



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MALLA A TIERRA PARA OBSERVAR SU
FUNCIONALIDAD EN LA VIDA REAL PARA EL LABORATORIO DE ALTO
VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.**

Autores:

Calle Asimbaya Fausto Wladimir.

Vásquez Frutos Oscar Santiago.

Tutor:

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso
Mg.C.

Latacunga – Ecuador

2017



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: **Calle Asimbaya Fausto Wladimir y Vásquez Frutos Oscar Santiago** con el título de Proyecto de Investigación: ***“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MALLA A TIERRA PARA OBSERVAR SU FUNCIONALIDAD EN LA VIDA REAL PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”***. Han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Para constancia firman:

Lector 1
Ing. MSc. Franklin Medina
C.I.: 050125961-8

Lector 2
Ing. MSc. Héctor Barrera
C.I.: 180140820-2

Lector 3
PhD. Iliana González
C.I.: 175707065-9



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Eléctrica

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Calle Asimbaya Fausto Wladimir** y **Vásquez Frutos Oscar Santiago** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “***DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MALLA A TIERRA PARA OBSERVAR SU FUNCIONALIDAD EN LA VIDA REAL PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI***”, siendo **Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado Mg. C.** director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Calle Asimbaya Fausto Wladimir

C.I. 172208054-4

Vásquez Frutos Oscar Santiago

C.I. 180480587-5



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Eléctrica

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MALLA A TIERRA PARA OBSERVAR SU FUNCIONALIDAD EN LA VIDA REAL PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, de Calle Asimbaya Fausto Wladimir y Vásquez Frutos Oscar Santiago, de la carrera de **Ingeniería Eléctrica**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Enero 2017

El Tutor

Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado Mg. C.



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Eléctrica

AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

En calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi certifico que mediante el proyecto de investigación: “***DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MALLA A TIERRA PARA OBSERVAR SU FUNCIONALIDAD EN LA VIDA REAL PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI***”. Los señores **FAUSTO WLADIMIR CALLE ASIMBAYA** y **OSCAR SANTIAGO VÁSQUEZ FRUTOS**, realizan la entrega del prototipo de una subestación con circuitos de malla a tierra para el Laboratorio de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

PhD. Secundino Marrero Ramírez

Director de la Carrera de Ingeniería Eléctrica

AGRADECIMIENTO

Con mucha satisfacción mi agradecimiento primeramente a Dios por darme salud y fuerza para culminar una etapa más de mi vida.

A mi Madre Fabiola, quien con su paciencia, cariño y ternura me ha brindado siempre su apoyo incondicional.

A mi Padre Luis, por su infinito sacrificio para hacer de mí un hombre de bien y quien ha sabido guiarme por el camino correcto.

A mis Hermanas Mayra y Katherin, quienes con su apoyo incondicional siempre estuvieron a mi lado.

A mi Familia y Amigos, quienes siempre estuvieron en los momentos más difíciles de mi carrera.

A mi Tutor de Proyecto Ing. Xavier Proaño y a mi compañero y amigo Santiago, sin los cuales no se hubiera podido culminar este proyecto con éxito.

Al Ing. Carlos Saavedra, que más que un maestro ha sido un amigo incondicional.

Finalmente, un agradecimiento muy especial a la UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI la cual fue una gran fuente de conocimiento, experiencias y nos brindó la oportunidad de superarnos en todo aspecto de nuestra vida.

FAUSTO

AGRADECIMIENTO

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades debo agradecer de manera muy especial y sincera a mis abuelos Víctor y Gloria así como a mi madre Gloria, los cuales han estado siempre presentes, dedicándome su apoyo incondicional durante todo este tiempo, gracias a mi equipo de trabajo, Xavier Proaño (Tutor) y Fausto compañero y amigo sin los cuales no se hubiera podido realizar este proyecto, agradezco a mis maestros los cuales han logrado convertirme en un profesional de lo que me apasiona, en especial a Carlos Saavedra quien ha sido más que un maestro un amigo incondicional en todo momento, así como también agradezco a mis amigos los cuales siempre han tenido una palabra de aliento en mis peores momentos.

Finalmente agradezco a mi Universidad donde he podido conocer a personas muy importantes en mi vida y la cual ha sido como mi segundo hogar donde me he podido formar como un profesional de bien.

OSCAR

DEDICATORIA

En todas las batallas que nos presenta la vida, siempre es importante contar con la ayuda de las personas que nos aman; por esta razón:

Dedico este Proyecto de Titulación a mis padres Luis Calle y Fabiola Asimbaya, los cuales, con su apoyo y dedicación, se esforzaron para darme la oportunidad de ser una mejor persona y un gran profesional. También dedico este proyecto a mi familia quienes fueron un apoyo incondicional a lo largo del desarrollo de mi carrera.

FAUSTO

DEDICATORIA

Dedico este Proyecto de Investigación de manera muy especial a mi padre y abuelo Víctor Frutos a mi madre y abuela Gloria Vaca así como a mi madre Gloria Frutos pues ellos fueron el pilar fundamental para culminar mis estudios, a ellos quienes se han velado por mi bienestar y educación en todo momento, también lo dedico a mi tío Sandro y a mi tía María, los cual han estado conmigo cuando más los he necesitado así como a mi primo Merwin quien es como un hermano y me ha apoyado en todo momento, y, a todas esas personas que no creyeron en mí y jamás pensaron que podría llegar a cumplir este objetivo de mi vida.

OSCAR

INDICE

Contenido

| | |
|---|--------------------------------------|
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN | ¡Error! Marcador no definido. |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | ¡Error! Marcador no definido. |
| AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN | ¡Error! Marcador no definido. |
| AGRADECIMIENTO..... | vii |
| DEDICATORIA | viii |
| INDICE..... | x |
| INDICE DE FIGURAS..... | xiv |
| INDICE DE TABLAS | xv |
| RESUMEN | xvi |
| ABSTRACT..... | xvii |
| AVAL DE TRADUCCIÓN | ¡Error! Marcador no definido. |
| 1. INFORMACIÓN GENERAL | 1 |
| Título del Proyecto..... | 1 |
| Fecha de inicio..... | 1 |
| Fecha de finalización..... | 1 |
| Lugar de ejecución..... | 1 |
| Unidad Académica que auspicia..... | 1 |
| Carrera que auspicia..... | 1 |
| Proyecto de investigación vinculado..... | 1 |
| Equipo de Trabajo..... | 1 |
| Área de Conocimiento..... | 2 |
| Línea de investigación..... | 2 |
| Sub líneas de investigación de la Carrera..... | 2 |

| | | |
|----|---|----|
| 2. | RESUMEN DEL PROYECTO. | 2 |
| 3. | JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO. | 3 |
| 4. | BENEFICIARIOS DEL PROYECTO..... | 4 |
| | Beneficiarios Directos. | 4 |
| 5. | EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN. | 4 |
| 6. | OBJETIVOS. | 4 |
| | Objetivo General | 4 |
| | Objetivos Específicos | 4 |
| 7. | ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS. | 5 |
| 8. | FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA. | 5 |
| | SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA. | 5 |
| | DEFINICIÓN DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. | 5 |
| | NECESIDAD DE LA PUESTA A TIERRA. | 6 |
| | PARTES BÁSICAS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. | 7 |
| | TOMA DE TIERRA. | 7 |
| | CONDUCTOR A TIERRA. | 7 |
| | COLECTOR DE TIERRA. | 8 |
| | MALLA DE TIERRA. | 8 |
| | TIERRA. | 8 |
| | ELECTRODO O PICAS. | 8 |
| | TIPOS DE SOBREVOLTAJE Y SEÑALES PERJUDICIALES PARA EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN. | 8 |
| | SOBREVOLTAJES. | 8 |
| | TIPO DE SOBREVOLTAJES | 8 |
| | FALLAS POR CORTOCIRCUITO. | 10 |

| | |
|---|----|
| INFLUENCIA DE CORRIENTES PELIGROSAS EN LAS PERSONAS. | 10 |
| VOLTAJE DE PASO. | 11 |
| VOLTAJE DE TOQUE. | 11 |
| FACTORES NATURALES DEL TERRENO QUE INFLUYEN EN LA PUESTA A TIERRA. | 12 |
| RESISTIVIDAD. | 12 |
| IMPORTANCIA Y CLASIFICACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA. | 14 |
| TIPOS DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. | 14 |
| 9. PREGUNTAS CIENTIFICAS O HIPOTESIS. | 16 |
| 10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL. | 16 |
| Métodos Generales. | 16 |
| Métodos Experimental. | 16 |
| Métodos Específicos. | 17 |
| Método Histórico. | 17 |
| Método Documental. | 17 |
| Método Descriptivo. | 17 |
| TÉCNICAS. | 17 |
| Lectura comprensiva. | 17 |
| Modelamiento. | 17 |
| Interpretación de información. | 17 |
| Sintetizar de información. | 18 |
| Experimentación de exploración. | 18 |
| 11. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. | 18 |
| CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO. | 18 |
| Subestación Eléctrica. | 18 |
| Torre de Transmisión. | 19 |
| Pórtico de llegada. | 19 |

| | |
|--|----|
| Barras..... | 20 |
| Aisladores..... | 21 |
| Pararrayos..... | 21 |
| Transformadores de Potencial (Tp)..... | 22 |
| Transformadores de Corriente (Tc)..... | 23 |
| Seccionadores..... | 23 |
| Interruptores..... | 24 |
| Transformador de Suelda TRUPER..... | 25 |
| Resistencias de Potencia..... | 26 |
| VOLTAJE DE PASO Y VOLTAJE DE TOQUE..... | 26 |
| Resistividad del Terreno..... | 27 |
| Resistencia del Cuerpo Humano..... | 29 |
| 12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES)..... | 47 |
| IMPACTO TÉCNICO..... | 47 |
| IMPACTO SOCIAL..... | 47 |
| 13. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO..... | 48 |
| 14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 48 |
| CONCLUSIONES..... | 48 |
| RECOMENDACIONES..... | 48 |
| 15. BIBLIOGRAFIA..... | 49 |
| ANEXOS..... | 50 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Puesta a tierra en una subestación. | 6 |
| Figura 2. Relación entre el tipo de sobretensión, la duración y el valor máximo. | 9 |
| Figura 3. Voltaje de paso..... | 11 |
| Figura 4. Voltaje de Toque..... | 12 |
| Figura 5. Esquema del método de Wenner. | 13 |
| Figura 6. Electrodo único de conexión a tierra. | 15 |
| Figura 7. Varios electrodos conectados entre sí..... | 15 |
| Figura 8. Red de mallas..... | 16 |
| Figura 9. Placa de conexión a tierra | 16 |
| Figura 10. Prototipo de una Subestación eléctrica de Barra Simple. | 18 |
| Figura 11. (A) Torre eléctrica– (B) Prototipo torre eléctrica. | 19 |
| Figura 12. (A) Pórtico de llegada – (B) Prototipo pórtico de llegada. | 20 |
| Figura 13. (A) Barras de una subestación eléctrica – (B) Prototipo barras Subestación eléctrica. | 20 |
| Figura 14. (A) Aisladores de porcelana – (B) Prototipo aisladores. | 21 |
| Figura 15. (A) Pararrayo PEXLIM PX VX245 – (B) Prototipo Pararrayos..... | 21 |
| Figura 16. (A)TP cpb 245 – (B) Prototipo TP´s. | 22 |
| Figura 17. (A)Tc IBM 245 – (B) Prototipo TC´s..... | 23 |
| Figura 18. (A) Seccionador GW 55 – (b) Prototipo Seccionadores. | 24 |
| Figura 19. (a) Interruptor LTB E1 – (B) Prototipo interruptores. | 24 |
| Figura 20. Transformador de suelda Truper. | 25 |
| Figura 21. Resistencias de Potencia de diversos valores. | 26 |
| Figura 22. Humedad en % referida a Terreno Seco | 28 |
| Figura 23. Humedad en % referida a Terreno Seco | 28 |
| Figura 24. Recorridos de la Corriente en el Cuerpo Humano | 30 |
| Figura 25. Simulación del Voltaje de Paso en la Vida real con un diseño óptimo de la malla de tierra..... | 31 |
| Figura 26. Simulación del Voltaje de Paso en la Vida real con un mal diseño de la malla de tierra. | 31 |
| Figura 27. Circuito del Voltaje de Paso, malla 5 Ω | 32 |
| Figura 28. Circuito del Voltaje de Paso, malla 15 Ω | 32 |
| Figura 29. Simulación del Voltaje de Toque en la Vida real con un diseño óptimo de la malla de tierra. .. | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 30. Simulación del Voltaje de Toque en la Vida real con un mal diseño de la malla de tierra. | 39 |
| Figura 31. Circuito del Voltaje de Toque, malla 5 Ω | 40 |
| Figura 32. Circuito del Voltaje de Toque, malla 15 Ω | 40 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados. | 5 |
| Tabla 2. Efectos de la corriente en el organismo | 10 |
| Tabla 3. Relación del voltaje de contacto según las condiciones de la piel. | 10 |
| Tabla 4. Características del Primario del Transformador. | 25 |
| Tabla 5. Características del Secundario del Transformador | 25 |
| Tabla 6. Valores máximos de puesta a tierra | 26 |
| Tabla 7. Resistividad según la Naturaleza del Terreno..... | 27 |
| Tabla 8. Cálculos de Voltajes y Corrientes de Paso con una malla de 5 Ω | 33 |
| Tabla 9. Cálculo de Voltajes y Corrientes de Paso con una malla de 15 Ω | 33 |
| Tabla 10. Cálculo de Voltajes y Corrientes de Toque con una malla de 5 Ω | 41 |
| Tabla 11. Cálculo de Voltajes y Corrientes de Toque con una malla de 15 Ω | 41 |

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “Diseño de un prototipo de malla a tierra para observar su funcionalidad en la vida real para el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi”

Autores: Calle Asimbaya Fausto Wladimir
Vásquez Frutos Oscar Santiago

RESUMEN

Según estudios y utilizando normas existentes como la Norma IEEE STD 80-2000 de mallas de puesta a tierra en Subestaciones Eléctricas, como también en construcciones e implementaciones de sistemas de mallas de puesta a tierra los cuales son de vital importancia en subestaciones eléctricas para protección de los diferentes equipos y aparatos de medición, transformación y control de estas. La construcción del prototipo de mallas a tierra fue realizado con la finalidad de demostrar las variaciones del potencial de toque y de paso, que ocurren al momento de suscitarse un sobrevoltaje ya sea interno o externo, de esta manera logramos medir el voltaje y corriente en cada uno de los casos, las simulaciones de los circuitos de los voltajes de toque y de paso se realizaron el software MATLAB-SUMULINK de acuerdo a la Norma IEEE STD 80-2000, el proyecto se basó en un conjunto de metodologías para garantizar su funcionamiento, para la implementación de los circuitos estudiados se realizó dos casos, en el primer caso se utilizó una resistencia de la malla óptima y para el segundo caso se lo realizó cuando tenemos una resistencia de malla fuera de los rangos que establecen las normas, también se utilizó tres diferentes resistividades de terreno. En el prototipo se diseñó dos zonas de estudio, en la primera se logró medir el voltaje y la corriente de paso, y en la segunda el voltaje y la corriente de toque, se obtuvo como resultado que la malla que cumple con los parámetros de seguridad según dicha norma es mucho más eficiente que la malla que no cumple con dichos parámetros.

Palabras clave: voltaje de paso, voltaje de toque.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY
ACADEMIC UNIT OF ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED

TITLE: “Design of a prototype of mesh to ground to observe its functionality in the real life for the high voltage laboratory of the Cotopaxi Technical University”

Authors: Calle Asimbaya Fausto Wladimir
Vásquez Frutos Oscar Santiago

ABSTRACT

According to studies and using existing standards such as the IEEE Standard STD 80-2000 for grounding meshes in Electrical Substations, as well as in constructions and implementations of grounding grid systems which are of vital importance in electrical substations for protection of the different equipment and apparatus of measurement, transformation and control of these. The construction of the prototype of ground meshes was carried out with the purpose of demonstrating the variations of the potential of touch and of passage, that happen to the moment of provoking an overvoltage either internal or external, in this way we were able to measure the voltage and current in each One of the cases, the simulations of the circuits of the touch and step voltages were performed MATLAB-SUMULINK software according to the IEEE STD 80-2000 standard, the project based on a set of methodologies to ensure its operation, For the implementation of the circuits studied two cases were performed, in the first case an optimum mesh resistance was used and for the second case we performed it when we have a mesh resistance outside the ranges established by the standards, it was also used Three different terrain resistivity's. In the prototype, two study areas were designed, the first one was able to measure the voltage and the current of passage, and in the second the voltage and the touch current, was obtained that the mesh that meets the safety parameters According to this rule is much more efficient than the mesh that does not meet these parameters.

Keywords: step voltage, touch voltage



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO CULTURAL DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de docente del Idioma Inglés del Centro Cultural de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal CERTIFICO que: la traducción del resumen de Proyecto de investigación al idioma inglés presentando por los señores de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad CIYA: **Calle Asimbaya Fausto Wladimir** con número de cedula **172208054-4** y **Vásquez Frutos Oscar Santiago** con numero de cedula **180480587-5**, cuyo título versa ***“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MALLA A TIERRA PARA OBSERVAR SU FUNCIONALIDAD EN LA VIDA REAL PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”***, lo realizo bajo mi supervisión y cumple con una correcta escritura gramatical del idioma

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Enero 2017

Atentamente,

MSc. Edison Marcelo Pacheco Pruna

DOCENTE CENTRO CULTURAL DE IDIOMAS

CC: 050261735 – 0

1. INFORMACIÓN GENERAL.

Título del Proyecto.

Diseño de un prototipo de malla a tierra para observar su funcionalidad en la vida real para el Laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Fecha de inicio.

04 de Abril del 2016

Fecha de finalización.

09 de Enero del 2017

Lugar de ejecución.

Provincia de Cotopaxi, Ciudad de Latacunga, Parroquia Eloy Alfaro, Universidad Técnica de Cotopaxi.

Unidad Académica que auspicia.

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia.

Ingeniería Eléctrica

Proyecto de investigación vinculado.

Educación

Equipo de Trabajo.

Tutor de Titulación

Nombres y Apellidos: Xavier Alfonso Proaño Maldonado

Fecha de Nacimiento: 20 – 10 – 1985

Cédula de Ciudadanía: 0502656424

Estado Civil: Soltero

Números Telefónicos: 0979645465 / 032 663 638

E – mail: xavier.proano@utc.edu.ec

Coordinadores del Proyecto

Nombres y Apellidos: Fausto Wladimir Calle Asimbaya

Fecha de Nacimiento: 30 – 07 – 1990

Cédula de Ciudadanía: 172208054-4

Estado Civil: Soltero

Números Telefónicos: 0998262055 / 022 389 202

E – mail: wlady_electrico300790@yahoo.es

Nombres y Apellidos: Oscar Santiago Vásquez Frutos

Fecha de Nacimiento: 27 – 06 – 1991

Cédula de Ciudadanía: 180480587-5

Estado Civil: Soltero

Números Telefónicos: 0992554221 / 032 827 365 / 0996958547

E – mail: santurse666@hotmail.com

Área de Conocimiento.

Sistemas Eléctricos de Potencia

Línea de investigación.

Explotación de sistemas eléctricos.

Sub líneas de investigación de la Carrera.

Alto Voltaje

2. RESUMEN DEL PROYECTO.

Según estudios y utilizando normas existentes como la Norma IEEE STD 80-2000 de mallas de puesta a tierra en Subestaciones Eléctricas, como también en construcciones e implementaciones de sistemas de mallas de puesta a tierra los cuales son de vital importancia en subestaciones eléctricas para protección de los diferentes equipos y aparatos de medición, transformación y control de estas. La construcción del prototipo de mallas a tierra fue realizado con la finalidad de

demostrar las variaciones del potencial de toque y de paso, que ocurren al momento de suscitarse un sobrevoltaje ya sea interno o externo, de esta manera logramos medir el voltaje y corriente en cada uno de los casos, las simulaciones de los circuitos de los voltajes de toque y de paso se realizaron el software MATLAB-SUMULINK de acuerdo a la Norma IEEE STD 80-2000, el proyecto se basó en un conjunto de metodologías para garantizar su funcionamiento, para la implementación de los circuitos estudiados se realizó dos casos, en el primer caso se utilizó una resistencia de la malla óptima y para el segundo caso se lo realizó cuando tenemos una resistencia de malla fuera de los rangos que establecen las normas, también se utilizó tres diferentes resistividades de terreno. En el prototipo se diseñó dos zonas de estudio, en la primera se logró medir el voltaje y la corriente de paso, y en la segunda el voltaje y la corriente de toque, se obtuvo como resultado que la malla que cumple con los parámetros de seguridad según dicha norma es mucho más eficiente que la malla que no cumple con dichos parámetros.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

El nombre de Puesta a Tierra se da por el hecho de que, en la práctica se debe realizar una conexión de resistencia muy baja desde el sistema eléctrico hasta la tierra física, dichos sistemas de puesta a tierra, contribuyen de forma importante a la protección y el buen funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica. Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos necesitan estar conectados a una red de puesta a tierra como medio de protección contra disturbios o transitorios inestimables (descargas electrostáticas, descargas atmosféricas, interferencia electromagnética y errores humanos). Por tal motivo la aplicación de la norma IEEE 80-2000, la cual nos permite obtener niveles seguros de tensiones de paso y de toque dentro del área cercada y en sus proximidades, además nos permite mejorar los aspectos técnicos y así tener un sistema de puesta a tierra que garantice la seguridad de las personas, animales y bienes que se encuentran en las cercanías. Se busca mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas, con las cuales se pretende resguardar al personal de cualquier choque eléctrico. Con la implementación del sistema se busca proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, contribuyendo a un buen desempeño de los sistemas de protección y su correcta operación. El sistema de puesta a tierra es de suma importancia en la operación normal de los sistemas de energía eléctrica, con un diseño apropiado, aplicando las normas técnicas correctas en su fase de construcción y con un mantenimiento preventivo este nos brindará: Protección contra las descargas

atmosféricas en lugares que puedan ocasionar algún accidente y protección de sobretensiones contra los equipos eléctricos.

Considerando lo expuesto en el análisis anterior es viable el trabajo de investigación propuesto.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.

Los beneficiarios del prototipo de malla a tierra son:

Beneficiarios Directos.

De manera directa son los docentes y estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi los cuales se verán beneficiados al poder medir voltajes y corrientes que se disipan por la malla a tierra, variándola resistencia de la malla y la resistividad del terreno.

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

La malla de puesta a tierra es un elemento que permite salvaguardar la integridad física de las personas, protegiéndoles de corrientes peligrosas que se puedan suscitar en la subestación debido a sobrevoltajes causados por descargas atmosféricas, esta malla evita que existan diferencias de potenciales peligrosas en la superficie de la subestación.

¿Cómo poder demostrar que los voltajes de toque y de paso que circulan por la persona varía en función de las resistencias que se presentan en la malla a tierra?

6. OBJETIVOS.

Objetivo General

Simular la variación de la resistencia de la malla de tierra para la obtención de los voltajes de toque y de paso en el prototipo de una subestación.

Objetivos Específicos

- Recopilar información sobre los sistemas de malla de puesta a tierra y los fenómenos que se pueden presentar.
- Simular los circuitos equivalentes que permitan demostrar a diferencia de potencial de paso y de toque en el software Matlab - Simulink.
- Demostrar las variaciones relacionadas al potencial de paso y toque cuando se varían los parámetros de resistividad del terreno.

- Analizar del impacto técnico y social que tiene este proyecto.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.

Tabla 1. Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados.

| Objetivo | Actividad | Resultado de la actividad | Medios de Verificación |
|--|---|---|---|
| Recopilar información sobre los sistemas de malla de puesta a tierra y los fenómenos que se pueden presentar. | Búsqueda de información de los sistemas de malla de puesta a tierra. | Tener una base de información para el diseño del prototipo. | Tablas y Figuras. |
| Simular los circuitos equivalentes que permitan demostrar a diferencia de potencial de paso y de toque en el software Matlab - Simulink. | Simular los circuitos en el software. | Simulación de los circuitos que permitan demostrar como varia el potencial de paso y de toque al cambiar los parámetros de resistencia en la malla. | Software Matlab – Simulink |
| Demostrar las variaciones relacionadas al potencial de paso y toque cuando se varían los parámetros de resistividad del terreno. | Construcción del prototipo para medir el potencial de paso y de toque en una persona. | Mediciones de los potenciales de paso y de toque de los circuitos realizados. | Multímetro, resistencias de potencia, suelda, cautín. |

Elaborado por. Coordinadores del proyecto.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.

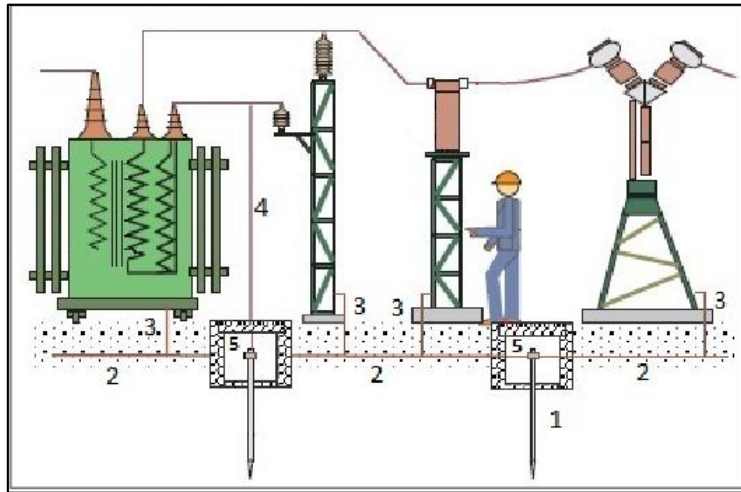
SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA.

DEFINICIÓN DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

El sistema de puesta a tierra es el conjunto de piezas diseñadas de tal manera que estas cumplan con la aplicación de conocimientos científicos y tecnológicos, pero también de conocimientos empíricos comprobados encaminados hacia la eficiente, segura y económica utilización de la tierra como elemento eléctrico para diversos fines.

El sistema de puesta a tierra se ocupa de la eficiente, segura y económica transmisión de corrientes eléctricas, de distinta naturaleza, hacia la tierra en las instalaciones eléctricas en el caso que se produjera una falla en el sistema.

Figura 1. Puesta a tierra en una subestación.



Fuente. Publicación Técnica Schneider, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra.

En la **figura 1**, se observa la conexión a tierra de todos los equipos que constituyen una subestación eléctrica.

NECESIDAD DE LA PUESTA A TIERRA.

Un buen sistema de puesta a tierra es necesario para mantener buenos niveles de seguridad del personal, operación de los equipos y desempeño de los mismos. En sistemas de potencia la puesta a tierra mantiene la referencia necesaria. La forma en que el sistema se conecta a tierra puede tener un gran efecto en la magnitud de los voltajes de línea a tierra que deben ser mantenidos en condiciones normales y bajo condiciones transitorias. En sistemas no puestos a tierra, algunas tensiones pueden provocar fallas en el aislamiento de los equipos y sistemas. La puesta a tierra del neutro del sistema permite la operación de sistemas de protección basados en la detección de corrientes que circulan por la misma, despejándose así el circuito bajo falla.

La puesta a tierra de los equipos se refiere a la conexión intencional de las carcasas, bastidores o estructuras metálicas no portadores o transmisores de corriente de los mismos, para lograr los siguientes propósitos:

- Mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas con lo que se busca resguardar al personal de cualquier choque eléctrico. En el momento de una falla de un elemento energizado a un bastidor, por ejemplo, el voltaje de dicho bastidor tiende a igualarse al del conductor energizado, si el primero no está debidamente conectado a tierra;

constituyendo un peligro para el personal del área. Por supuesto, esto debe combinarse con buenos relés de protección de falla a tierra.

- Contribuir a un mejor desempeño de los sistemas de protección.
- Evitar incendios provocados por materiales volátiles o la combustión de gases al proveer un camino efectivo y seguro para la circulación de corrientes de falla y descargas atmosféricas y estáticas y así eliminar los arcos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos, que pueden provocar tales incendios.
- Buen desempeño de equipos. En los sistemas o redes de computación una buena puesta a tierra no sólo mantiene la seguridad del personal y provee de un camino de baja impedancia para las corrientes de falla, sino que también mantiene el mismo nivel de potencial de tierra en todas las unidades del sistema, si estas están conectadas entre sí a tierra al mismo tiempo. Si se tienen varios sistemas de alimentación en AC, cada uno con su tierra separada se puede producir ruido en el sistema de tierra conectado a las computadoras. En este caso se utiliza una malla de referencia de señales para igualar el voltaje en un mayor rango de frecuencia. Las carcasas de las computadoras se conectarán a esta malla y a la barra de tierra del sistema. La malla se conectará también a la barra de tierra principal.

Estas son, entre otras, las razones de la necesidad de un buen sistema de puesta a tierra, así como de su mantenimiento. (AGULLEIRO & MARTINEZ)(p.60) 2005.

PARTES BÁSICAS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

TOMA DE TIERRA.

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

CONDUCTOR A TIERRA.

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

COLECTOR DE TIERRA.

Es un conductor puesto a tierra que se encarga de la comunicación del sistema exterior con la barra equipotencial, para de ahí distribuirse a los equipos. Estos conductores también se encargan de unir las masas al neutro de la red o a otras masas, a ciertos elementos metálicos distintos de las masas o a un relé de protección (Diferencial entre tierra y el sistema).

MALLA DE TIERRA.

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

TIERRA.

“Es el cuerpo capaz de mantener estable su potencial, sin importar la cantidad de cargas eléctricas que se le inyecten, absorbiendo y disipando las corrientes indeseables, brindando protección y limitando los problemas de ruido y diafonía, adicionalmente sirve de referencia eléctrica (voltaje cero)”. (UTE, 2010)

ELECTRODO O PICAS.

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

TIPOS DE SOBREVOLTAJE Y SEÑALES PERJUDICIALES PARA EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN.

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

SOBREVOLTAJES.

“Todo aumento de voltaje capaz de poner en peligro el material o el buen funcionamiento de una instalación eléctrica, además un sobrevoltaje provoca otros sobrevoltajes.” (ELECTROTECNIA – INDUSTRIA, 2003)

TIPO DE SOBREVOLTAJES

Sobrevoltajes temporales

Son de larga duración (desde varios milisegundos a varios segundos), poco amortiguadas y de frecuencia igual o próxima a la de operación.

- Fallo del aislamiento.
- Pérdida brusca de carga.
- Resonancia y ferro resonancia.

Sobrevoltajes de frente lento

Son de corta duración (pocos milisegundos), fuertemente amortiguadas y se presentan con una gama de frecuencias que varía entre 2 y 20kHz.

- Energización y reenganche de líneas.
- Cortocircuitos y eliminación de cortocircuitos.
- Maniobras con corrientes inductivas o capacitivas.
- Pérdida brusca de carga.

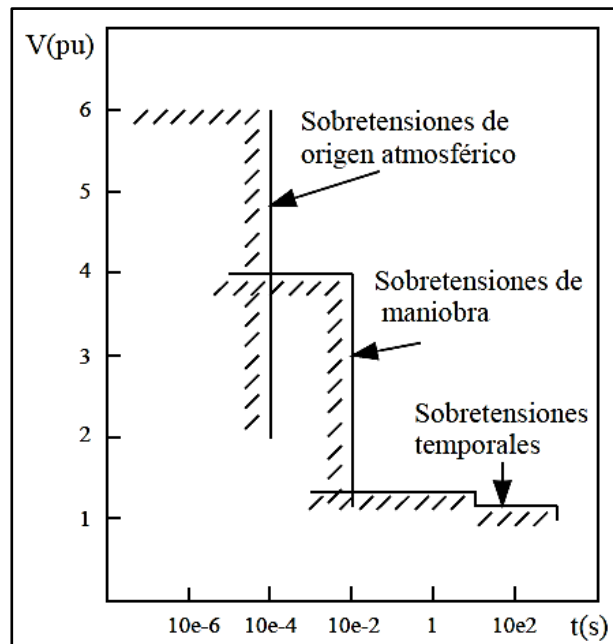
Sobrevoltajes de frente rápido

Son generalmente unidireccionales, de duración muy corta y amplitud muy superior a la tensión de cresta nominal.

- Sobretensiones por rayos en líneas aéreas
- Sobretensiones por rayos en estaciones receptoras
- Maniobras y cortocircuitos.

En la **figura 2**, se observa la relación entre el voltaje (v) en pu y el tiempo (t).

Figura 2. Relación entre el tipo de sobretensión, la duración y el valor máximo.



Fuente. (TORREBLANCO, 2014).

FALLAS POR CORTOCIRCUITO.

“En función de la duración de la falla (tiempo de existencia sin despeje por los órganos de protección), la corriente de cortocircuito puede presentar tres valores característicos, subtransiente (no más de 0,1 seg), transiente (entre 0.1 y 0,3 seg.) y permanente (luego de transcurrido más de 0,3 seg.)”. (GONZÁLEZ, 2003)

INFLUENCIA DE CORRIENTES PELIGROSAS EN LAS PERSONAS.

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

Tabla 2. Efectos de la corriente en el organismo

| Intensidad mA, C.A., 50 o 60 Hz | | Efecto en el organismo |
|---------------------------------|-------|---|
| Hombre | Mujer | |
| 0.4 | 0.4 | Ninguna sensación |
| 0.5 | 0.5 | Umbral de percepción |
| 9 | 6 | Pérdida de control muscular en el 0.5 % de la población |
| 16 | 10.5 | Pérdida de control muscular en el 50 % de la población |
| 20 – 30 | | Posibilidad de asfixia |
| $116/\sqrt{t}$ | | Fibrilación de corazón (t representa el tiempo de exposición el cual puede ser mayor a 0.083 s y menor a 5 s. |

Fuente. (Enríquez Harper, 2004).

En la **tabla 2**, se observa que si la corriente y el tiempo de exposición aumentan los efectos son mucho más dañinos para el cuerpo dependiendo del género de la persona que está expuesta a esto.

Tabla 3. Relación del voltaje de contacto según las condiciones de la piel.

| Voltaje de contacto (V) | Condiciones | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|
| | Seca | | Húmeda | | mojada | | Sumergida | |
| | R (Ω) | I (mA) | R (Ω) | I (mA) | R (Ω) | I (mA) | R (Ω) | I (mA) |
| 10 | 7000 | 1,4 | 3500 | 3 | 1200 | 8 | 600 | 17 |
| 25 | 5000 | 5 | 2500 | 10 | 1000 | 25 | 500 | 50 |
| 50 | 4000 | 12,5 | 2000 | 25 | 875 | 57 | 440 | 114 |
| 100 | 3000 | 33 | 1500 | 67 | 750 | 133 | 375 | 267 |
| 250 | 1500 | 167 | 1000 | 250 | 650 | 385 | 325 | 770 |

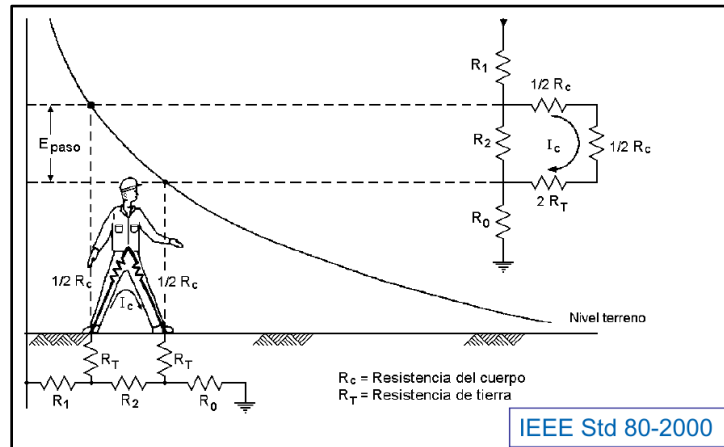
Fuente. (DE OLIVEIRA, 2007)

En la **tabla 3**, se observa la resistencia del cuerpo y la corriente según el voltaje de contacto y las condiciones de la piel.

VOLTAJE DE PASO.

“Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso (aproximadamente un metro).” (PORTALELÉCTRICOS, 2006)

Figura 3. Voltaje de paso.

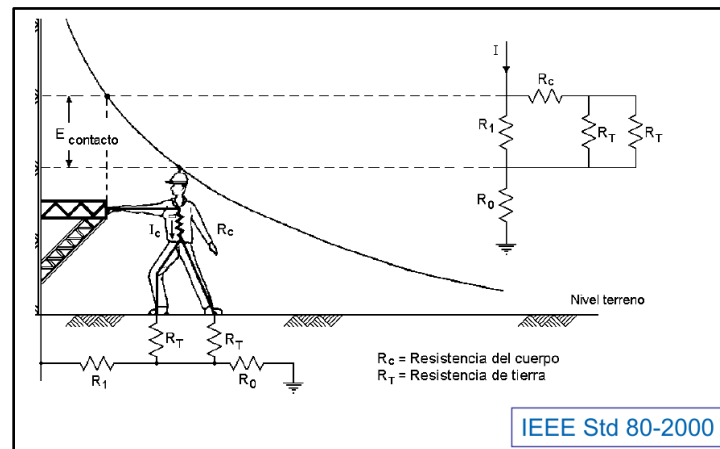


Fuente: (PORTALELÉCTRICOS).

En la **figura 3**, se observa el circuito que representa el esquema de voltaje de paso según la norma STD IEEE 80-2000.

VOLTAJE DE TOQUE.

“Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo.” (PORTALELÉCTRICOS, 2006).

Figura 4. Voltaje de Toque.

Fuente: (PORTALELÉCTRICOS).

En la **figura 4**, se observa circuito que representa el esquema de voltaje de toque según la norma STD IEEE 80-2000.

FACTORES NATURALES DEL TERRENO QUE INFLUYEN EN LA PUESTA A TIERRA.

El lugar donde se colocará la malla de tierra es sumamente importante, por lo que de él dependerá el funcionamiento y vida útil del Sistema de Puesta a Tierra. (ZAPATA JIMÉNEZ, 2012)

Las características importantes del terreno donde se entierra la malla son: la resistividad del suelo y su capacidad para corroer el material con el que se diseña la malla.

RESISTIVIDAD.

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

MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

Uno de los primeros pasos para el diseño de un sistema de puesta a tierra es encontrar el valor de la resistividad del suelo, valor que definirá la facilidad y la forma en que se distribuirá la corriente en el suelo, determinando a su vez la distribución de potenciales en este, y con ello las características constructivas que debe tener la malla de puesta a tierra para cumplir con las condiciones mínimas de seguridad en el área dispuesta para su construcción. (Moreno, Valencia, Cárdenas, & Villa Walter, 2007)

Aunque existen numerosos métodos los que acepta y sugiere la norma ANSI - IEEE son el de Wenner, Schlumberger - Palmer y la medición de la resistencia.

MÉTODO DE WENNER.

El método consiste en ubicar todos los electrodos en línea recta e igualmente espaciados, como se ilustra en la Figura 5.

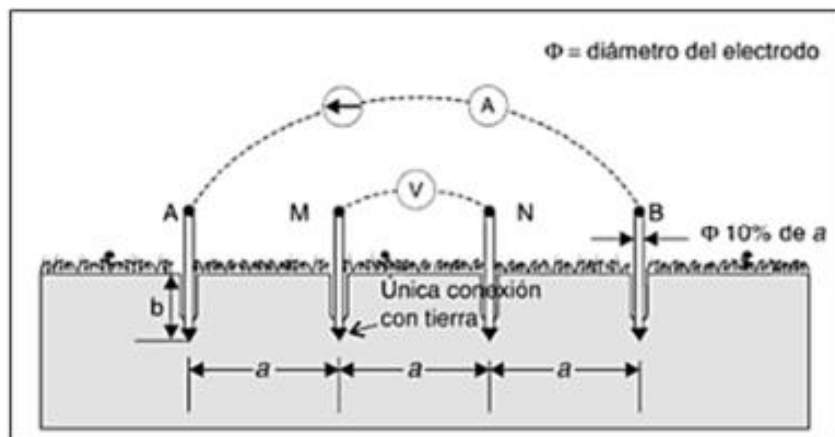
En este sondeo se deben separar progresivamente los electrodos de corriente y de tensión. Con respecto a un punto central fijo denominado punto de máxima exploración. Para el cálculo de la resistividad aparente del suelo, se utiliza la fórmula abreviada:

$$\rho = 2\pi aR$$

Donde

- ρ Es la resistividad del suelo.
- R Es el valor de resistencia leído por el telurómetro
- a Es la distancia de separación entre electrodos.

Figura 5. Esquema del método de Wenner.



Fuente. (AGULLEIRO & MARTINEZ)

En la **figura 5**, se observa el método de Wenner que es el más utilizado para la medición de la resistividad del terreno.

CORROSIÓN.

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

IMPORTANCIA Y CLASIFICACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA.

La puesta a tierra de los equipos se describe como la conexión voluntaria de todas las partes metálicas de los interruptores de potencia, estructuras metálicas, tanque del transformador, seccionadores, tableros, reconectores, transformadores de potencial y corriente, pararrayos, entre otros, todas las partes deben estar conectadas a la malla de tierra de la S/E. Debe cumplirse con la norma IEEE 80-1976, IEEE Guide for Safety in Substation Grounding. Se podrían dar varias clasificaciones de sistemas de puesta a tierra, se enunciarán las más universales:

- **Puesta a tierra de los equipos eléctricos:** Se emplea en los equipos eléctricos para que las protecciones se activen ya que estas corresponden a tierra, así se elimina la tensión indeseable que colocaría en situación de peligro los equipos eléctricos y la vida misma.
- **Puesta a tierra en señales electrónicas:** Cuando los equipos electrónicos manipulan señales o conexiones es común que se utilicen cables de diversas dimensiones, para impedir la contaminación con señales en frecuencias distintas a la deseada se utiliza blindaje, y con cable apantallado esta se aterriza.
- **Puesta a tierra de protección electrónica:** Para impedir que se destruyan los elementos semiconductores por tensión, se instalan dispositivos de protección conectados entre los conductores activos y el conductor a tierra.
- **Puesta a tierra de protección atmosférica:** Se emplea para canalizar la energía de las descargas atmosféricas a tierra sin daños muy representativos a personas y propiedades. Esto se logra con una malla de tierra la cual igualará la diferencia de potencial existente.
- **Puesta a tierra de protección electrostática:** “Se emplea para neutralizar las cargas electrostáticas derivadas de los materiales dieléctricos. Esto se logra conectando todas las partes metálicas y dieléctricas a tierra cuyo voltaje siempre será cero.” (RUELAS, 2010)

TIPOS DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

En un sistema simple de conexión a tierra, se figura un solo electrodo de tierra física instalado en el terreno. El uso de un solo electrodo es la manera más usual de realizar una conexión a tierra física, y puede hallarse fuera de su casa u oficina.

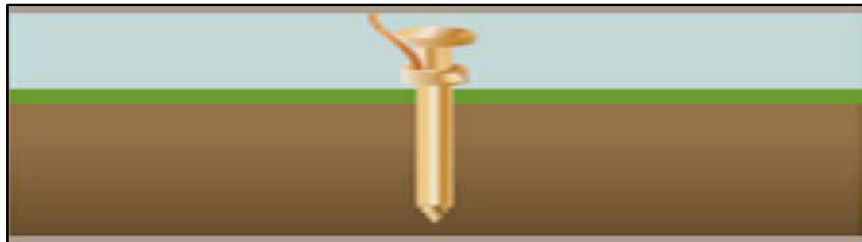
Los sistemas de malla de puesta a tierra están considerados como complejos en relación a un sistema de un único electrodo, la malla de tierra está compuesta de varias varillas de conexión a

tierra conectadas entre sí, esta se halla en subestaciones y construcciones eléctricas de gran magnitud.

Por lo general las mallas a tierra se instalan en las subestaciones de reducción de tensión, subestaciones de paso y subestaciones de generación. En las redes complejas la resistencia al paso de la corriente hacia la tierra aumenta por esta razón la construcción de la malla se torna más complicada, por tanto, se debe mejorar el paso de la corriente a tierra física, por ejemplo, se aumenta el número de varillas conectadas entre sí en una conexión en paralelo.

En las figuras 6, 7, 8 y 9 se muestran los diversos tipos de electrodos de puesta a tierra:

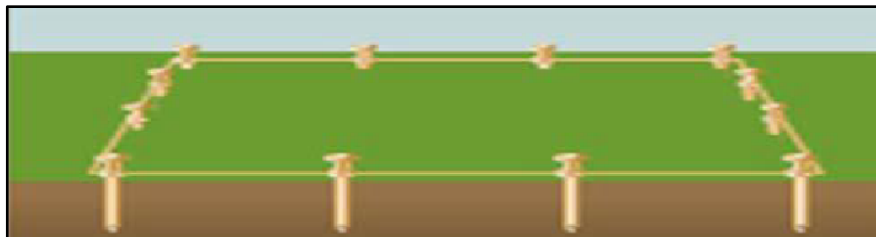
Figura 6. Electrodo único de conexión a tierra.



Fuente: (MARTINEZ & VELÁZQUEZ, 2008).

En la **figura 6**, se observa un electrodo que es un cuerpo metálico o conductor desnudo que va enterrado y su función es establecer el contacto con la tierra física.

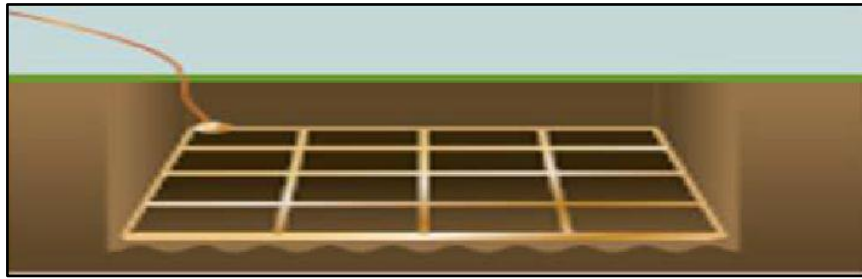
Figura 7. Varios electrodos conectados entre sí.



Fuente: (MARTINEZ & VELÁZQUEZ, 2008)

En la **figura 7**, se observa los electrodos que se encuentran unidos entre si y su función es establecer el contacto con la tierra física.

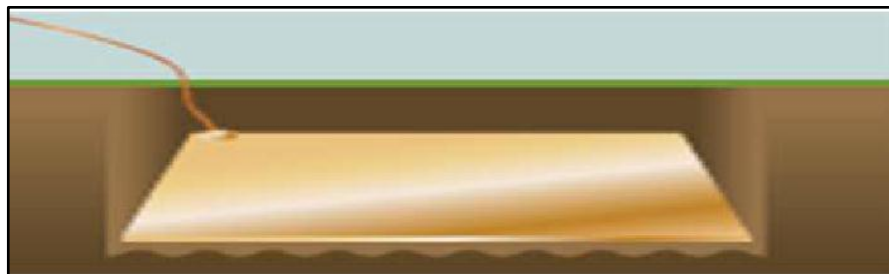
Figura 8. Red de mallas.



Fuente: (MARTINEZ & VELÁZQUEZ, 2008).

En la **figura 8**, la malla se hace armando una red de conductores de cobre desnudos, esta malla se puede mejorar con algunos electrodos. Esta malla es muy utilizada en las subestaciones eléctricas, ya que reduce el riesgo de descargas.

Figura 9. Placa de conexión a tierra



Fuente: (MARTINEZ & VELÁZQUEZ, 2008).

En la **figura 9**, se observa una placa de tierra, recomendado para terrenos de alta resistividad se la utiliza cuando bajo una capa de tierra de poco espesor, existen estratos rocosos.

9. PREGUNTAS CIENTIFICAS O HIPOTESIS.

El prototipo construido permitirá demostrar que la corriente que circula por la persona está relacionada con la resistencia presente en la malla de tierra.

10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL.

Métodos Generales.

Métodos Experimental.

Se utilizó este método porque se explica fenómenos que existen en la vida real, establecimos relaciones entre los hechos y se enunció normas que expliquen los fenómenos físicos del problema en el que se basó el prototipo.

Métodos Específicos.

Método Histórico.

Se utilizó este método en el prototipo ya que la norma esta previamente establecida y la investigación se basó en mallas a tierra existentes en las diferentes subestaciones que existen en nuestro país, con lo cual se logró el estudio de los voltajes de toque y de paso.

Método Documental.

La investigación documental es la presentación de un escrito formal que sigue una metodología reconocida. Consiste primordialmente en la presentación selectiva de lo que expertos ya han dicho o escrito sobre un tema determinado ya que toda investigación se basa en principios ya hechos.

Método Descriptivo.

Se utilizó dicho método para la descripción de valores obtenidos en simulaciones, cálculos y en la implementación de circuitos.

TÉCNICAS.

Lectura comprensiva

La lectura comprensiva está presente en todo nuestro proyecto investigativo ya que el análisis de la información se comparó con teoría de diferentes autores y se obtuvo una idea común para así lograr la culminación de nuestro proyecto.

Modelamiento.

Se utilizó esta técnica dentro de la implementación de nuestro prototipo ya que se modelo circuitos que satisfacen la investigación y demostración que deseamos representar.

El software que se utilizaremos es: **MATLAB - SIMULINK**

En este programaras realizaremos las simulaciones de los circuitos de mallas a tierra con diferentes valores de resistividad del terreno y resistencia del cuerpo humano, estas serán simuladas con resistencias.

Interpretación de información.

Se utilizó esta técnica ya que el análisis e interpretación de la información en nuestro proyecto, parte de una base teórica bien fundamentada para no tener inconvenientes con la construcción de nuestro prototipo.

Sintetizar de información.

Se utilizó esta técnica porque la información obtenida en libros y fuentes de internet son la base para efectuar una síntesis para el mejor desempeño de la información como base teórica y resaltar los aspectos más sobresalientes para así asegurar una fundamentación teórica verídica y útil.

Experimentación de exploración.

Se utilizó esta técnica en la construcción de nuestro prototipo ya que se modeló y registró la información obtenida en base a pruebas para determinar su eficiente funcionamiento.

11. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Nuestro proyecto está basado en una subestación eléctrica por tal motivo hemos construido las diferentes estructuras y equipos que se encuentran dentro de las mismas.

CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para la implementación del prototipo nos basamos en una S/E de Barra Simple, construyendo cada elemento que la constituyen.

Subestación Eléctrica

Es un conjunto de elementos o dispositivos que nos permite cambiar las características de energía (voltaje, corriente, frecuencia) tipo C.A. ó C.C., para conservarle dentro de ciertas características.

Figura 10. Prototipo de una Subestación eléctrica de Barra Simple.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

En la **figura 10**, se observa la subestación implementada con todos los equipos de protección y maniobra. A continuación, se detalla de forma breve cada uno de los elementos que conforma el prototipo.

Torre de Transmisión.

Es una estructura de gran altura, normalmente construida en celosía de acero, cuya función principal es servir de soporte de los conductores eléctricos aéreos de las líneas de transmisión de energía eléctrica.

La torre del prototipo se construyó con varilla de 8 mm de espesor y bases de tubo cuadrado de 30x30x80mm.

Figura 11. (A) Torre eléctrica– (B) Prototipo torre eléctrica.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 11**, se observa la estructura de una torre eléctrica real y la estructura de la torre del prototipo.

Pórtico de llegada.

El pórtico de llegada del prototipo se construyó con varilla cuadrada de 8mm de espesor, con una altura de 27cm y un ancho de 20 cm.

Figura 12. (A) Pórtico de llegada – (B) Prototipo pórtico de llegada.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 12**, se observa la estructura de un pórtico de llegada real y la estructura del pórtico de llegada del prototipo.

Barras.

Son las terminales de conexión por fase.

Las barras del prototipo se construyeron con varilla cuadrada de 8mm de espesor, con una altura de 20cm y un ancho de 20 cm.

Figura 13. (A) Barras de una subestación eléctrica – (B) Prototipo barras Subestación eléctrica.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 13**, se observa la estructura de una barra eléctrica en una subestación real y la estructura de la barra en el prototipo.

Aisladores

Sirven fundamentalmente para sujetar a los conductores, de manera que estos no se muevan en sentido longitudinal o transversal. Como su nombre lo indica, deben evitar la derivación de la corriente de la línea hacia tierra

Los aisladores para el prototipo se construyeron con masilla Epoxi Rally.

Figura 14. (A) Aisladores de porcelana – (B) Prototipo aisladores.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **Figura 14**, se observa los aisladores de porcelana real y los aisladores del prototipo.

Pararrayos.

Se encuentra conectado permanentemente en el sistema, descarga la corriente a tierra cuando se presenta un sobrevoltaje de determinada magnitud.

El pararrayos del prototipo se construyó basado en ABB Surge arresters – buyer’s guide, PEXLIM PX VX245 model. Moldeados con masilla epoxi Rally con bases de madera de 25x25x70mm.

Figura 15. (A) Pararrayo PEXLIM PX VX245 – (B) Prototipo Pararrayos.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 15**, se observa la estructura de un pararrayo real y la estructura del pararrayo para el prototipo.

Transformadores de Potencial (Tp).

Su función principal es transformar los valores de voltaje sin tomar en cuenta la corriente.

El Tp del prototipo se construyó basado en Transformadores de medida exterior ABB, guía para el comprador, modelo CPB 245.

Moldeados con masilla epoxi Rally con bases de madera de 25x25x70mm.

Figura 16. (A)TP cpb 245 – (B) Prototipo TP's.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 16**, se observa la estructura de un TP real y la estructura del TP del prototipo.

Transformadores de Corriente (Tc).

Su función principal es cambiar el valor de la corriente en su primario a otro en el secundario.

El prototipo de Tc que se construyó está basado en transformadores de medida exterior ABB, guía para el comprador, modelo IMB 245.

Moldeados con masilla epoxi Rally con bases de madera de 25x25x70mm.

Figura 17. (A)Tc IBM 245 – (B) Prototipo TC's.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 17**, se observa la estructura de un TC real y la estructura del TC del prototipo.

Seccionadores.

Aparato mecánico de maniobra sin carga, que, por razones de seguridad, asegura, en posición de abierto, una distancia de aislamiento y que se emplea para aislar un elemento de una red eléctrica o una parte de la misma del resto de la red, con el fin de ponerlos fuera de servicio, o para llevar a cabo trabajos de mantenimiento.

La construcción del seccionador está basada en ABB horizontal center break disconnecter Type GW 55.

Moldeados con masilla epoxi Rally con bases de madera de 20x20x65mm.

Figura 18. (A) Seccionador GW 55 – (b) Prototipo Seccionadores.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 18**, se observa la estructura de un seccionador real y la estructura del seccionador para el prototipo.

Interruptores.

Interrumpe y restablece la continuidad de un circuito eléctrico. La interrupción se debe efectuar con carga o corriente de corto circuito.

El interruptor diseñado para el prototipo está basado en ABB live tank circuit breakers – buyer's guide, LTB E1 model.

Fueron moldeados con masilla epoxi Rally con bases de madera de 25x25x70mm.

Figura 19. (a) Interruptor LTB E1 – (B) Prototipo interruptores.



Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, 2017).

(A)

(B)

En la **figura 19**, se observa la estructura de un interruptor real y la estructura del interruptor para el prototipo.

El proyecto se basa en el cálculo del voltaje de paso y de toque, por tal razón el transformador es parte fundamental del mismo, ya que con él se simuló un sobrevoltaje en la estructura lo que nos permitió observar y medir los voltajes antes mencionados.

Transformador de Solda TRUPER.

Figura 20. Transformador de suelda Truper.



Fuente. (Postulantes,2017)

En la **figura 20**, se observa el transformador implementado en el prototipo.

A continuación, se detalla las características del transformador que usamos para realizar las pruebas en el prototipo.

En la **tabla 4 y 5**, se detalla las características eléctricas del primario y secundario del transformador respectivamente.

Tabla 4. Características del Primario del Transformador.

| Primario | |
|----------------------|----------|
| Voltaje del Primario | 110 V~ |
| Corriente | 45 A |
| Potencia | 4.95 kVA |
| Frecuencia | 60 Hz |

Fuente. Guía de características del transformador.

Tabla 5. Características del Secundario del Transformador

| Secundario | |
|-----------------------------|-------------|
| Voltaje de Circuito Abierto | 48 V~ |
| Voltaje con Carga | 23.2 V~ |
| Corriente de Trabajo | 80 A |
| Ciclo de Trabajo | 10 % |
| Rango de Corriente | 40 A / 90 A |

Fuente. Guía de características del transformador.

Resistencias de Potencia.

Para el diseño de la malla los circuitos se realizaron utilizando resistencias de diferentes Potencias (10 – 20 W) y valores en Ohmios.

Figura 21. Resistencias de Potencia de diversos valores.



Fuente. (Postulantes, 2017).

En la **figura 21**, se observan las diferentes resistencias de potencia que se implementaron en el prototipo.

VOLTAJE DE PASO Y VOLTAJE DE TOQUE.

En el prototipo se trabajó con un voltaje de 45 V debido a que las resistencias de potencia que existen en el mercado no soportan la potencia que se requiere para trabajar con valores de voltajes y corrientes más elevados.

Los parámetros utilizados para las resistencias del circuito armado se los hizo en función de demostrar y poder observar como varían el potencial de paso, de toque y la corriente en cada uno de los esquemas que circula por el cuerpo.

En la **tabla 6**, se presenta los valores admisibles de resistencias de puesta a tierra para diferentes componentes de un Sistema Eléctrico.

Tabla 6. Valores máximos de puesta a tierra

| Estructura | Resistencia a tierra máxima (Ω) |
|---|--|
| Estructuras de líneas de transmisión. | 25 |
| Subestaciones de extra alto voltaje (> 115 kV) | 1 |
| Subestaciones de alto voltaje (de 38 a 115 kV) | 5 |
| Subestaciones de medio voltaje de uso exterior en poste | 10 |
| Subestaciones de medio voltaje de uso interior | 10 |
| Protección contra rayos | 4 |
| Equipos de electrodos sensibles | 5 |
| Neutros de acometida de bajo voltaje | 25 |
| Descargas electrostáticas | 25 |

Fuente. (Sistemas de puesta a tierra diseñados con IEEE-80 y evaluados con MEF)

Para obtener una excelente malla a tierra y para que así los sobrevoltajes ocurridos en las estructuras se disipen a tierra sin afectar a equipos como la integridad física de operarios, se debió tomar en cuenta diferentes aspectos dentro del cálculo y simulación de los circuitos que se realizaron entre ellos los más importantes:

- ✓ **Resistividad del Terreno.**
- ✓ **Resistencia del Cuerpo Humano.**

A continuación, se detalla de manera breve cada uno de estos aspectos:

Resistividad del Terreno.

La resistividad (ρ) es un parámetro característico de los medios conductores su unidad en el sistema MKS es el $\Omega.m$.

Elementos que influyen en la resistividad del terreno:

- ✓ Naturaleza del terreno
- ✓ Humedad
- ✓ Temperatura
- ✓ Salinidad
- ✓ Estratigrafía
- ✓ Variaciones estacionales
- ✓ Factores de naturaleza eléctrica
- ✓ Compactación.

En la **tabla 7**, se detalla las diferentes naturalezas de terreno que se pueden encontrar y sus respectivas resistividades.

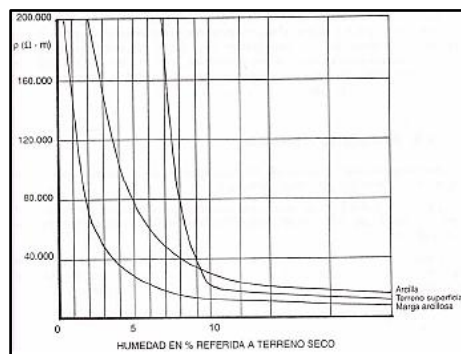
Tabla 7. Resistividad según la Naturaleza del Terreno

| Naturaleza del Terreno | Resistividad en $\Omega.m$ |
|-------------------------------|--|
| Terrenos pantanosos | De algunas unidades a 30 |
| Limo | 20 a 100 |
| Humus | 10 a 150 |
| Turba Húmeda | 5 a 100 |
| Arcilla Plástica | 50 |
| Margas y Arcillas Compactas | 100 a 200 |
| Margas del Jurásico | 30 a 40 |
| Arena Arcillosa | 50 a 500 |

| | |
|---|--------------|
| Arena Silícea | 200 a 3000 |
| Suelo Pedregoso cubierto de césped | 300 a 500 |
| Suelo Pedregoso Desnudo | 1500 a 3000 |
| Calizas Blandas | 100 a 300 |
| Calizas Compactas | 1000 a 5000 |
| Calizas Agrietadas | 500 a 1000 |
| Pizarras | 50 a 300 |
| Rocas de mica y cuarzo | 800 |
| Granitos y Gres procedentes de alteración | 1500 a 10000 |
| Granitos y Gres muy alterados | 100 a 600 |

Fuente. (Auditoria de Sistemas de Puesta a Tierra, Oliveira – De Jesús 2007)

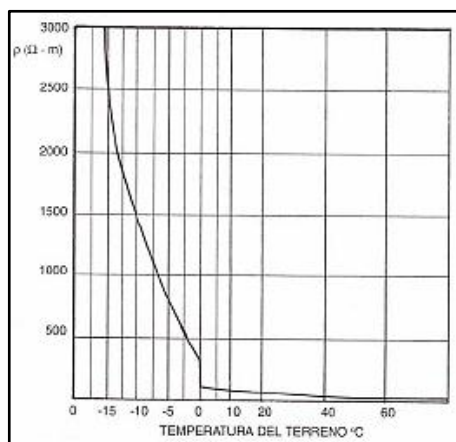
Figura 22. Humedad en % referida a Terreno Seco



Fuente. (Auditoria de Sistemas de Puesta a Tierra, Oliveira – De Jesús 2007).

En la **figura 22**, se observa humedad en porcentaje teniendo en cuenta la relación que existe entre el terreno seco y la resistividad del mismo.

Figura 23. Humedad en % referida a Terreno Seco



Fuente. (Auditoria de Sistemas de Puesta a Tierra, Oliveira – De Jesús 2007).

En la **figura 23**, se observa humedad en porcentaje teniendo en cuenta la relación que existe entre la temperatura y la resistividad del terreno.

Resistencia del Cuerpo Humano.

El cuerpo humano a una frecuencia de 60Hz, se lo puede considerar como una resistencia, la trayectoria de la corriente típica que circula por el cuerpo humano es desde una mano a los pies, o de un pie hacia el otro.

Los estudios realizados por los investigadores de la IEEE (Dalziel, Geddes y Baker) determinaron que la resistencia interna del cuerpo humano está alrededor de unos 300Ω, en donde los valores de la resistencia del cuerpo humano incluyen rangos de la resistencia de la piel entre 500Ω a 3000Ω.

La resistencia corporal disminuye cuando se daña o se perfora la piel en el punto de contacto con la corriente. Extensas pruebas realizadas por Dalziel para determinar las corrientes de soltura seguras con los pies y las manos húmedas con agua salada, arrojaron que, en los hombres, a una frecuencia de 60Hz, la corriente fue de 9mA, los voltajes correspondientes fueron 21V de mano a mano y de 10,2V de manos a pies.

Basados en el experimento de Dalziel, la resistencia de corriente alterna para un contacto de mano a mano es igual a 2330Ω y la resistencia de mano a pies es igual a 1130Ω.

A fin de establecer un parámetro simple, la IEEE asume las siguientes simplificaciones de las resistencias en serie con la resistencia corporal:

- a) La resistencia de contacto de mano y pie es igual a cero.
- b) La resistencia del guante y un zapato es igual a cero.

Obteniendo para el desarrollo de todos los cálculos subsiguientes el valor de 1000Ω, el cual representa la resistencia corporal desde las manos hasta los pies, también de mano a mano o desde un pie hacia el otro.

Las normas recomiendan adoptar un valor promedio de $R_k = 1000 \text{ Ohm}$.

Figura 24. Recorridos de la Corriente en el Cuerpo Humano

Fuente. (Procobre, 2010).

En la **figura 24**, se observa los diferentes valores de resistencia que se obtiene en el cuerpo de acuerdo al recorrido que tiene la corriente.

De acuerdo a la norma IEEE STD 80 – 2000, se encontró el esquema representativo del voltaje de paso.

De acuerdo al esquema de la **figura 2**, se simularon los circuitos con valores obtenidos de resistividad del terreno y resistencia del cuerpo, para una malla de una subestación de alto voltaje de acuerdo a la **tabla 4**

Los valores de resistividad del terreno son tomados de la **tabla 5**. La resistencia del Cuerpo Humano es la resistencia promedio según la Norma IEEE STD 80 – 2000 que equivale a 1000 Ω .

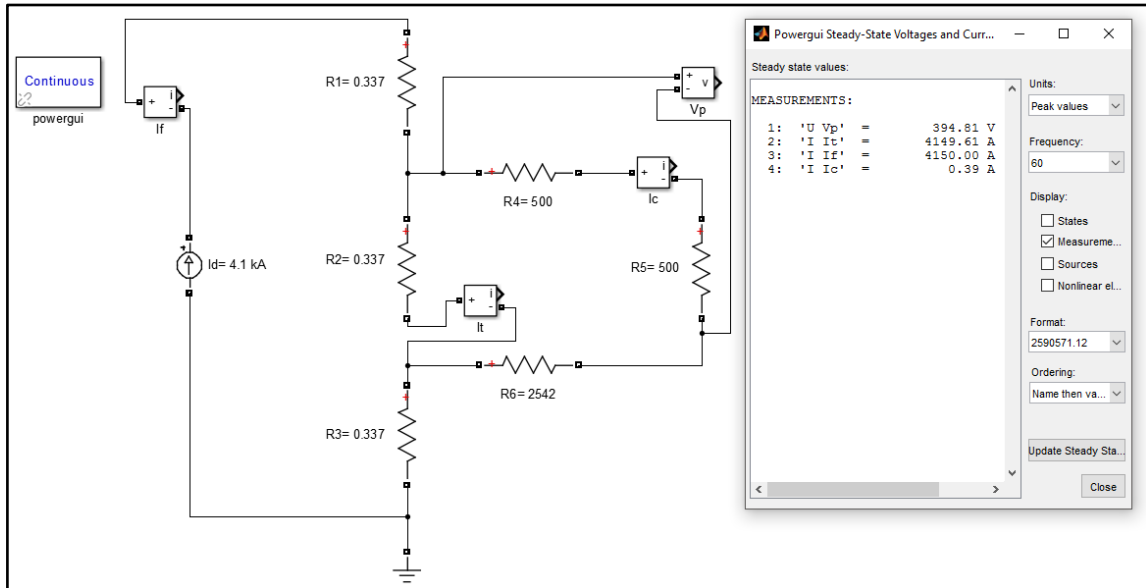
SIMULACIONES DEL VOLTAJE DE PASO.

Las simulaciones de los circuitos del voltaje de paso se las realizo en el programa Matlab Simulink.

Para observar la funcionalidad en la vida real de la malla de puesta a tierra se han simulado circuitos con valores reales de $R_M=0.337 \Omega$, $R_T=2542 \Omega$, $I_F=4.1 \text{ kA}$ con voltajes máximos admisibles de paso y de toque para una persona de 70 Kg de 458.99 V y 395.70 V respectivamente.

En la **figura 25**, se observa la simulación del circuito de paso con los valores mencionados anteriormente con una malla optima y se puede observar que el voltaje de paso está dentro de los valores máximos admisibles.

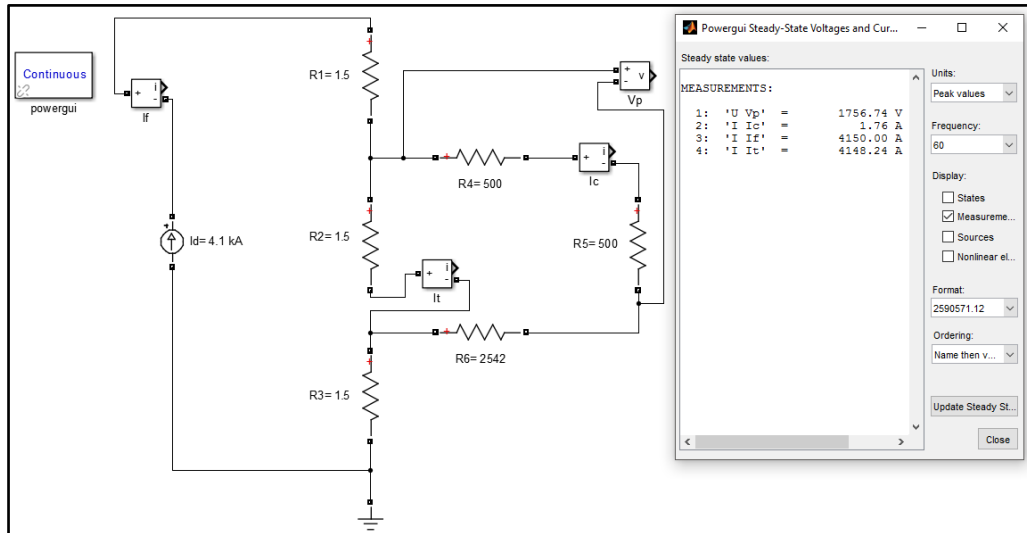
Figura 25. Simulación del Voltaje de Paso en la Vida real con un diseño óptimo de la malla de tierra.



Fuente. (Programa Matlab Simulink)

En la **figura 26**, se observa la simulación del circuito de paso con los valores mencionados anteriormente con una malla no óptima y se puede observar que el voltaje de paso no está dentro de los valores máximos admisibles.

Figura 26. Simulación del Voltaje de Paso en la Vida real con un mal diseño de la malla de tierra.

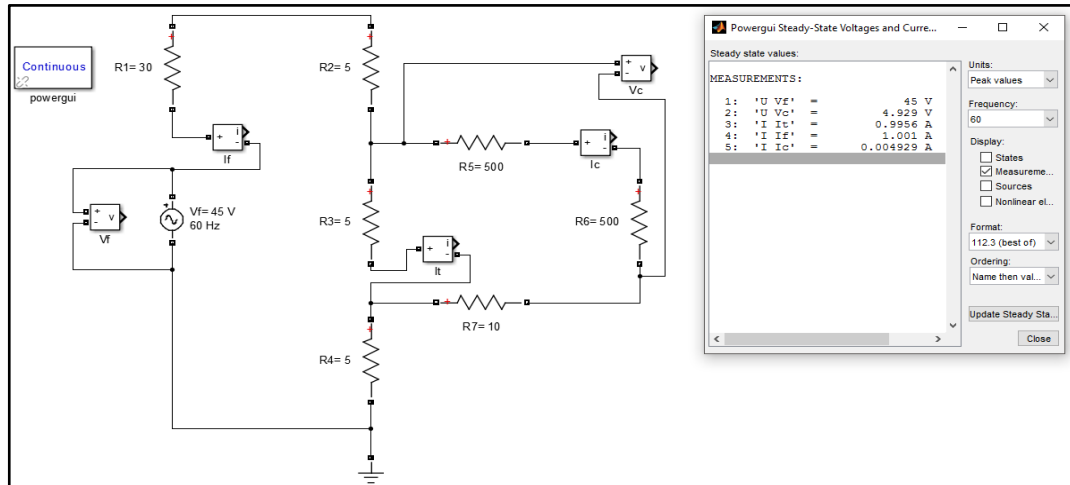


Fuente. (Programa Matlab Simulink)

Se utilizaron los siguientes datos con sus respectivos valores: voltaje de 45 V y una corriente de 1 A con resistencias de malla de 5 Ω y 15 Ω y resistividades del suelo de 10, 50 y 200 Ω . La

resistencia del cuerpo se la toma según la Norma IEEE STD 80-2000, cuyo valor promedio es de 1000Ω .

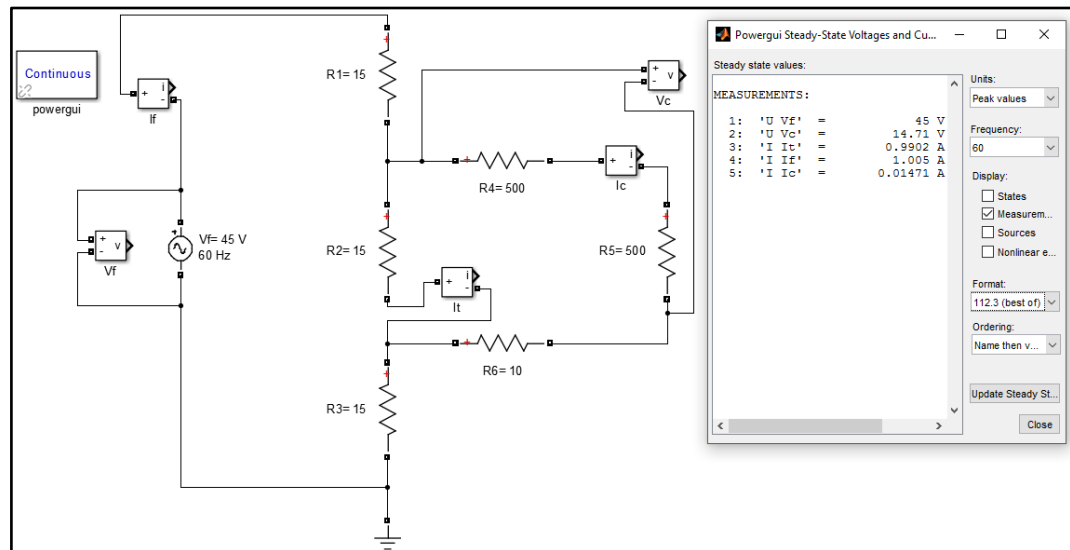
Figura 27. Circuito del Voltaje de Paso, malla 5 Ω .



Fuente. (Postulantes, Programa Matlab Simulink).

En la **figura 27**, se observa la simulación del circuito para la medición del voltaje y corriente de paso con una resistencia de la malla de 5Ω y una resistencia de tierra de 10Ω .

Figura 28. Circuito del Voltaje de Paso, malla 15 Ω .



Fuente. (Postulantes, Programa Matlab Simulink).

En la **figura 28**, se observa la simulación del circuito para la medición del voltaje y corriente de paso con una resistencia de la malla de 15Ω y una resistencia de tierra de 10Ω .

Tabla 8. Cálculos de Voltajes y Corrientes de Paso con una malla de 5 Ω.

| VOLTAJE DE PASO CON MALLA DE 5 Ω | | | | | |
|----------------------------------|--------------|---------------|-------------|----------------|---------------|
| “V” aplicado | “I” aplicada | “R” de tierra | “V” de paso | “I” del cuerpo | “I” de tierra |
| 45 V | 1 A | 10 Ω | 4.98 V | 4.93 mA | 995 mA |
| 45 V | 1 A | 50 Ω | 4.98 V | 4.74 mA | 996 mA |
| 45 V | 1 A | 200 Ω | 4.98 V | 4.15 mA | 996 mA |

Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, Matlab – Simulink, 2017).

En la **tabla 8**, se observa los diferentes valores de voltaje de paso con malla de 5 Ω obtenidos de la simulación que se realizó en el programa Matlab Simulink utilizando diferentes valores de la resistencia de la tierra.

Tabla 9. Cálculo de Voltajes y Corrientes de Paso con una malla de 15 Ω.

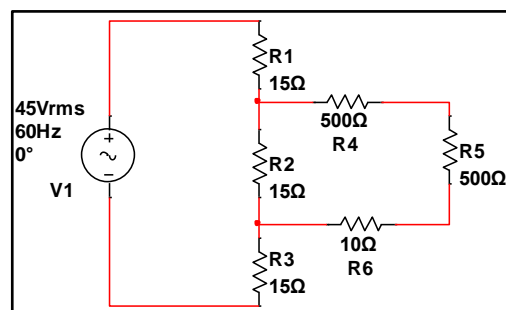
| VOLTAJE DE PASO CON MALLA DE 15 Ω | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|-------------|----------------|---------------|
| “V” aplicado | “I” aplicada | “R” de tierra | “V” de paso | “I” del cuerpo | “I” de tierra |
| 45 V | 1 A | 10 Ω | 14.8 V | 14.7 mA | 990 mA |
| 45 V | 1 A | 50 Ω | 14.8 V | 14.1 mA | 990 mA |
| 45 V | 1 A | 200 Ω | 14.8 V | 12.4 mA | 992 mA |

Elaborado por. (Coordinadores del proyecto, Matlab – Simulink, 2017).

En la **tabla 9**, se observa los diferentes valores de voltaje de paso con malla de 15 Ω obtenidos de la simulación que se realizó en el programa Matlab Simulink utilizando diferentes valores de la resistencia de la tierra.

CALCULOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES.

Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 10 Ω.

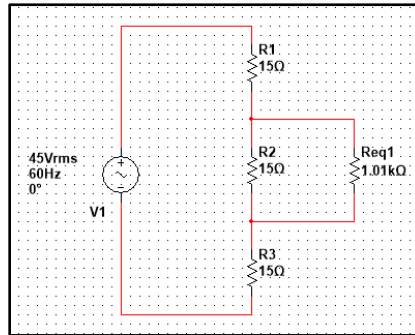


- Cálculo de la R_{eq1} .

$$R_{eq1} = R_4 + R_5 + R_6$$

$$R_{eq1} = 500 \Omega + 500 \Omega + 10 \Omega = 1.01 K\Omega$$

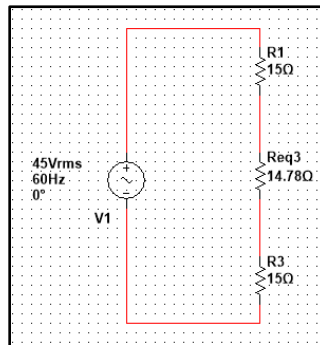
- Cálculo de la R_{eq2} .



$$R_{eq2} = \frac{R_2 * R_{eq1}}{R_2 + R_{eq1}}$$

$$R_{eq2} = \frac{15\Omega * 1.01\text{K}\Omega}{15\Omega + 1.01\text{K}\Omega} = 14.78\Omega$$

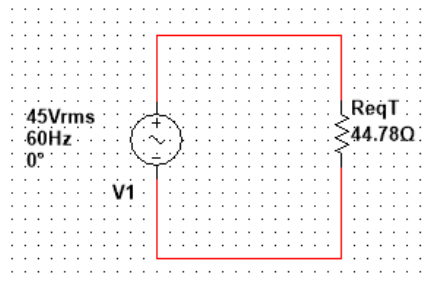
- Cálculo de R_{eqT} .



$$R_{eqT} = R_1 + R_{eq2} + R_3$$

$$R_{eqT} = 15\Omega + 14.78\Omega + 15\Omega = 44.78\Omega$$

- Cálculo de I.



$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45\text{V}}{44.78\Omega} = 1\text{A}$$

- Cálculo del V

$$V = V_1 * \frac{R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2} + R_3}$$

$$V = 45 V * \frac{14.78 \Omega}{15 \Omega + 14.78 \Omega + 15 \Omega} = 14.85 V$$

- Cálculo del V_{paso}

$$V_{paso} = V * \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

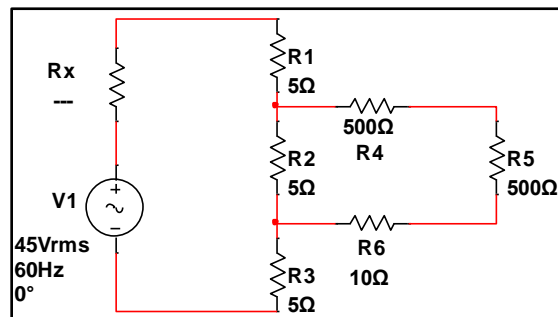
$$V_{paso} = 22.33 V * \frac{500 \Omega + 500 \Omega}{500 \Omega + 500 \Omega + 10 \Omega} = 14.7 V$$

- Cálculo de la I_{cuerpo}

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{paso}}{R_4 + R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{14.7 V}{500 \Omega + 500 \Omega} = 14.7 mA$$

- Resistencia de la malla de 5Ω y resistencia de la tierra de 10Ω .

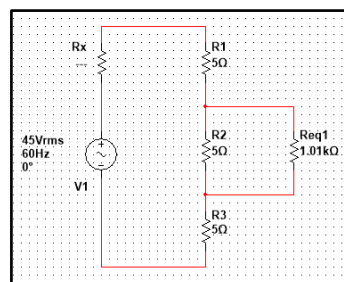


- Cálculo de la R_{eq1}

$$R_{eq1} = R_4 + R_5 + R_6$$

$$R_{eq1} = 500 \Omega + 500 \Omega + 10 \Omega = 1.01 K\Omega$$

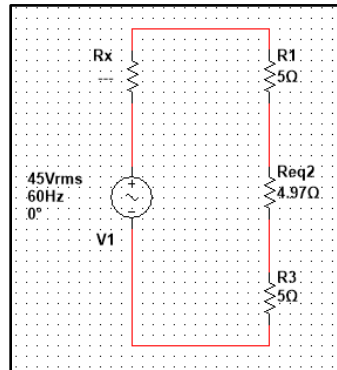
- Cálculo de la R_{eq2} .



$$R_{eq2} = \frac{R_2 * R_{eq1}}{R_2 + R_{eq1}}$$

$$R_{eq2} = \frac{5\Omega * 1.01\text{ K}\Omega}{5\Omega + 1.01\text{ K}\Omega} = 4.97\ \Omega.$$

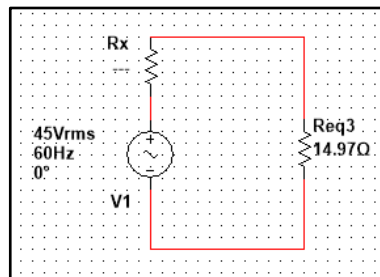
- Cálculo de la R_{eq3}



$$R_{eq3} = R_1 + R_{eq2} + R_3$$

$$R_{eq3} = 5\ \Omega + 4.97\ \Omega + 5\ \Omega = 14.97\ \Omega$$

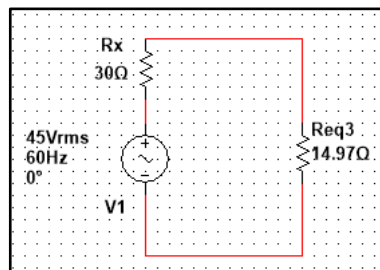
- Cálculo de la R_x .



$$R_x = R_{eqT} - R_{eq3}$$

$$R_x = 44.78\ \Omega - 14.97\ \Omega = 29.81\ \Omega \approx 30\ \Omega$$

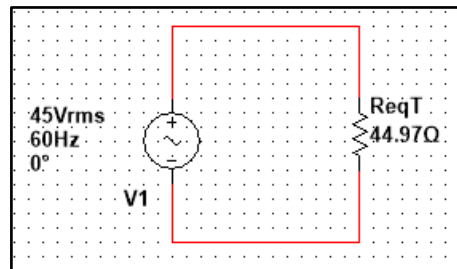
- Cálculo de R_{eqT}



$$R_{eqT} = R_x + R_{eq3}$$

$$R_{eqT} = 30 \Omega + 14.97 \Omega = 44.97 \Omega$$

- Cálculo de I.



$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45 V}{44.97 \Omega} = 1 A$$

- Cálculo de V

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_x + R_1 + R_{eq3} + R_3}$$

$$V = 45 V * \frac{4.97 \Omega}{30 \Omega + 5 \Omega + 4.97 \Omega + 5 \Omega} = 4.97 V$$

- Cálculo del V_{paso}

$$V_{paso} = V * \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

$$V_{paso} = 4.97 V * \frac{500 \Omega + 500 \Omega}{500 \Omega + 500 \Omega + 10 \Omega} = 4.92 V$$

- Cálculo de la I_{cuerpo}

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{paso}}{R_4 + R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{4.92 V}{500 \Omega + 500 \Omega} = 4.92 mA$$

Análisis de los valores obtenidos del Voltaje de Paso

Para el primer caso se consideró que una malla óptima tiene una resistencia de 5Ω y en el segundo caso se consideró que una malla no óptima tiene una resistencia de 15Ω , para los dos casos se midieron los potenciales de paso, y la corriente que circula por el cuerpo humano.

Cuanto tenemos una malla de 5Ω y una resistencia de 10Ω , la variación de potencial se reduce en un 33.64% con respecto a un sistema de mallado de 15Ω , ahora aumentamos la resistencia del terreno a 50Ω y a 200Ω pudiendo observarse que la variación de potencial se mantuvo en los 3 casos.

Para el caso 1 y caso 2, se varió la resistencia de tierra entre el suelo y la malla con valores de 10, 50 y 200 ohmios en este punto se observa que existen cambios en la corriente que circula por la persona teniendo como resultado lo siguiente.

La corriente que va a circular por las resistencias que son el equivalente a la resistencia del cuerpo se reduce un 33.53% al utilizar una resistencia en la malla de 5Ω y una resistencia del terreno de 10Ω , luego se utilizó una resistencia del terreno de 50Ω observando que el porcentaje de paso de corriente por el cuerpo humano aumento a un 33.61% , finalmente realizamos la misma prueba con una resistencia del terreno de 200Ω en la cual obtuvimos un porcentaje de 33.46% .

VOLTAJE DE TOQUE

De acuerdo a la norma IEEE STD 80 – 2000, se encontró el esquema representativo del voltaje de toque.

De acuerdo al esquema de la **figura 3**, se han simulado los circuitos con valores obtenidos de resistividad del terreno y resistencia del cuerpo, para una malla de una subestación de alto voltaje.

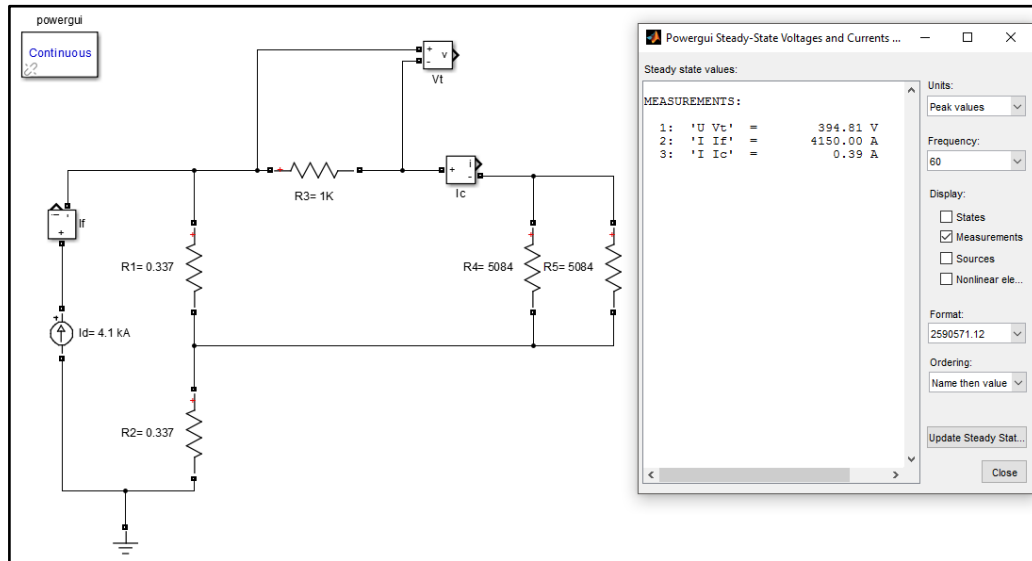
Los valores de resistividad del terreno son tomados de la **tabla 5**. La resistencia del Cuerpo Humano es la resistencia promedio según la Norma IEEE STD 80 – 2000 que equivale a 1000Ω .

SIMULACION DE LOS CIRCUITOS DEL VOLTAJE DE TOQUE.

Las simulaciones de los circuitos del voltaje de toque se las realizo en el programa Matlab Simulink.

Para observar la funcionalidad en la vida real de la malla de puesta a tierra se han simulado circuitos con valores reales de $R_M=0.337 \Omega$, $R_T=2542 \Omega$, $I_F=4.1 \text{ kA}$ con voltajes máximos admisibles de paso y de toque para una persona de 70 Kg de 458.99 V y 395.70 V respectivamente.

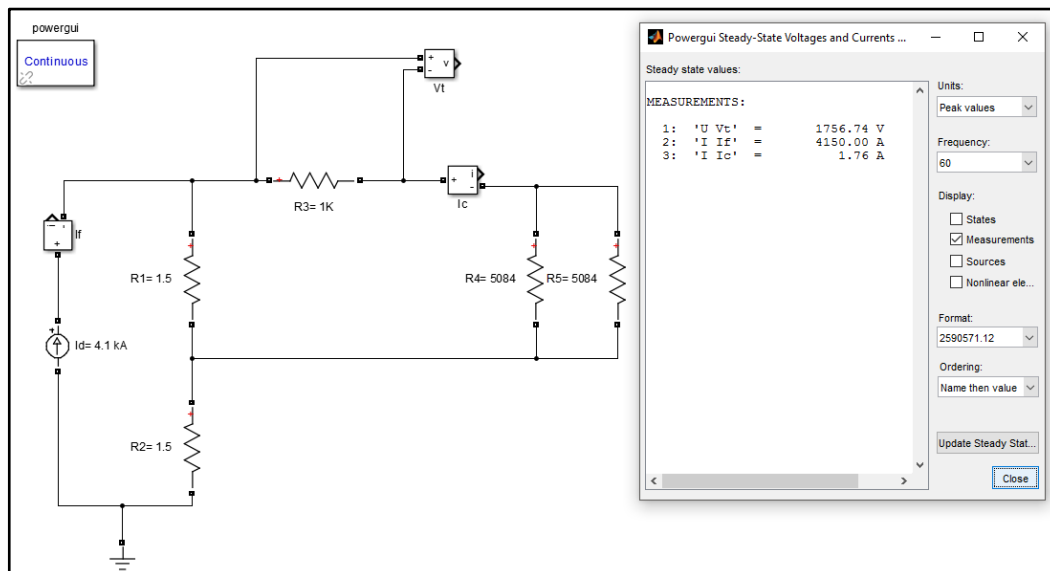
Figura 29. Simulación del Voltaje de Toque en la Vida real con un diseño óptimo de la malla de tierra.



Fuente. (Programa Matlab Simulink)

En la **figura 29**, se observa la simulación del circuito de paso con los valores mencionados anteriormente con una malla optima y se puede observar que el voltaje de toque está dentro de los valores máximos admisibles.

Figura 30. Simulación del Voltaje de Toque en la Vida real con un mal diseño de la malla de tierra.



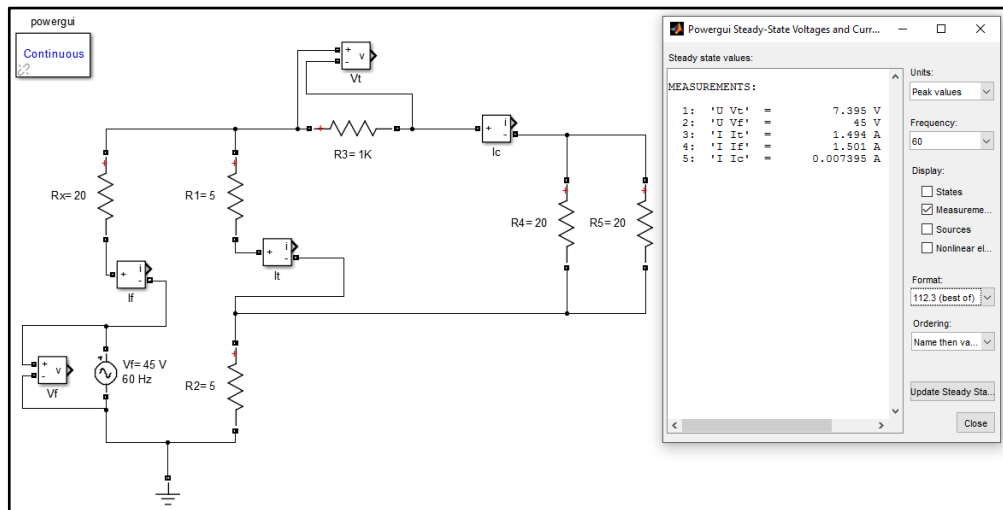
Fuente. (Programa Matlab Simulink).

En la **figura 30**, se observa la simulación del circuito de toque con los valores mencionados anteriormente con un mal diseño de malla a tierra y se puede observar que el voltaje de toque está fuero de los valores máximos admisibles.

Se utilizaron los siguientes datos con sus respectivos valores: voltaje de 45 V y una corriente de 1.5 A con resistencias de malla de 5 Ω y 15 Ω y resistividades del suelo de 10, 50 y 200 Ω . La resistencia del cuerpo se la toma según la Norma IEEE STD 80-2000, cuyo valor promedio es de 1000 Ω .

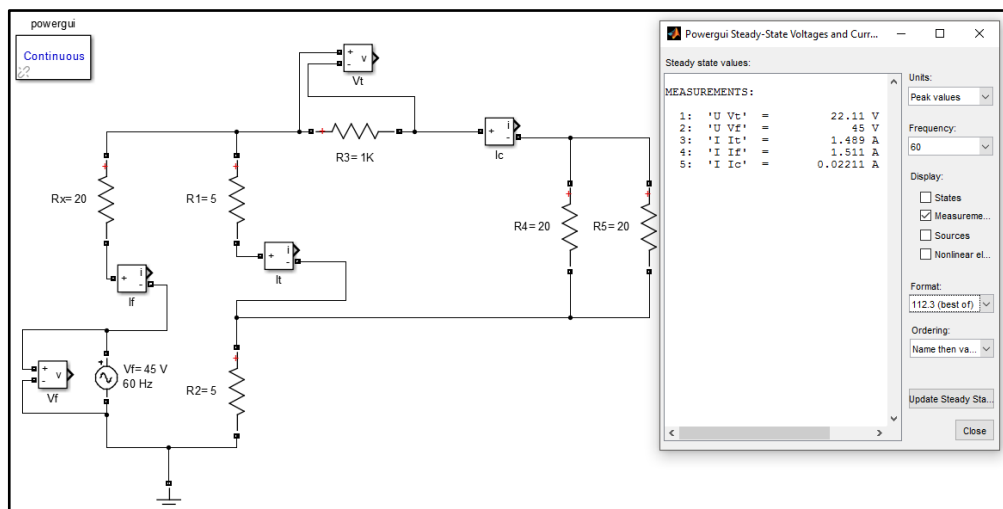
En la **figura 31**, se observa la simulación del circuito para la medición del voltaje y corriente de toque con una resistencia de la malla de 5 Ω y una resistencia de tierra de 10 Ω .

Figura 31. Circuito del Voltaje de Toque, malla 5 Ω .



Fuente. (Postulantes, Programa Matlab Simulink).

Figura 32. Circuito del Voltaje de Toque, malla 15 Ω .



Fuente. (Postulantes, Programa Matlab Simulink).

En la **figura 32**, se observa la simulación del circuito para la medición del voltaje y corriente de toque con una resistencia de la malla de 15Ω y una resistencia de tierra de 10Ω .

Tabla 10. Cálculo de Voltajes y Corrientes de Toque con una malla de 5Ω .

| VOLTAJE DE TOQUE CON MALLA DE 5Ω | | | | | |
|---|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| “V” aplicado | “I” aplicada | “R” de tierra | “V” de toque | “I” del cuerpo | “I” de tierra |
| 45 V | 1.5 A | 10Ω | 7.48 V | 7.39 mA | 3.70 mA |
| 45 V | 1.5 A | 50Ω | 7.14 V | 7.11 mA | 3.56 mA |
| 45 V | 1.5 A | 200Ω | 6.25 V | 6.23 mA | 3.11 mA |

Fuente. (Postulantes, Programa Matlab Simulink)

En la **tabla 10**, se observa los diferentes valores de voltaje de toque con malla de 5Ω obtenidos de la simulación que se realizó en el programa Matlab Simulink utilizando diferentes valores de la resistencia de la tierra.

Tabla 11. Cálculo de Voltajes y Corrientes de Toque con una malla de 15Ω .

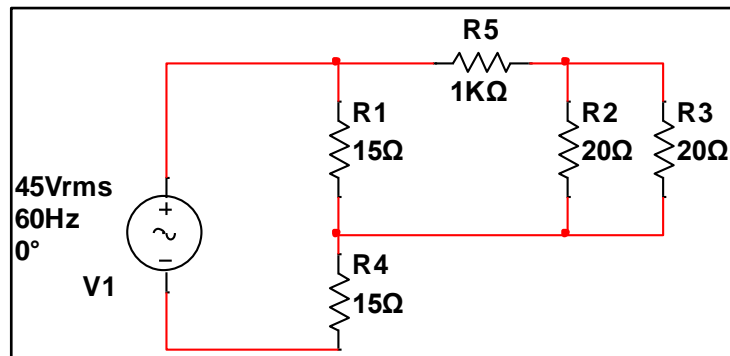
| VOLTAJE DE TOQUE CON MALLA DE 15Ω | | | | | |
|--|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| “V” aplicado | “I” aplicada | “R” de tierra | “V” de toque | “I” del cuerpo | “I” de tierra |
| 45 V | 1.5 A | 10Ω | 22.1 V | 22.1 mA | 11.1 mA |
| 45 V | 1.5 A | 50Ω | 21.3 V | 21.3 mA | 10.6 mA |
| 45 V | 1.5 A | 200Ω | 18.6 V | 18.6 mA | 9.32 mA |

Fuente. (Postulantes, Programa Matlab Simulink)

En la **tabla 11**, se observa los diferentes valores de voltaje de toque con malla de 15Ω obtenidos de la simulación que se realizó en el programa Matlab Simulink utilizando diferentes valores de la resistencia de la tierra.

CALCULOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES.

Resistencia de la malla de 15Ω y resistencia de la tierra de 10Ω .

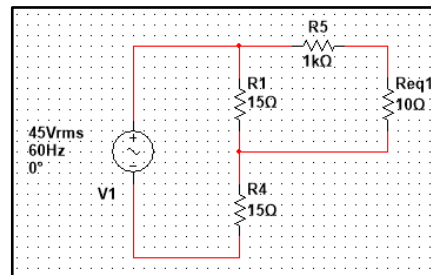


- Cálculo de R_{eq1} .

$$R_{eq1} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{eq1} = \frac{20\Omega * 20\Omega}{20\Omega + 20\Omega} = 10\Omega$$

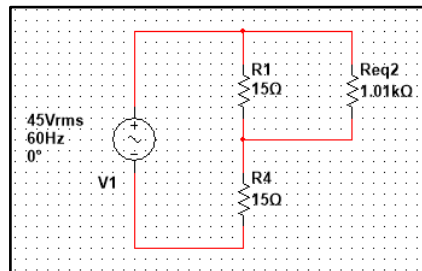
- Cálculo de R_{eq2} .



$$R_{eq2} = R_5 + R_{eq1}$$

$$R_{eq2} = 1k\Omega + 10\Omega = 1.01k\Omega$$

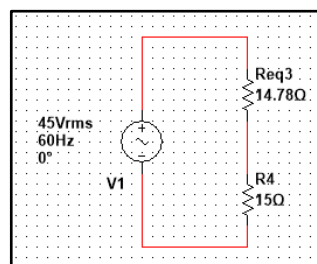
- Calculo de R_{eq3} .



$$R_{eq3} = \frac{R_1 * R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2}}$$

$$R_{eq3} = \frac{15\Omega * 1.01k\Omega}{15\Omega + 1.01\Omega} = 14.78\Omega$$

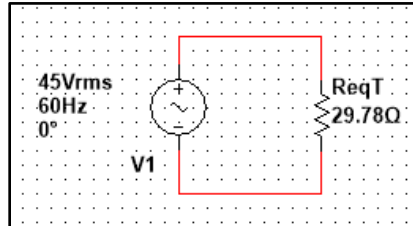
- Cálculo de R_{eqT} .



$$R_{eqT} = R_{eq3} + R_4$$

$$R_{eqT} = 14.78\Omega + 15\Omega = 29.78\Omega$$

- Cálculo de la I.



$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45V}{29.78\Omega} = 1.50A$$

- Cálculo del V.

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_{eq3} + R_4}$$

$$V = 45V * \frac{14.78\Omega}{14.78\Omega + 15\Omega} = 22.33V.$$

- Cálculo del V_{toque}

$$V_{toque} = V * \frac{R_5}{R_5 + R_{eq1}}$$

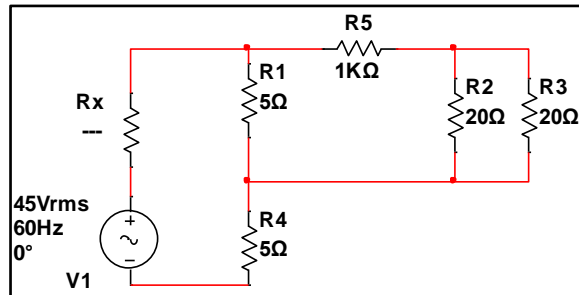
$$V_{toque} = 22.33V * \frac{1K\Omega}{1K\Omega + 10\Omega} = 22.1V$$

- Cálculo de la I_{cuerpo}

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{toque}}{R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{22.1V}{1K\Omega} = 22.1mA$$

- Resistencia de la malla de $5\ \Omega$ y resistencia de la tierra de $10\ \Omega$.

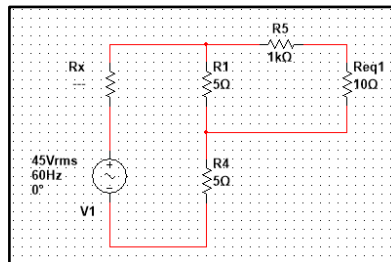


- Calculamos el valor de R_x para obtener la misma corriente a la entrada.
- Cálculo de R_{eq1}

$$R_{eq1} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{eq1} = \frac{20\Omega * 20\Omega}{20\Omega + 20\Omega} = 10\Omega.$$

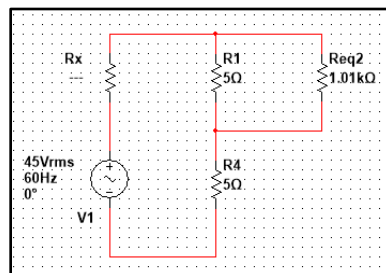
- Cálculo de R_{eq2}



$$R_{eq2} = R_5 + R_{eq1}$$

$$R_{eq2} = 1k\Omega + 10\Omega = 1.01k\Omega$$

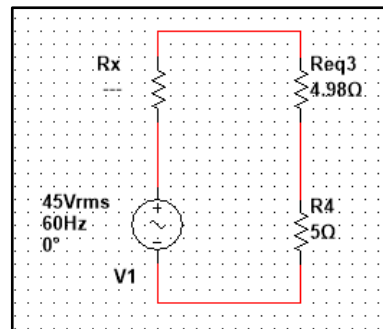
- Cálculo de R_{eq3}



$$R_{eq3} = \frac{R_1 * R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2}}$$

$$R_{eq3} = \frac{1.01k\Omega * 5\Omega}{1.01\Omega + 5\Omega} = 4.98\Omega.$$

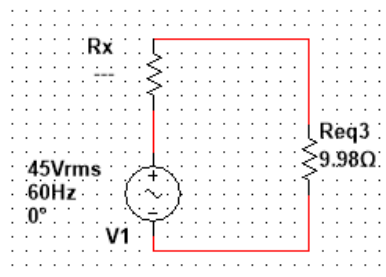
- Cálculo de R_{eq4}



$$R_{eq4} = R_{eq3} + R_4$$

$$R_{eq4} = 4.98\Omega + 5\Omega = 9.98\Omega$$

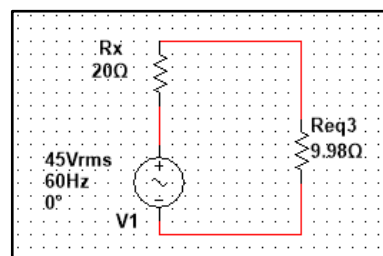
- Cálculo de R



$$R_x = R_{eqT} - R_{eq4}$$

$$R_x = 29.78\Omega - 9.98\Omega = 19.8\Omega \approx 20\Omega$$

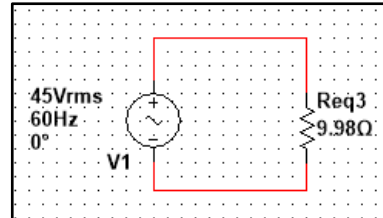
- Cálculo de R_{eqT}



$$R_{eqT} = R_x + R_{eq4}$$

$$R_{eqT} = 20 \Omega + 9.98 \Omega = 29.98 \Omega$$

- Cálculo de la I



$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45 V}{29.98 \Omega} = 1.50 A$$

- Cálculo del V

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_x + R_{eq3} + R_4}$$

$$V = 45 V * \frac{4.98 \Omega}{20 \Omega + 4.98 \Omega + 5 \Omega} = 7.47 V$$

- Cálculo del V_{toque}

$$V_{toque} = V * \frac{R_5}{R_5 + R_{eq1}}$$

$$V_{toque} = 7.47 V * \frac{1 K\Omega}{1 K\Omega + 10 \Omega} = 7.39 V$$

- Cálculo de la I_{cuerpo}

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{toque}}{R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{7.39 V}{1 K\Omega} = 7.39 mA$$

Análisis de los valores obtenidos del Voltaje de Toque

Para el primer caso se consideró que una malla óptima tiene una resistencia de 5Ω y en el segundo caso se consideró que una malla no óptima tiene una resistencia de 15Ω , para los dos casos se midieron los potenciales de toque y la corriente que circula por el cuerpo humano.

Cuanto tenemos una malla de 5Ω y una resistencia de 10Ω , la variación de potencial se reduce en un 33.84% con respecto a un sistema de mallado de 15Ω , ahora aumentamos la resistencia del terreno a 50Ω obteniendo una variación de potencial de 33.52% , y con una resistividad de 200Ω se obtuvo una la variación de potencial de 33.6% .

Para el caso 1 y caso 2, se varió la resistencia de tierra entre el suelo y la malla con valores de 10, 50 y 200 ohmios en este punto se observa que existen cambios en la corriente que circula por la persona teniendo como resultado lo siguiente.

La corriente que va a circular por las resistencias que son el equivalente a la resistencia del cuerpo se reduce un 33.43% al utilizar una resistencia en la malla de 5Ω y una resistencia del terreno de 10Ω , luego se utilizó una resistencia del terreno de 50Ω y se observó que el porcentaje de paso de corriente por el cuerpo humano aumento a un 33.38% , finalmente se realizó la misma prueba con una resistencia del terreno de 200Ω en la cual se obtuvo un porcentaje de 33.49% .

12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES).

IMPACTO TÉCNICO.

El proyecto permite demostrar el estudio de la funcionalidad de la malla de puesta a tierra, los voltajes de paso y toque, las corrientes que se disipan por ella y como afectan al cuerpo humano

IMPACTO SOCIAL.

La implementación del proyecto permite a docentes y estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica socializar y opinar sobre los voltajes de paso y de toque.

13. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO.

| Detalle | Cantidad | V. Unitario | V. Total |
|--|----------|-------------|----------|
| Transformador de Suelda Truper - 110V | 1 | 150.00 | 150.00 |
| Multímetro Digital Somy Max DT9208A | 1 | 21.00 | 21.00 |
| Resistencias de Potencia de 10 W | 18 | 0.75 | 13.50 |
| Resistencias de Potencia de 20 W | 47 | 0.44 | 20.68 |
| Jacks | 20 | 0.15 | 3.00 |
| Selector Switch BD33 – 3 posiciones | 3 | 4.02 | 12.06 |
| Selector Switch DW26-20 – 4 posiciones | 2 | 8.15 | 18.30 |
| TOTAL | | | 238.54 |

El presupuesto total de la construcción del prototipo tomando en cuenta los elementos constitutivos que pueden ser cambiados es de 238.54 dólares.

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES.

- Existe una diversa información acerca de lo que son las mallas a tierra, pero toda esta información se encuentra dentro de una sola norma que es la IEEE STD 80-2000.
- Se observa que los resultados obtenidos en la simulación de los circuitos de voltaje de toque y de paso son semejantes a los obtenidos en el prototipo.
- La diferencia de potencial y la corriente que se presentan en el voltaje de paso varían de acuerdo a la resistencia del cuerpo y la resistencia de tierra.
- La diferencia de potencial y la corriente que se presentan en el voltaje de toque varían de acuerdo a la resistencia del cuerpo y la resistencia de tierra.

RECOMENDACIONES.

- Para tener Voltaje de Paso y de Toque acordes se deben analizar de manera profunda la resistencia del terreno en donde se va a colocar la malla a tierra debido a que está directamente relacionada con los voltajes de toque y de paso.
- Para diseñar una malla de tierra se debe tomar muy en cuenta el voltaje de toque y de paso ya que son fundamentales dentro de la malla porque son aquellos que aseguran la integridad física de los operadores como de los equipos.
- Se recomienda para realización de este tipo de pruebas exista la supervisión de una persona especializada en el tema porque se manejan corrientes peligrosas las cuales pueden repercutir en la integridad física de los estudiantes.

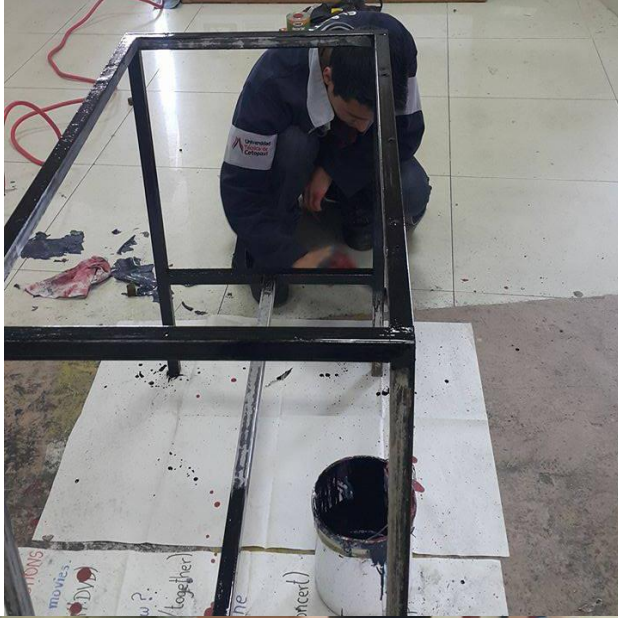
- Para utilizar el prototipo, al momento de realizar las mediciones tener en cuenta que el amperímetro se conecta en serie con el circuito y el voltímetro en paralelo, porque existen salidas para la medición de voltajes y corrientes en puntos específicos para la realización de las mismas.
- Para realizar las pruebas en el prototipo, tomar en cuenta que por la estructura de la torre va a circular una corriente de falla por lo cual se debe evitar el contacto directo con la misma.
- Con el prototipo los estudiantes pueden observar de manera más pedagógica los fenómenos que se presentan dentro de un sobrevoltaje.

15. BIBLIOGRAFIA.

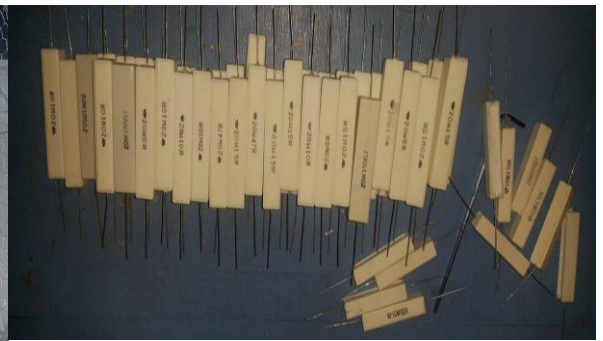
- AGUILAR, P. (2011). Obtenido de <http://es.slideshare.net/PabloAG/mtodo-experimental>
- AGUILLEIRO, I., & MARTINEZ, M. (s.f.). *TÉCNICAS MODERNAS PARA LA MEDICIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN ZONAS URBANAS.*
- ASTUDILLO, C., & CAJAMARCA, M. (2012). *CÁLCULO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.*
- BRAVO, V. (2015). *Metodo Experimental y Científico.* Obtenido de <http://es.slideshare.net/VctorP/metodo-experimental-y-cientifico>
- DE OLIVEIRA, P. (2007). *AUDITORIA DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.*
- GALICIA, M. (2015). *DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE DISEÑO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.*
- GONZÁLEZ, C. (2003). *Cálculo de corrientes de cortocircuito en bajo voltaje.*
- MARTINEZ, J. M., & VELÁZQUEZ, I. (2008). *Aplicaciones del medidor digital de resistencia de puesta a Tierra.*
- RELSAMEX. (Octubre de 2016). *Subestaciones Electricas.* Obtenido de <http://www.relsamex.com/subestaciones-electricas/>
- RUELAS, R. (2010). *Sistema de Puesta a Tierra - Clasificación.*
- TORREBLANCO, M. (2014). *Técnicas de Alto Voltaje.* Obtenido de http://www.academia.edu/9293010/TRABAJO_-_SOBRETENSIONES
- UTE, S. a. (2010). *Reglamento de Bajo Voltaje - Puestas a Tierra.*
- VILLACRES, P., & POZO, W. (2011). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIONES.*

ANEXOS

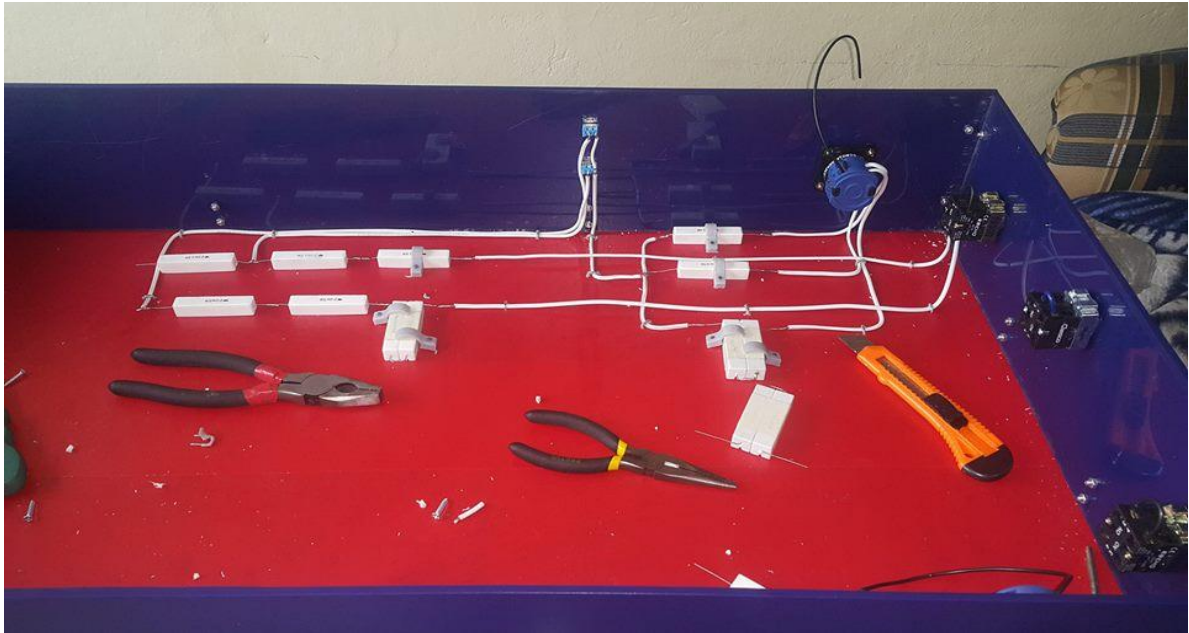
| | | |
|----------------|---------------------------------------|---------------------|
| ANEXO 1 | CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO | ANEXO 1 |
| | | HOJA: 1 DE:4 |
| | | |



| | | |
|----------------|---------------------------------------|---------------------|
| ANEXO 2 | CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO | ANEXO 2 |
| | | HOJA: 2 DE:4 |

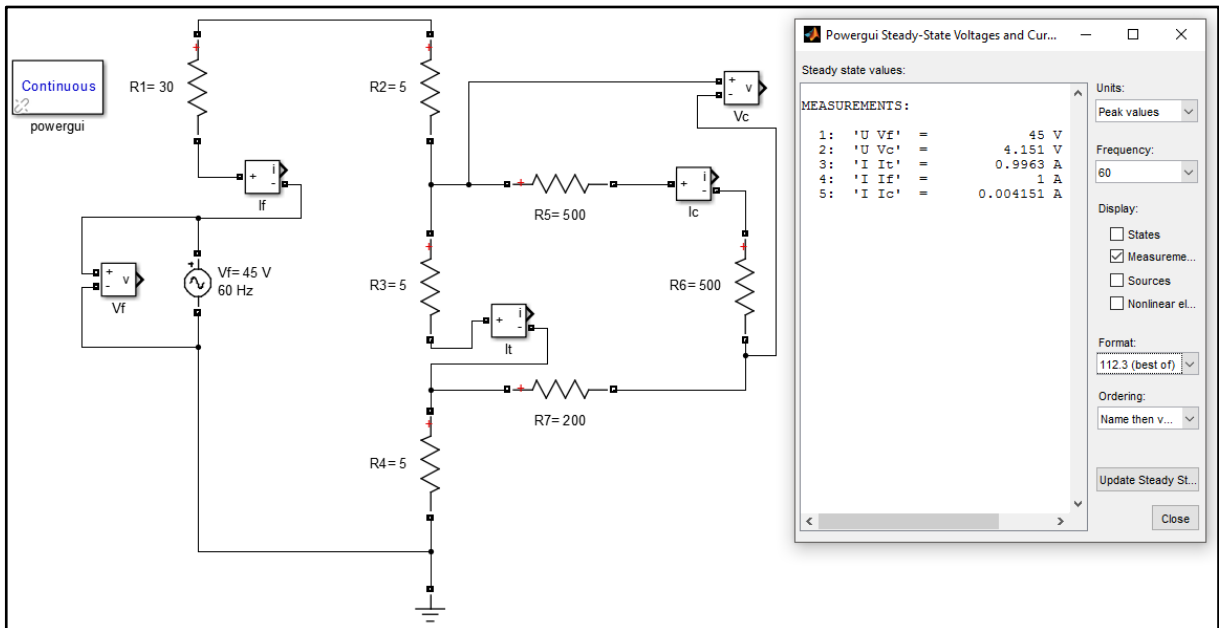
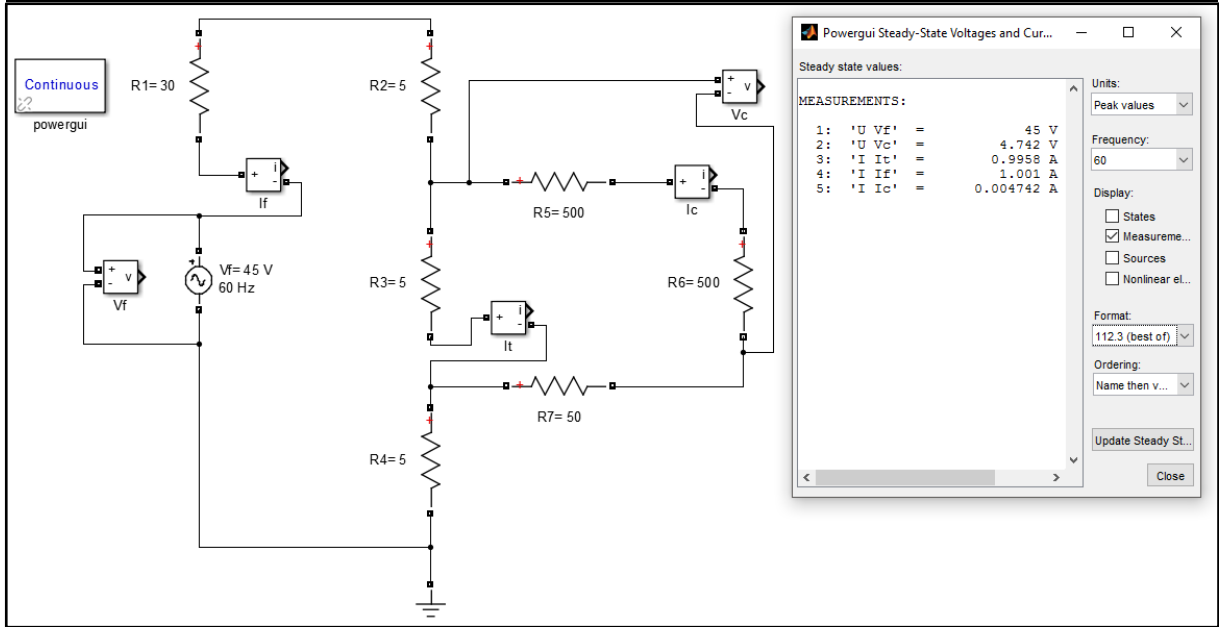


| | | |
|----------------|---------------------------------------|---------------------|
| ANEXO 3 | CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO | ANEXO 3 |
| | | HOJA: 3 DE:4 |
| | | |



| | | |
|----------------|---------------------------------------|---------------------|
| ANEXO 4 | CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO | ANEXO 4 |
| | | HOJA: 4 DE:4 |
| | | |



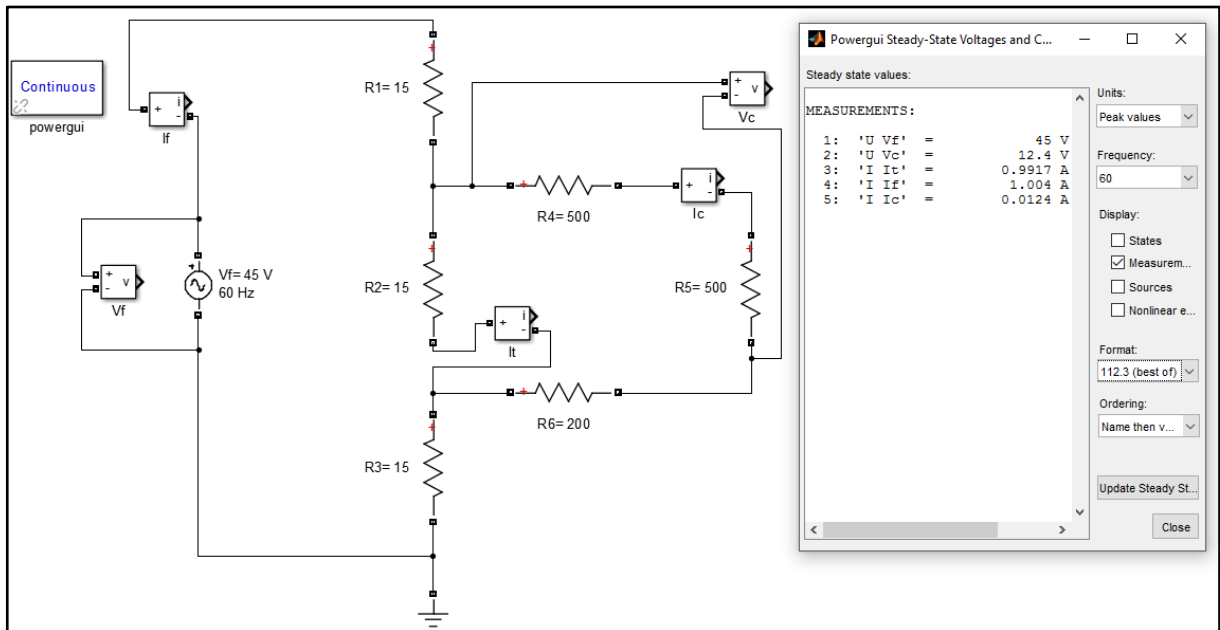
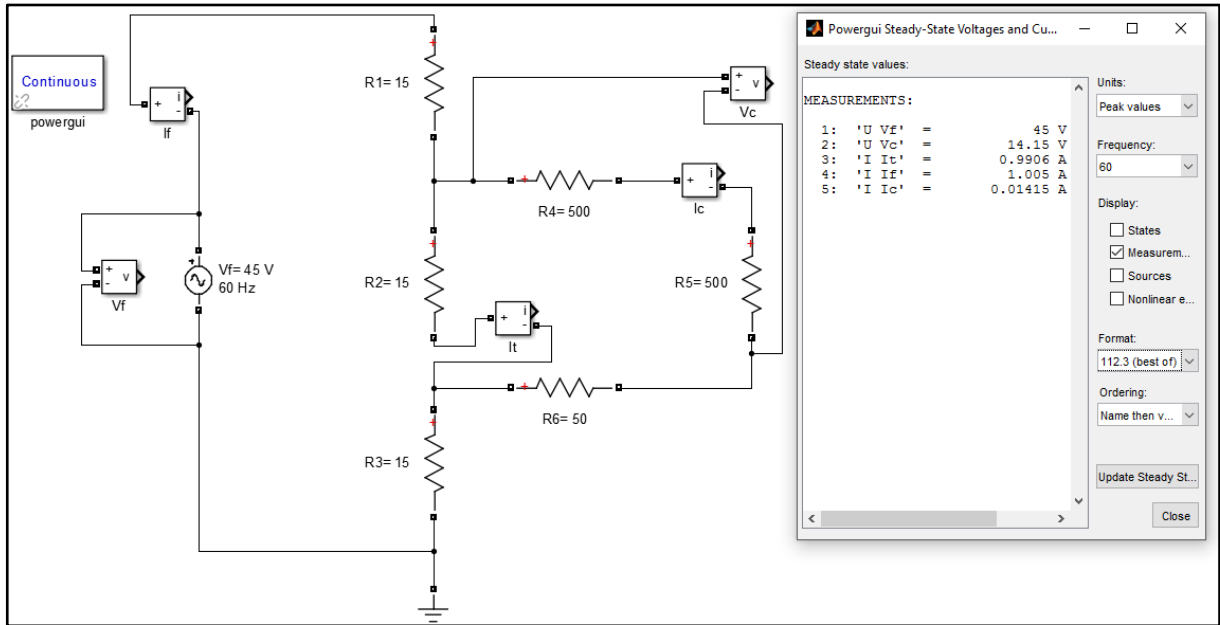


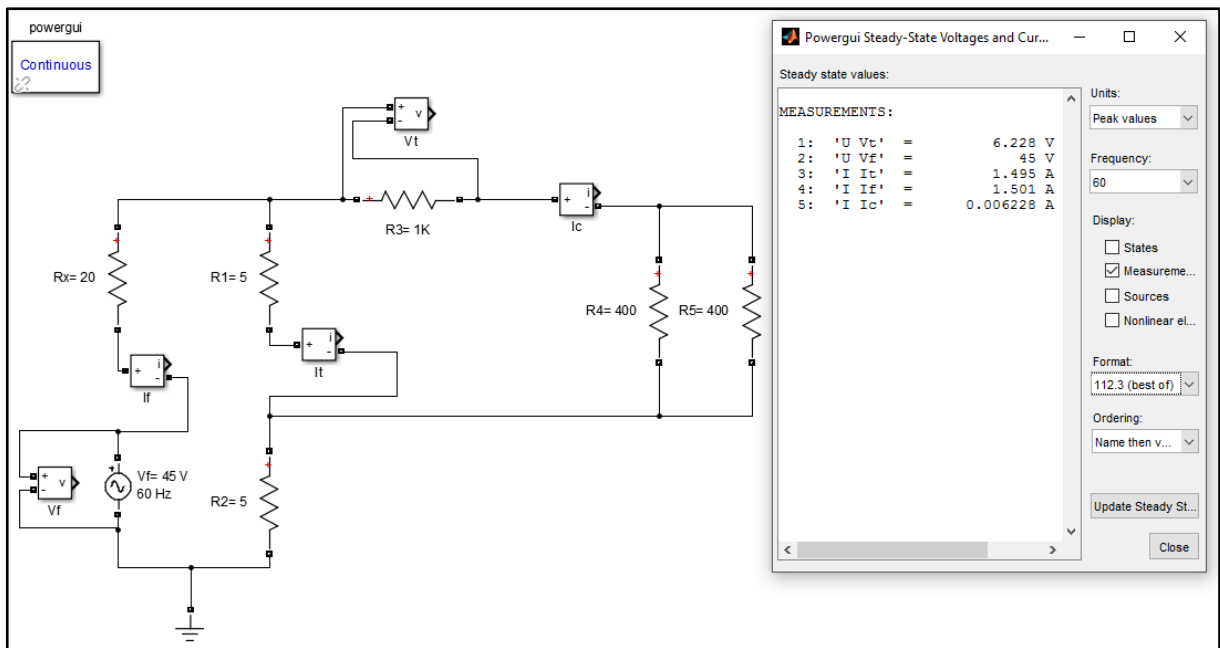
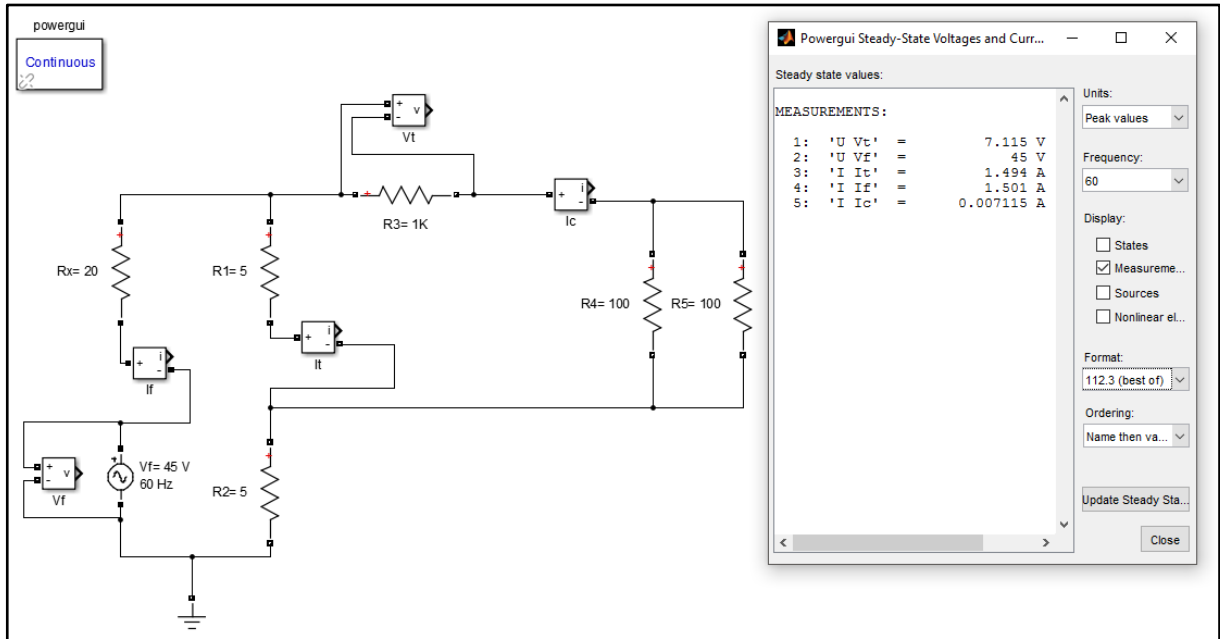
ANEXO 6

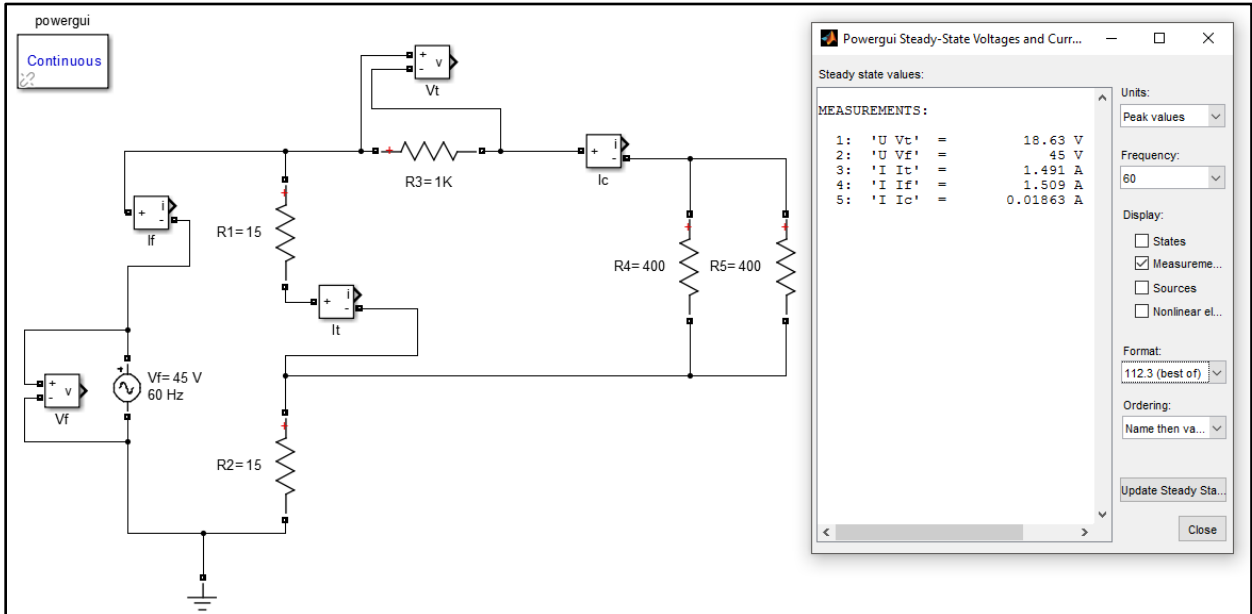
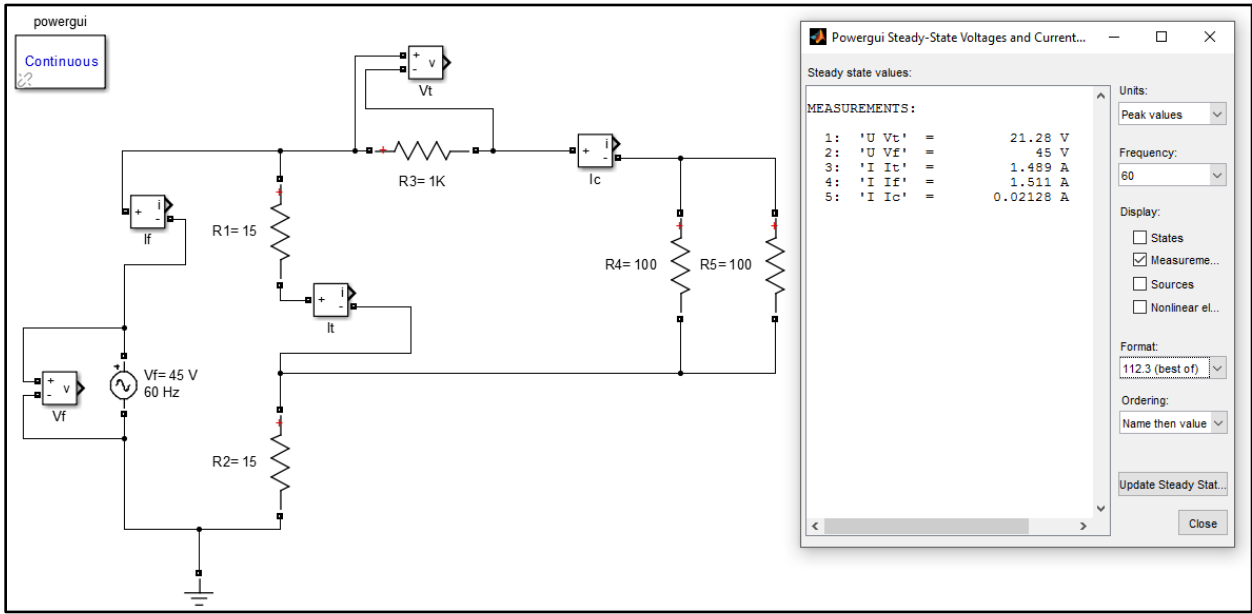
VOLTAJE DE PASO.
Circuitos simulados para la malla de 15 Ω y en la tierra resistencias de 50 y 200 Ω .

ANEXO 6

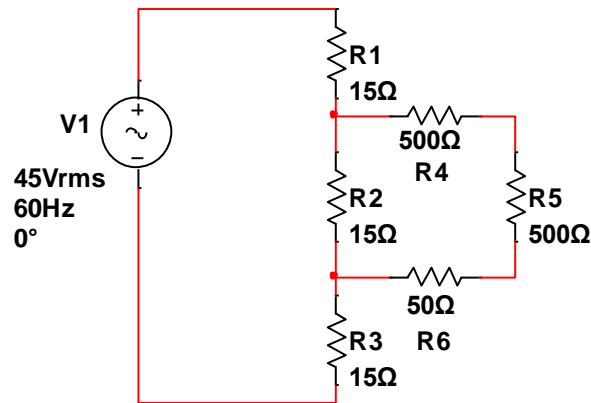
HOJA: 1 DE:1







| | | |
|---------|--|--------------|
| ANEXO 9 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω. | ANEXO 9 |
| | | HOJA: 1 DE:2 |



$$R_{eq1} = R_4 + R_5 + R_6$$

$$R_{eq1} = 500 \Omega + 500 \Omega + 50 \Omega = 1.05 \text{ K}\Omega$$

$$R_{eq2} = \frac{R_2 * R_{eq1}}{R_2 + R_{eq1}}$$

$$R_{eq2} = \frac{15 \Omega * 1.05 \text{ K}\Omega}{15 \Omega + 1.05 \text{ K}\Omega} = 14.79 \Omega$$

$$R_{eqT} = R_1 + R_{eq2} + R_3$$

$$R_{eqT} = 15 \Omega + 14.79 \Omega + 15 \Omega = 44.79 \Omega$$

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45 \text{ V}}{44.79 \Omega} = 1 \text{ A}$$

$$V = V_1 * \frac{R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2} + R_3}$$

| | | |
|-----------------|---|---------------------|
| ANEXO 10 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. | ANEXO 10 |
| | Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω . | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$V = 45 V * \frac{14.79 \Omega}{15 \Omega + 14.79 \Omega + 15 \Omega}$$

$$V = 14.86 V$$

$$V_{paso} = V * \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

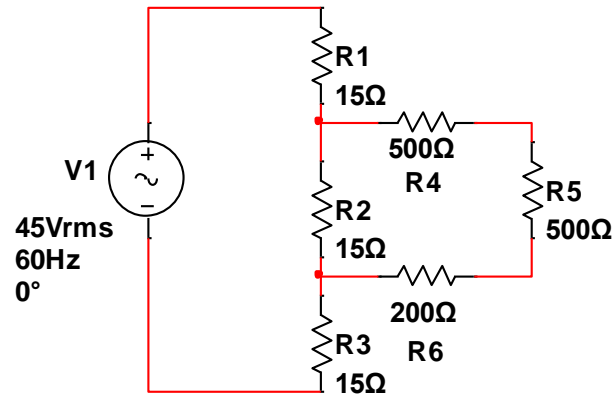
$$V_{paso} = 14.86 V * \frac{500 \Omega + 500 \Omega}{500 \Omega + 500 \Omega + 50 \Omega}$$

$$V_{paso} = 14.15 V.$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{paso}}{R_4 + R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{14.15 V}{500 \Omega + 500 \Omega} = 14.15 mA.$$

| | | |
|----------|--|---------------------|
| ANEXO 11 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. | ANEXO 11 |
| | Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 200 Ω. | HOJA: 1 DE:2 |



$$R_{eq1} = R_4 + R_5 + R_6$$

$$R_{eq1} = 500 \Omega + 500 \Omega + 200 \Omega = 1.2 \text{ K}\Omega$$

$$R_{eq2} = \frac{R_2 * R_{eq1}}{R_2 + R_{eq1}}$$

$$R_{eq2} = \frac{15 \Omega * 1.2 \text{ K}\Omega}{15 \Omega + 1.2 \text{ K}\Omega} = 14.81 \Omega$$

$$R_{eqT} = R_1 + R_{eq2} + R_3$$

$$R_{eqT} = 15 \Omega + 14.81 \Omega + 15 \Omega = 44.81 \Omega$$

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45 \text{ V}}{44.81 \Omega} = 1 \text{ A}$$

$$V = V_1 * \frac{R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2} + R_3}$$

| | | |
|-----------------|--|---------------------|
| ANEXO 12 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. | ANEXO 12 |
| | Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 200 Ω . | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$V = 45 V * \frac{14.81 \Omega}{15 \Omega + 14.81 \Omega + 15 \Omega}$$

$$V = 14.87 V$$

$$V_{paso} = V * \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

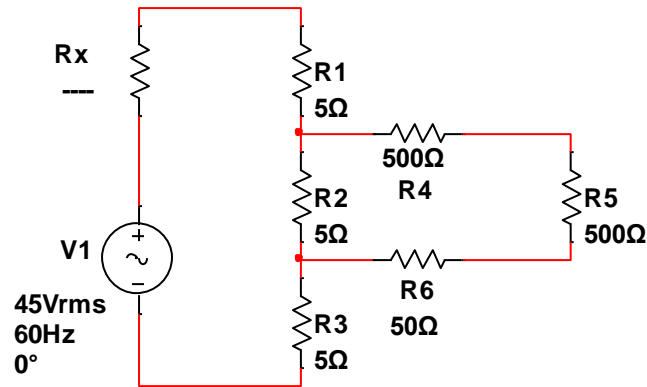
$$V_{paso} = 14.87 V * \frac{500 \Omega + 500 \Omega}{500 \Omega + 500 \Omega + 200 \Omega}$$

$$V_{paso} = 12.39 V.$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{paso}}{R_4 + R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{12.39 V}{500 \Omega + 500 \Omega} = 12.39 mA.$$

| | | |
|----------|---|---------------------|
| ANEXO 13 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω. | ANEXO 13 |
| | | HOJA: 1 DE:2 |



$$R_{eq1} = R_4 + R_5 + R_6$$

$$R_{eq1} = 500 \Omega + 500 \Omega + 50 \Omega = 1.05 \text{ K}\Omega$$

$$R_{eq2} = \frac{R_2 * R_{eq1}}{R_2 + R_{eq1}}$$

$$R_{eq2} = \frac{5 \Omega * 1.05 \text{ K}\Omega}{5 \Omega + 1.05 \text{ K}\Omega} = 4.97 \Omega$$

$$R_{eq3} = R_1 + R_{eq2} + R_3$$

$$R_{eq3} = 5 \Omega + 4.97 \Omega + 5 \Omega = 14.97 \Omega$$

$$R_x = R_{eqT} - R_{eq3}$$

$$R_x = 44.78 \Omega - 14.97 \Omega = 29.81 \Omega \approx 30 \Omega$$

$$R_{eqT} = R_x + R_{eq3}$$

$$R_{eqT} = 30 \Omega + 14.97 \Omega = 44.97 \Omega$$

| | | |
|-----------------|--|---------------------|
| ANEXO 14 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. | ANEXO 14 |
| | Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω . | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45 V}{44.97 \Omega} = 1 A$$

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_x + R_1 + R_{eq3} + R_3}$$

$$V = 45 V * \frac{4.97 \Omega}{30 \Omega + 5 \Omega + 4.97 \Omega + 5 \Omega} = 4.97 V$$

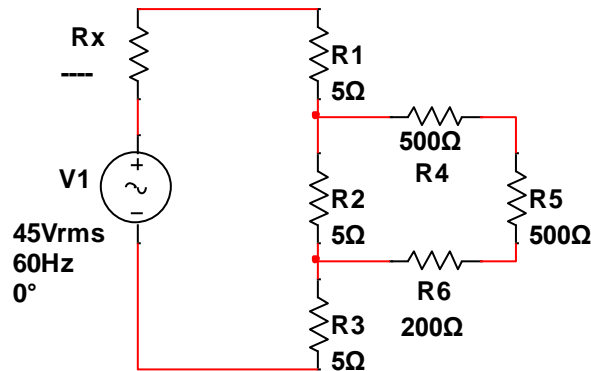
$$V_{paso} = V * \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

$$V_{paso} = 4.97 V * \frac{500 \Omega + 500 \Omega}{500 \Omega + 500 \Omega + 50 \Omega} = 4.73 V$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{paso}}{R_4 + R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{4.73 V}{500 \Omega + 500 \Omega} = 4.73 mA$$

| | | |
|-----------------|--|---------------------|
| ANEXO 15 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. | ANEXO 14 |
| | Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 200 Ω . | HOJA: 1 DE:2 |
| | | |



$$R_{eq1} = R_4 + R_5 + R_6$$

$$R_{eq1} = 500 \Omega + 500 \Omega + 200 \Omega = 1.2 \text{ K}\Omega$$

$$R_{eq2} = \frac{R_2 * R_{eq1}}{R_2 + R_{eq1}}$$

$$R_{eq2} = \frac{5 \Omega * 1.2 \text{ K}\Omega}{5 \Omega + 1.2 \text{ K}\Omega} = 4.97 \Omega$$

$$R_{eq3} = R_1 + R_{eq2} + R_3$$

$$R_{eq3} = 5 \Omega + 4.97 \Omega + 5 \Omega = 14.97 \Omega$$

$$R_x = R_{eqT} - R_{eq3}$$

$$R_x = 44.78 \Omega - 14.97 \Omega = 29.81 \Omega \approx 30 \Omega$$

$$R_{eqT} = R_x + R_{eq3}$$

$$R_{eqT} = 30 \Omega + 14.97 \Omega = 44.97 \Omega$$

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

| | | |
|-----------------|---|---------------------|
| ANEXO 15 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE PASO. | ANEXO 15 |
| | Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 200 Ω . | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$I = \frac{45 V}{44.97 \Omega} = 1 A$$

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_x + R_1 + R_{eq3} + R_3}$$

$$V = 45 V * \frac{4.97 \Omega}{30 \Omega + 5 \Omega + 4.97 \Omega + 5 \Omega} = 4.97 V$$

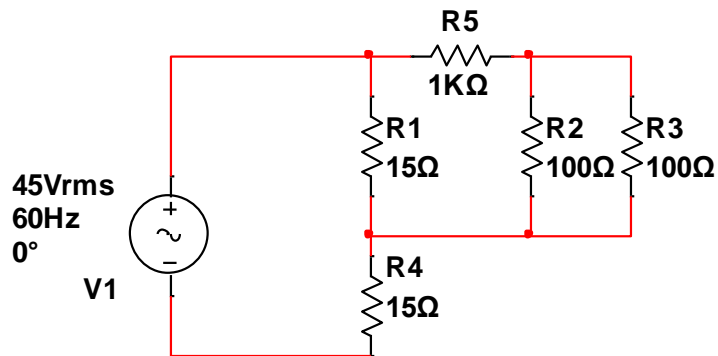
$$V_{paso} = V * \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

$$V_{paso} = 4.97 V * \frac{500 \Omega + 500 \Omega}{500 \Omega + 500 \Omega + 200 \Omega} = 4.14 V$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{paso}}{R_4 + R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{4.14 V}{500 \Omega + 500 \Omega} = 4.14 mA$$

| | | |
|----------|---|---------------------|
| ANEXO 16 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 16 |
| | Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω. | HOJA: 1 DE:2 |
| | | |



$$R_{eq1} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{eq1} = \frac{100 \Omega * 100 \Omega}{100 \Omega + 100 \Omega} = 50 \Omega$$

$$R_{eq2} = R_5 + R_{eq1}$$

$$R_{eq2} = 1k\Omega + 50\Omega = 1.05K\Omega$$

$$R_{eq3} = \frac{R_1 * R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2}}$$

$$R_{eq3} = \frac{15\Omega * 1.05k\Omega}{15\Omega + 1.05\Omega} = 14.78\Omega$$

$$R_{eqT} = R_{eq3} + R_4$$

$$R_{eqT} = 14.78\Omega + 15\Omega = 29.78\Omega$$

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45 V}{29.78 \Omega} = 1.50 A$$

| | | |
|-----------------|---|---------------------|
| ANEXO 17 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 17 |
| | Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω . | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_{eq3} + R_4}$$

$$V = 45 V * \frac{14.78 \Omega}{14.78 \Omega + 15 \Omega} = 22.33 V$$

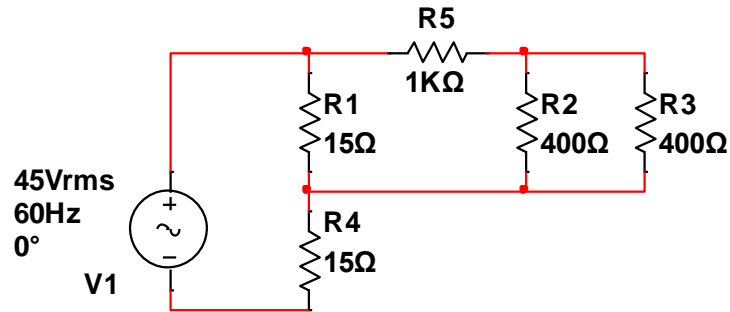
$$V_{toque} = V * \frac{R_5}{R_5 + R_{eq1}}$$

$$V_{toque} = 22.33 V * \frac{1 K\Omega}{1 K\Omega + 50 \Omega} = 21.27 V$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{toque}}{R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{21.27 V}{1 K\Omega} = 21.27 mA$$

| | | |
|----------|--|---------------------|
| ANEXO 18 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 18 |
| | Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 200 Ω. | HOJA: 1 DE:2 |
| | | |



$$R_{eq1} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{eq1} = \frac{400 \Omega * 400 \Omega}{400 \Omega + 400 \Omega} = 200 \Omega$$

$$R_{eq2} = R_5 + R_{eq1}$$

$$R_{eq2} = 1k\Omega + 200\Omega = 1.2k\Omega$$

$$R_{eq3} = \frac{R_1 * R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2}}$$

$$R_{eq3} = \frac{15\Omega * 1.2k\Omega}{15\Omega + 1.2k\Omega} = 14.81\Omega$$

$$R_{eqT} = R_{eq3} + R_4$$

$$R_{eqT} = 14.81\Omega + 15\Omega = 29.81\Omega$$

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

| | | |
|-----------------|--|---------------------|
| ANEXO 19 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 19 |
| | Resistencia de la malla de 15 Ω y resistencia de la tierra de 200 Ω . | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$I = \frac{45 V}{29.81 \Omega} = 1.50 A$$

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_{eq3} + R_4}$$

$$V = 45 V * \frac{14.81 \Omega}{14.81 \Omega + 15 \Omega} = 22.36 V$$

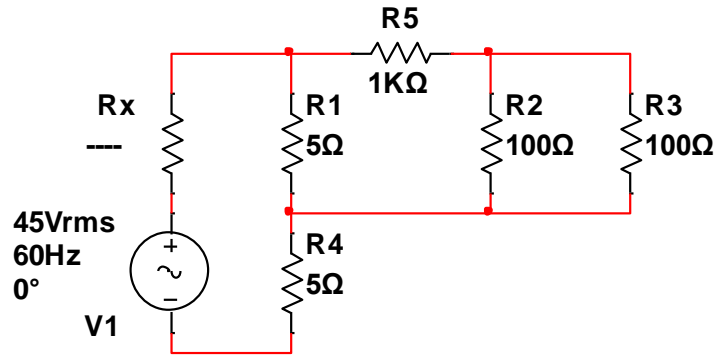
$$V_{toque} = V * \frac{R_5}{R_5 + R_{eq1}}$$

$$V_{toque} = 22.36 V * \frac{1 K\Omega}{1 K\Omega + 200 \Omega} = 18.63 V$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{toque}}{R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{18.63 V}{1 K\Omega} = 18.63 mA$$

| | | |
|----------|---|---------------------|
| ANEXO 20 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 20 |
| | Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω . | HOJA: 1 DE:2 |



$$R_{eq1} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{eq1} = \frac{100\Omega * 100\Omega}{100\Omega + 100\Omega} = 50\Omega$$

$$R_{eq2} = R_5 + R_{eq1}$$

$$R_{eq2} = 1k\Omega + 50\Omega = 1.05k\Omega$$

$$R_{eq3} = \frac{R_1 * R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2}}$$

$$R_{eq3} = \frac{5\Omega * 1.05K\Omega}{5\Omega + 1.05K\Omega} = 4.98\Omega$$

$$R_{eq4} = R_{eq3} + R_4$$

$$R_{eq4} = 4.98\Omega + 5\Omega = 9.98\Omega$$

$$R_x = R_{eqT} - R_{eq4}$$

$$R_x = 29.78\Omega - 9.98\Omega = 19.8\Omega \approx 20\Omega$$

$$R_{eqT} = R_x + R_{eq4}$$

$$R_{eqT} = 20\Omega + 9.98\Omega = 29.98\Omega$$

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

| | | |
|-----------------|---|---------------------|
| ANEXO 20 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 20 |
| | Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω. | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$I = \frac{45 V}{29.98 \Omega} = 1.50 A$$

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_x + R_{eq3} + R_4}$$

$$V = 45 V * \frac{4.98 \Omega}{20 \Omega + 4.98 \Omega + 5 \Omega} = 7.47 V$$

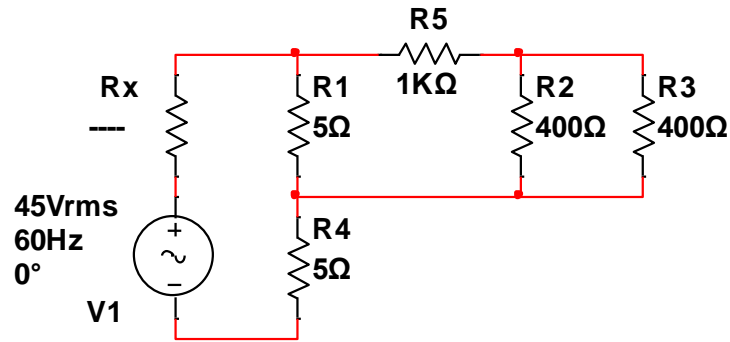
$$V_{toque} = V * \frac{R_5}{R_5 + R_{eq1}}$$

$$V_{toque} = 7.47 V * \frac{1 K\Omega}{1 K\Omega + 50 \Omega} = 7.11 V$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{toque}}{R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{7.11 V}{1 K\Omega} = 7.11 mA$$

| | | |
|----------|--|---------------------|
| ANEXO 21 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 21 |
| | Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω. | HOJA: 1 DE:2 |



$$R_{eq1} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{eq1} = \frac{400\Omega * 400\Omega}{400\Omega + 400\Omega} = 200\Omega$$

$$R_{eq2} = R_5 + R_{eq1}$$

$$R_{eq2} = 1k\Omega + 200\Omega = 1.2k\Omega$$

$$R_{eq3} = \frac{R_1 * R_{eq2}}{R_1 + R_{eq2}}$$

$$R_{eq3} = \frac{5\Omega * 1.2K\Omega}{5\Omega + 1.2K\Omega} = 4.98\Omega$$

$$R_{eq4} = R_{eq3} + R_4$$

$$R_{eq4} = 4.98\Omega + 5\Omega = 9.98\Omega$$

$$R_x = R_{eqT} - R_{eq4}$$

$$R_x = 29.78\Omega - 9.98\Omega = 19.8\Omega \approx 20\Omega$$

$$R_{eqT} = R_x + R_{eq4}$$

$$R_{eqT} = 20\Omega + 9.98\Omega = 29.98\Omega$$

| | | |
|----------|---|---------------------|
| ANEXO 22 | CALCULOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE TOQUE. | ANEXO 22 |
| | Resistencia de la malla de 5 Ω y resistencia de la tierra de 50 Ω . | HOJA: 2 DE:2 |
| | | |

$$I = \frac{V_1}{R_{eqT}}$$

$$I = \frac{45 V}{29.98 \Omega} = 1.50 A$$

$$V = V_1 * \frac{R_{eq3}}{R_x + R_{eq3} + R_4}$$

$$V = 45 V * \frac{4.98 \Omega}{20 \Omega + 4.98 \Omega + 5 \Omega} = 7.47 V$$

$$V_{toque} = V * \frac{R_5}{R_5 + R_{eq1}}$$

$$V_{toque} = 7.47 V * \frac{1 K\Omega}{1 K\Omega + 200 \Omega} = 6.23 V$$

$$I_{cuerpo} = \frac{V_{toque}}{R_5}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{6.23 V}{1 K\Omega} = 6.23 mA$$