAT 8)	678	2.38

Elaboración: Propia.

Figura Nº 4.17 Comparación de Costos



Elaboración: Propia.

Tomando como referencia la RPT1 y comparando los otros métodos realizados vemos que:

- Para la PAT 1 se obtuvo una resistencia de 11.14 (Ω) que fue 25% menor a la calculada (ver figura Nº 4.4).
- Para la PAT 2 se obtuvo una RPAT de 13.14 (Ω), se esperaba que esta resistencia sea menor que la RPAT 1 ya que se agregó a la varilla tres acoplamiento radiales.
- Para la PAT 3 se obtuvo una RPAT 3 de 14.67 (Ω), la más alta de todas las RPAT del presente trabajo, también para esta RPT 3 se esperaba que fuera menor que la PT1 ya que en la PAT 3 se agregó a la varilla tres

acoplamiento radiales sin embargo el valor de RPAT 3 es cercano a la RPAT 2.

- Para la PAT 4 que es la conexión en paralelo de la PAT 1 Y PAT 2 se obtuvo una RPAT de 7.29 (Ω), un valor nada atractivo en comparación con RPT que vienen a continuación.
- Para la PAT 5 se obtuvo una RPAT de 4.23 (Ω) esta RPAT cumple con el ohmiaje para los laboratorios por ser menor a 5 (Ω).
- Para la PAT 6 se obtuvo una RPAT de 4.5 (Ω) que también esta RPT cumple con el ohmiaje para los laboratorios.
- Para la PAT 7 se obtuvo una RPAT de 3.42 (Ω); también esta RPT cumple con el ohmiaje para los laboratorios.
- Para la PAT 8 que es la conexión en paralelo de la PAT 5 Y PAT 6 se obtuvo una RPAT de 2.38 (Ω), la más baja de todas.
- la RPT2 y la RPT3 al agregar acoplamiento radiales no se reduce el ohmiaje por el contrario aumenta en un 20.65% y 31.69% respectivamente, estos incrementos se deberían a la falta de compactación del terreno al enterrar las varillas con los respectivos acoplamiento radiales en los pozos 2.80 metros por un metro de diámetro, en vista que se hizo la medición el mismo día de la construcción de las PAT 2 y PAT 3
- Por otro lado, no notamos una influencia significativa por parte de los acoplamiento radiales para que reduzca la RPAT.
- La PAT4 que es la conexión en paralelo de la PAT2 y PAT 3 se consigue una reducción del ohmiaje de 34.56%.

- Para las PAT 5, PAT 6 y PAT 7 que poseen diferentes tratamientos químicos las reducciones son 62.03%, 59.61% y 69.3% respectivamente.
- Las reducciones del ohmiaje son aceptables.
- Para la PAT 8 que es la conexión en paralelo de la PAT 5 y PAT 6 se consigue una reduce el ohmiaje un 78.62%.

DISCUSION

Los sistemas de puesta a tierra tienen como objetivo principal brindar para las partes sin corriente eléctrica un punto de descarga cuando por accidente o deterioro, los conductores eléctricos hacen contacto con las cubiertas o partes no eléctricas. Son una parte esencial de las instalaciones eléctricas. Su correcto diseño, ejecución y verificación de los sistemas de puesta a tierra garantizan una seguridad para las personas que operan o manipulan artefactos eléctricos, y al resto de instalaciones propias o instalaciones vecinas. Un buen diseño disminuirá el riesgo asociado que conlleva una derivación de corriente a tierra, ya sea debido a averías en los equipos, condiciones meteorológicas adversas, materiales con deficiencias, etc.

De una u otra forma todos estamos involucrados en la utilización de artefactos eléctricos y por consiguiente estamos exentos a una falla en los conductores eléctricos y pero la seguridad recae en el desvío de las corrientes a la toma de tierra o RPT (Resistencia de Pozo de Tierra)

El presente trabajo sobre los sistemas de puesta a tierra para instalaciones eléctricas domiciliarios, utiliza como metodología el estudio de diferentes diseños de sistemas de puesta a tierra, primeramente el terreno, no homogéneo, estratificado, en concreto el modelo bicapa, para interpretar mediante mediciones del método Wenner, la resistividad que presenta la porción de tierra donde se instalará el pozo de puesta a tierra, como parte del sistema de protección de las instalaciones eléctricas. Los parámetros eléctricos de los electrodos tipo con variantes como varilla única, varilla en paralelo, varilla con conductores radiales, y enterrados directamente, enterrados en un pozo de tierra cernida, otro con material aditivo gel, otro con cemento conductor y otro con

aditivo bentonita, pero no se analiza con mayor profundidad Los electrodos en malla, electrodos con láminas de cobre, que pertenecen a tomas de tierra de media tensión o estaciones transformadoras, donde se aplican otros métodos de cálculo como el método Howe y el método de simulación de cargas, CSM, tema que no esta dentro de los alcances de este trabajo, pero como discusión, se puede mencionar, Este método (Howe) es muy extendido dentro de la comunidad Europea, el cual analiza y cuantifica el comportamiento de un electrodo al disipar una corriente en un medio infinito y homogéneo, suponiendo que la corriente se distribuye proporcionalmente por la longitud del electrodo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

PRIMERO: Se diseñó los sistemas de puestas a tierras planteadas, de los cuales se implementó el sistema de puesta a tierra método varilla con cemento conductivo, sistema de puesta a tierra varilla más gel en la “Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica” Los cuales podrán ser usados como lugares de prueba para las prácticas de laboratorio.

SEGUNDO: Se realizó la descripción y aplicación de los conceptos y recomendaciones definidos en publicaciones, normativas y prácticas de la industria. Para que asegure la integridad física a las personas y las instalaciones, así como la apropiada operación de los equipos y sistemas de protección.

TERCERO: en la revisión literaria se determinó la importancia de la puesta a tierra en los circuitos eléctricos se definió los conceptos del diseño de puesta a tierra, la resistencia de puesta a tierra, voltajes de paso y toque, máximo alza de potencial, el espaciamiento entre conductores.

CUARTO: se implementó el sistema de puesta a tierra método varilla con cemento conductivo con una RPT de 4.23 (Ω), sistema de puesta a tierra varilla más gel con una RPT de 4.23 (Ω), en la “Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica” los cuales podrán ser usados como practica de laboratorio.

QUINTO: se evaluó y comparó los diferentes sistemas de puesta a tierra. Siendo los más eficientes los sistemas de puesta a tierra método “varillas con tratamientos químicos” y los deficientes los sistemas de puesta a tierra método “varillas con acoplamientos radiales” tomando como referencia el sistema de puesta a tierra método “varilla enterrada directamente”.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

Primera: No se recomienda el uso de acoplamientos radiales en terrenos con baja resistividad ya que demanda mayor costo en la instalación y no justifica la reducción de la resistencia del SPAT.

Segundo: para la implementación de un SPAT se debe medir la resistividad del terreno, para no sobre dimensionar a sub dimensionar el SPAT.

Tercero: se recomienda el uso de barrilas de cobre y no varillas de acero bañadas en cobre para tener mayor vida útil del SPAT.

Concluida una instalación de Puesta a tierra Se recomienda realizar mediciones en diferentes periodos de tiempo (en un intervalo de 25 días)

BIBLIOGRAFÍA

Ruelas, G. R. (2018) Sistemas de Puesta a Tierra - Teoría, Diseño, Medición y Mantenimiento. León, Guanajuato. MÉXICO.

Aguilar, P.G (2010). Diseño y construcción de puestas a tierra para el colegio técnico industrial Gualaceo, basado en recomendaciones prácticas para el aterrizamiento en sistemas comerciales de la IEEE Cuenca – Ecuador.

Cárdenas, J. D (2011). Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de wenner. Pereira 2011.

Canales, F. S. Nociones específicas para puesta a tierra en instalaciones Mineras. Santiago de Chile Enero 2011.

Morales, N. (1999). ProCobre-chile. Santiago: publicación N° 119 de Copper Development.

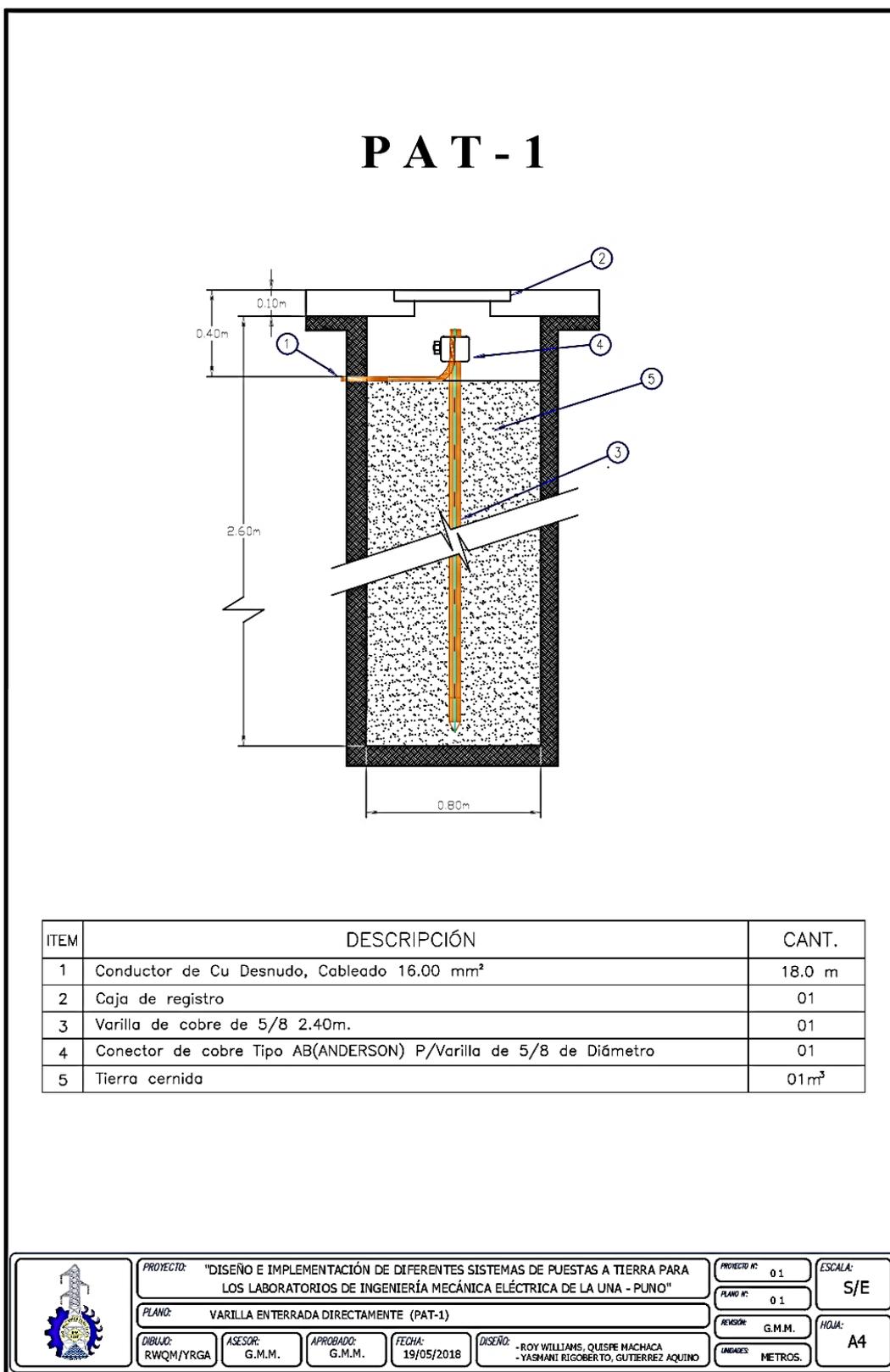
Kindermann, G. (2010) ATERRAMIENTO ELÉCTRICO Universidad Federal De Santa Catarina - Brasil.

WEBGRAFIA

- IEEE Std 80 – 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- WWW.GEONICA.COM/PROD/141/223/EQUIPOS-GEOFISICA-/TOMOGRAFIA-
- www.dincorsa.com/blog/como-fabrican-tubos-cobre/
- www.pararrayos-at3w.com
- WWW.REVISTASEGURIDADADMINERA.COM
- Electrica-sin-Electrodos/index.html
- www.osinergminorienta.gob.pe
- productos/puesta-a-tierra/36-thor-gel

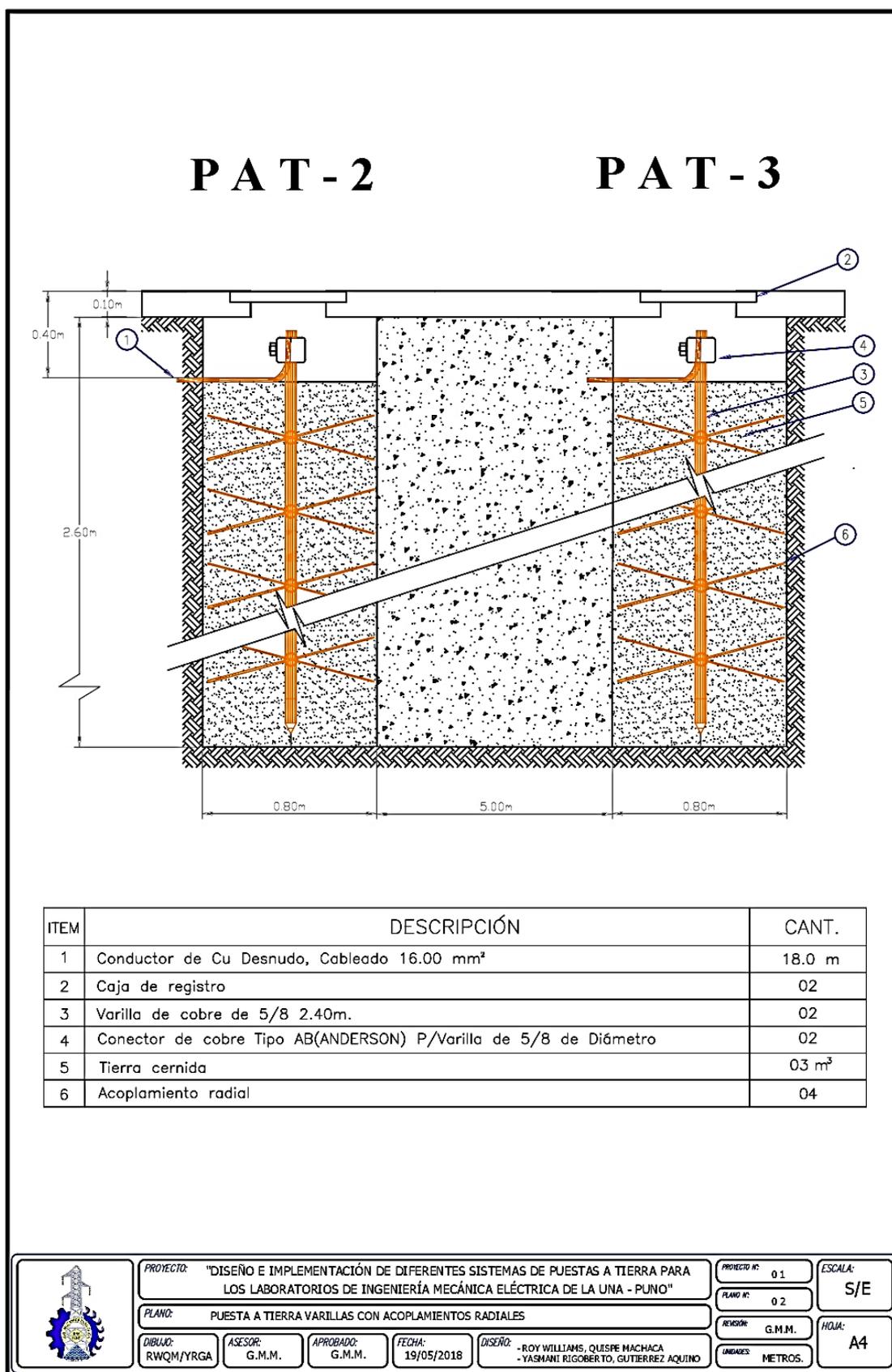
ANEXOS

Anexo N° 1: Varilla Enterrada Directamente (PAT 1)



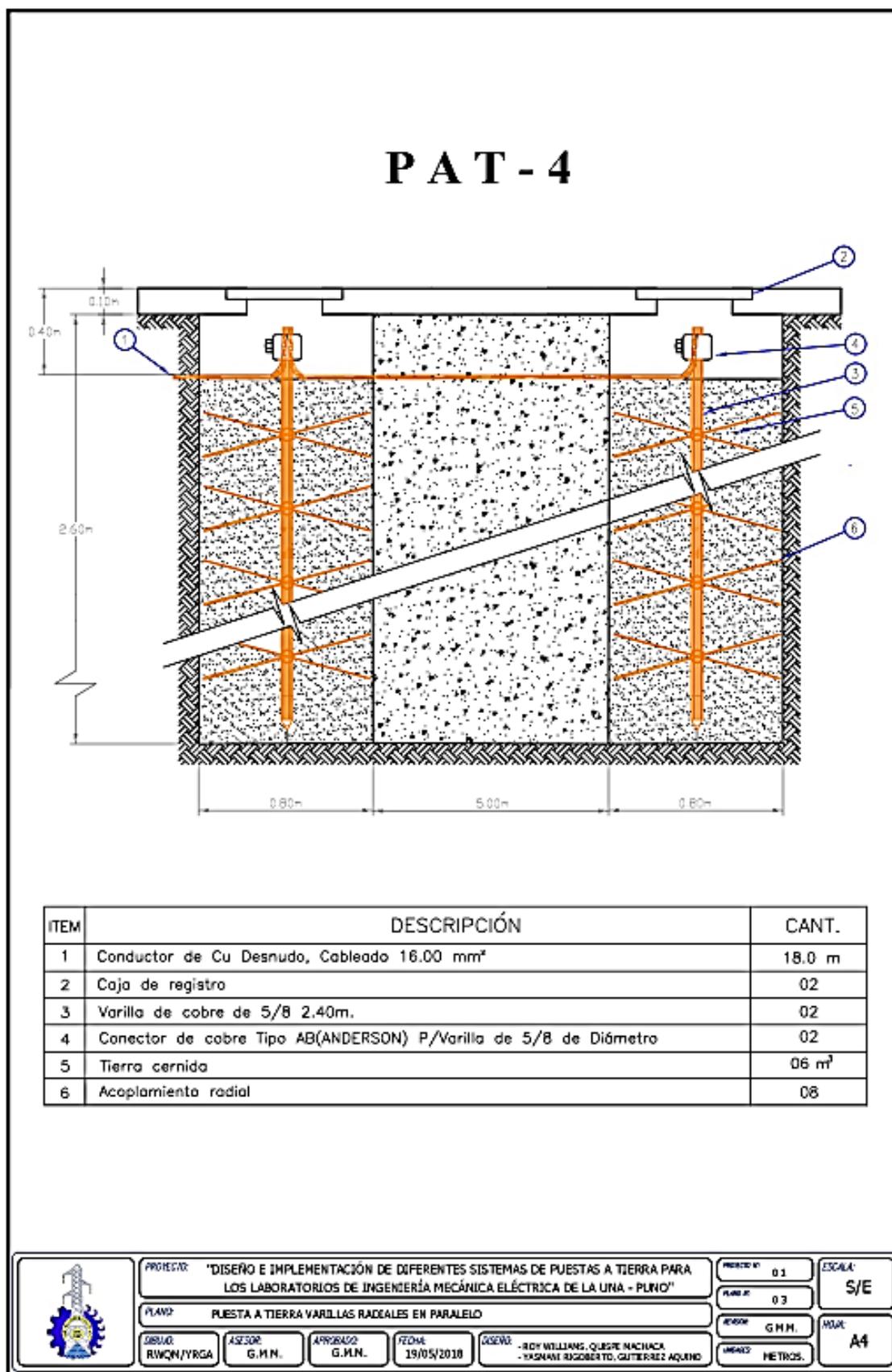
Elaboración: Propia.

Anexo Nº 2: Varilla Con Acoplamientos Radiales (PAT 2 y PAT 3)



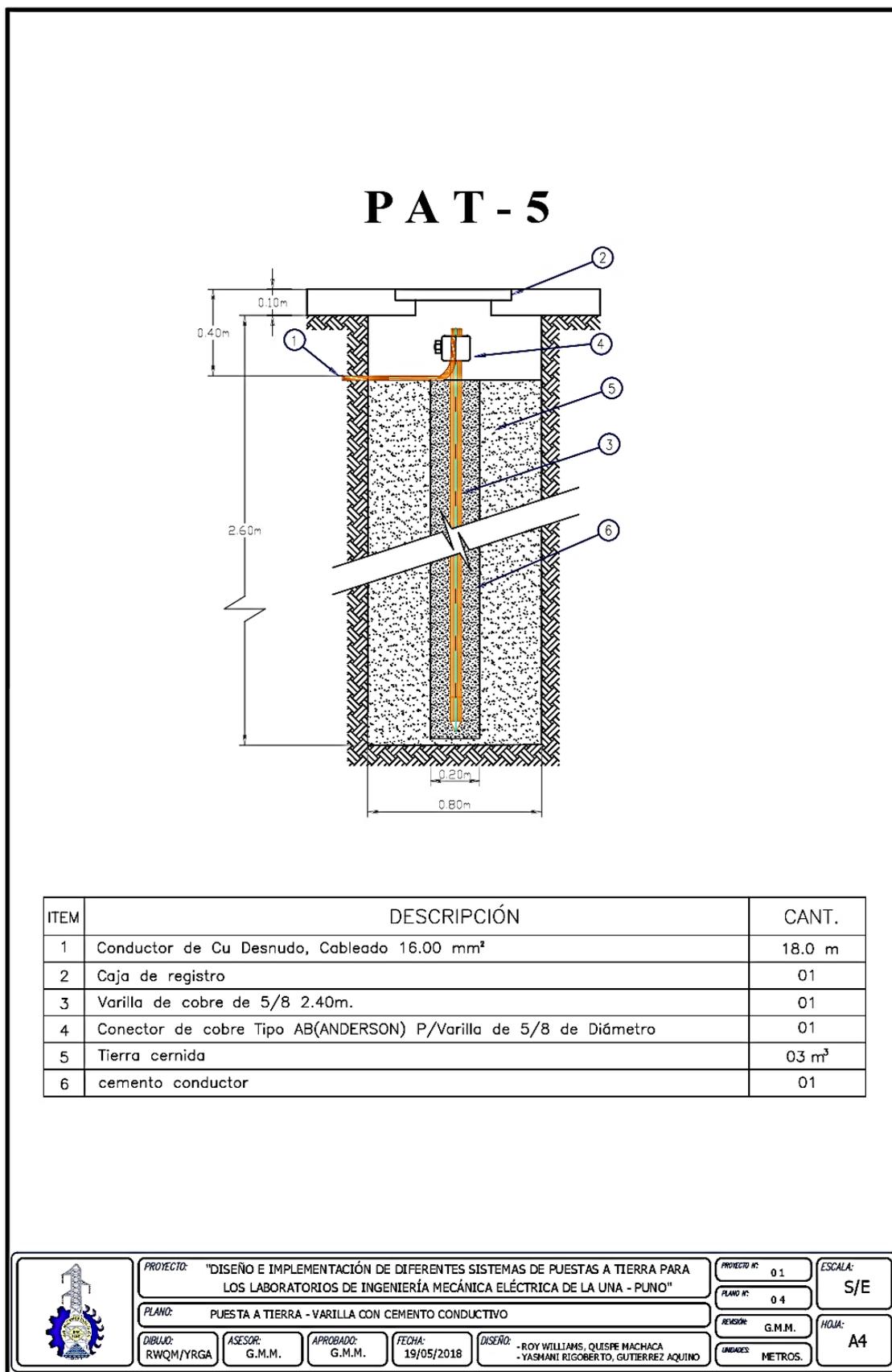
Elaboración: Propia.

Anexo N° 3: Radial en Paralelo (PAT 4)



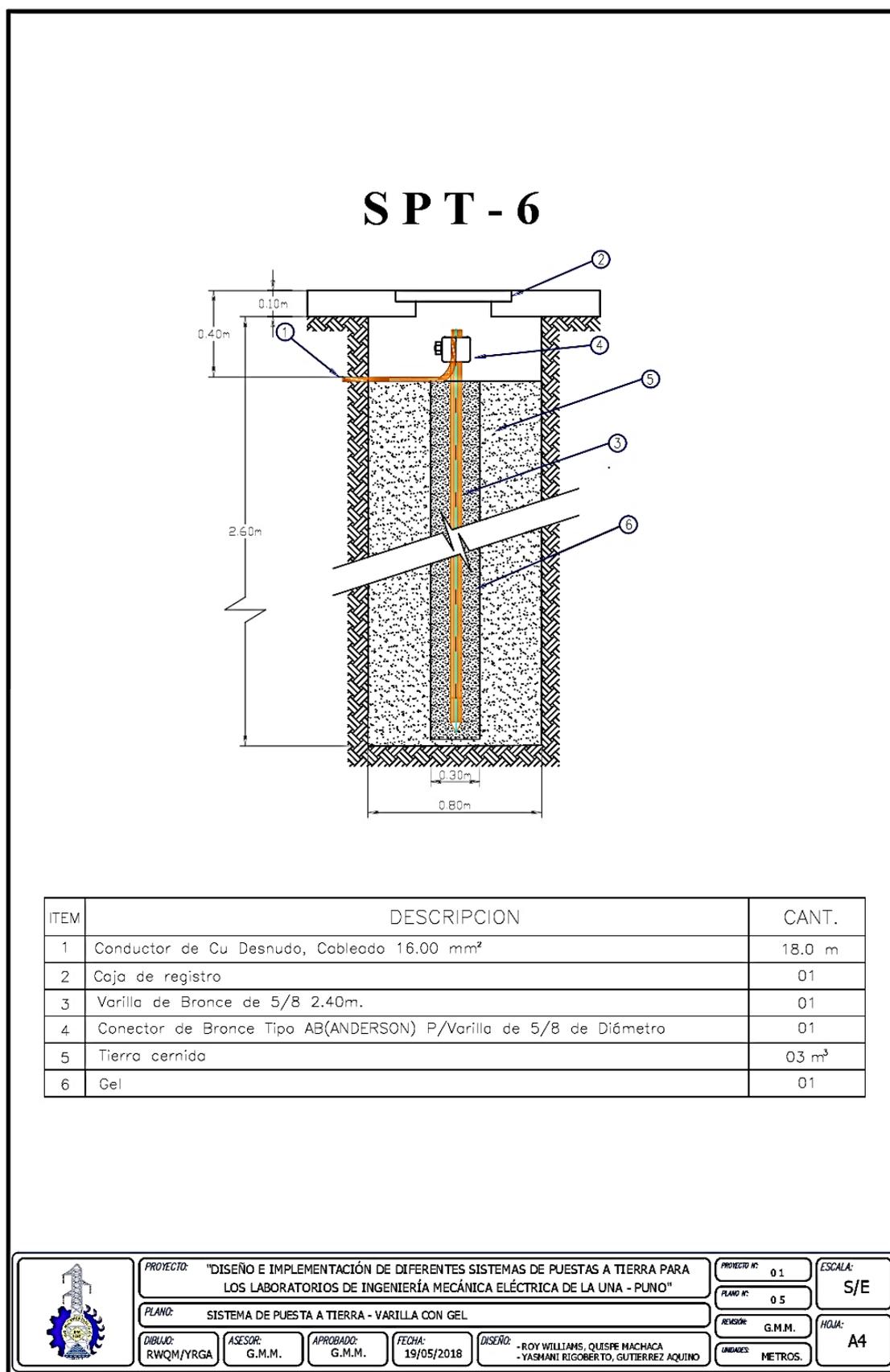
Elaboración: Propia.

Anexo Nº 4: Varilla con Cemento Conductivo (PAT 5)



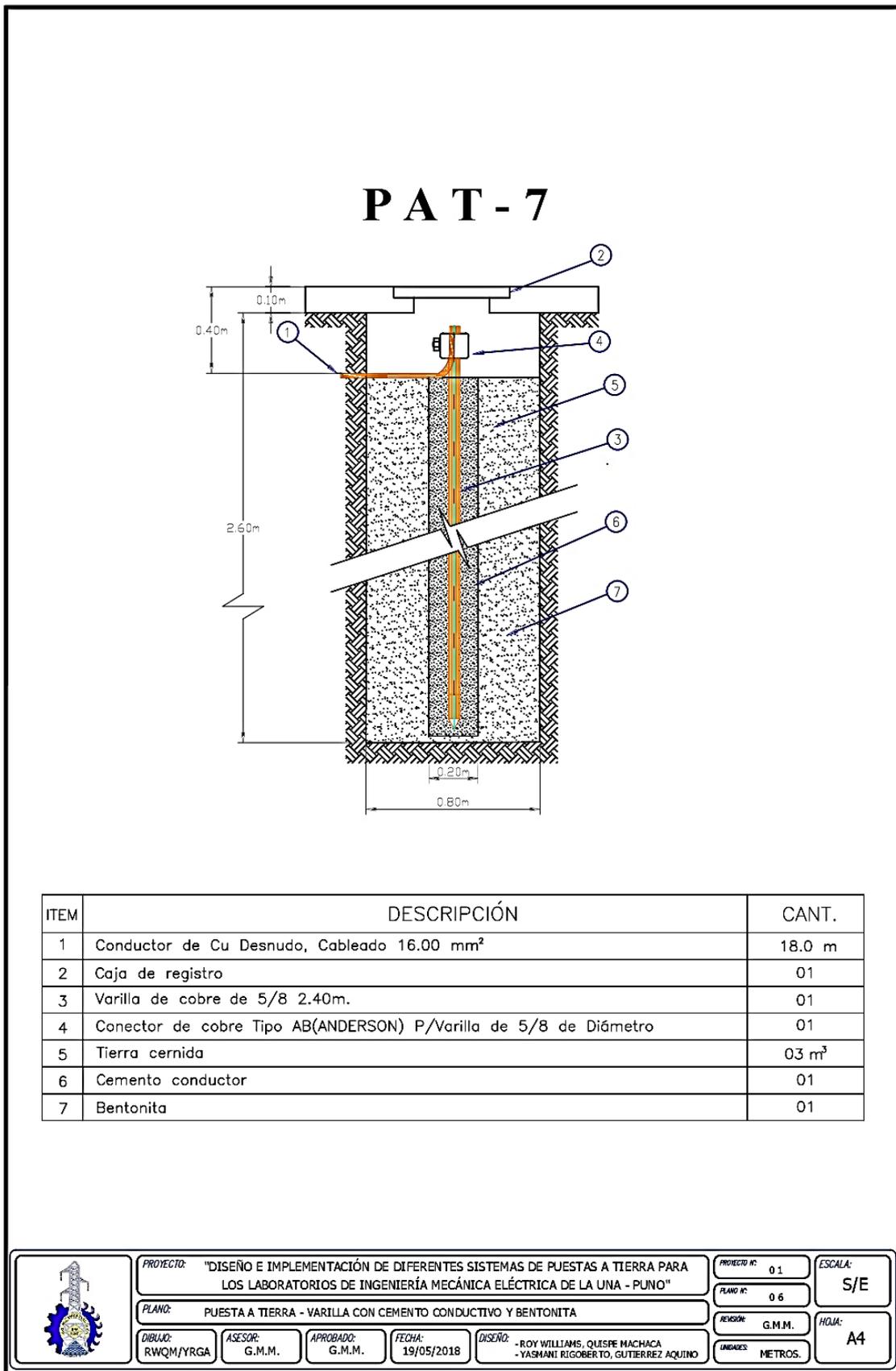
Elaboración: Propia.

Anexo N° 5: Varilla con Gel (PAT 6)



Elaboración: Propia.

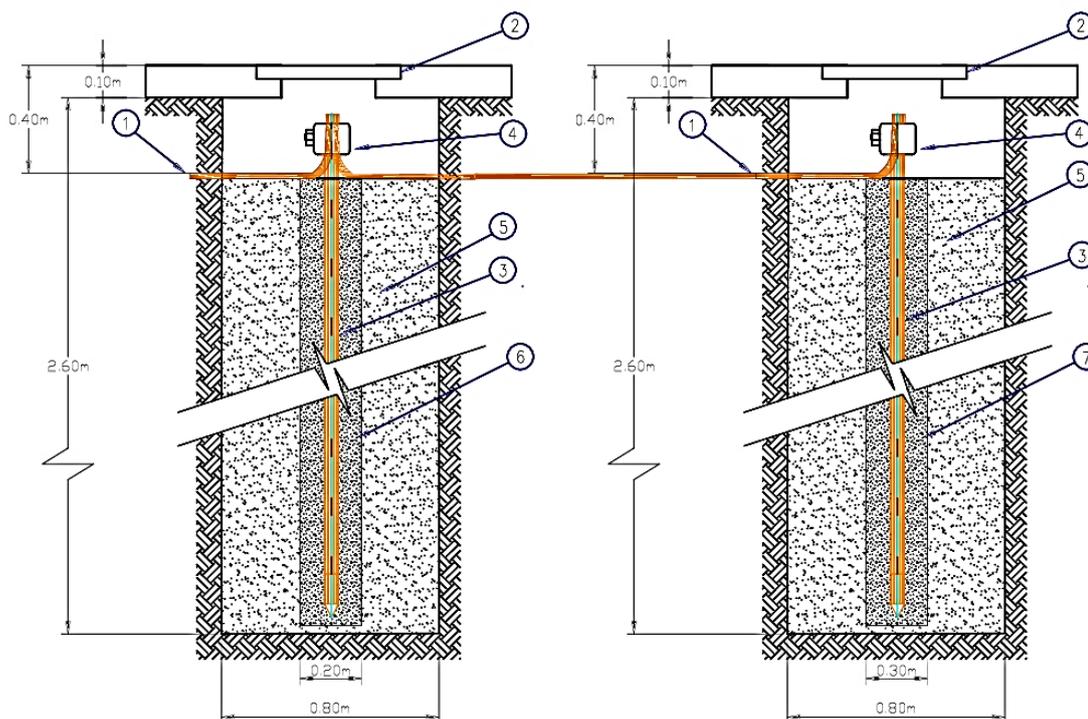
Anexo N° 6: Varilla con Cemento Conductor y Bentonita (PAT 7)



Elaboración: Propia.

Anexo N° 7: SPT 5 más SPT 6 en Paralelo (PAT 8)

PAT - 8



ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	Conductor de Cu Desnudo, Cableado 16.00 mm ²	18.0 m
2	Caja de registro	02
3	Varilla de cobre de 5/8 2.40m.	02
4	Conector de cobre Tipo AB(ANDERSON) P/Varilla de 5/8 de Diámetro	02
5	Tierra cernida	06 m ³
6	Cemento conductor	01
7	Gel	01

	PROYECTO: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA UNA - PUNO"				PROYECTO N°: 01	ESCALA: S/E
	PLANO: P.A.T. - VARILLA CON CEMENTO CONDUCTIVO MAS VARILLA CON GEL EN PARALELO				PLANO N°: 07	
	DIBUJÓ: RWQM/YRGA	ASESOR: G.M.M.	APROBADO: G.M.M.	FECHA: 19/05/2018	DISEÑO: -ROY WILLIAMS, QUESPE MACHACA -YASMANI RIGOBERTO, GUTIERREZ AQUINO	HOJA: A4
					UNIDADES: METROS.	

Elaboración: Propia.

Anexo N° 8: Proceso de Toma de Datos de la Resistividad del suelo



Elaboración: Propia.

Anexo N° 9: Lecturas del perfil 1



Elaboración: Propia.

Anexo N° 10: Lecturas para el perfil 2



Elaboración: Propia.

Anexo N° 11: Lecturas Para el Perfil 3



Elaboración: Propia.

Anexo N° 12: Lecturas Para el Perfil 4



Elaboración: Propia.

Anexo N° 13: Varilla Enterrada Directamente con Tierra Cernida



Elaboración: Propia.

Anexo Nº 14: proceso de instalación de la puesta a tierra con
acoplamiento radiales en paralelo



Elaboración: Propia.

Anexo N° 15: Medición de la Puesta a Tierra con Acoplamientos Radiales en Paralelo



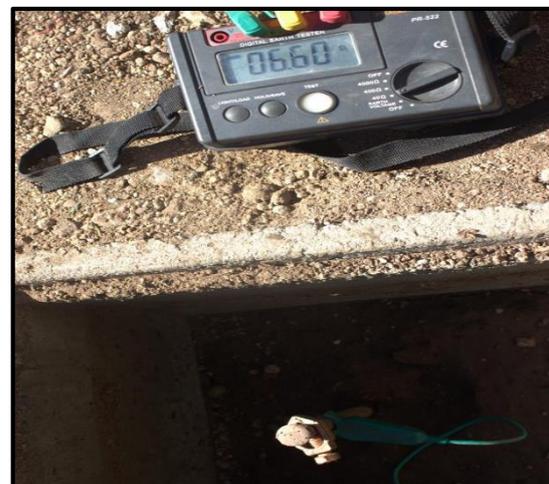
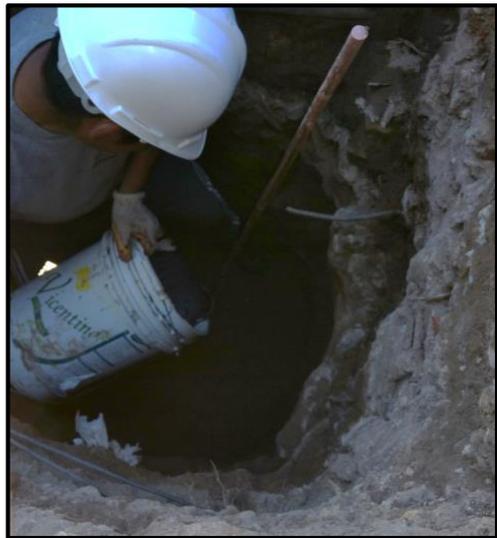
Elaboración: Propia.

Anexo N° 16: Tratamiento de Puesta a Tierra con Cemento Conductivo



Elaboración: Propia.

Anexo N° 17: Aplicación y Medición del Cemento Conductivo



Elaboración: Propia.

Anexo Nº 18: Tratamiento de Puesta a Tierra con Gel



Elaboración: Propia.

Anexo N° 19: Tratamiento de Puesta a Tierra con Cemento Conductivo y Bentonita



Elaboración: Propia.