

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Maestría en Ingeniería Eléctrica



TESIS

**MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE CORROSIÓN EN ELECTRODO DE TIERRA PARA
USO INDUSTRIAL**

**Que para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería Eléctrica**

**Presenta
Ing. Jorge Héctor Juárez Martínez
G10070137**

**Director de Tesis
DR. Gastón Hernández Martínez**

**Co-Director de Tesis
M.C Hermenegildo Cisneros Villegas**



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cd. Madero, Tams., a **29 de Mayo de 2019**

OFICIO No.: U2.034/19
ÁREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS.

ING. JORGE HÉCTOR JUÁREZ MARTÍNEZ
NO. DE CONTROL G10070137
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
SECRETARIO:	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
VOCAL:	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
SUPLENTE:	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DIRECTOR DE TESIS :	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE CORROSIÓN EN ELECTRODO DE TIERRA PARA USO INDUSTRIAL"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Por mi patria y por mi bien"

DR. JOSÉ AARÓN MELO BANDA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

c.c.p.- Archivo
Minuta
JAMB 'RCG' jar



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam.
Tel. 01 (833) 357 48 20, e-mail: dir01_cdmadero@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.cdmadero.tecnm.mx

Dedicatoria

El siguiente trabajo de tesis se lo dedico:

A Dios que siempre ha estado conmigo dándome fortaleza para salir adelante en su camino, porque a pesar de las luchas y las pruebas él ha estado ahí conmigo.

A mi madre Alma Rosa Martínez García que ya no está presente conmigo, Dios me la presto por un tiempo y ahora está en el cielo, a mi padre Héctor Juárez Segura, quien hasta el momento me ha apoyado. a los dos les agradezco por el apoyo y cariño que me ofrecieron durante mi formación profesional.

Se lo dedico a mis compañeros por ayudarme a salir adelante a pesar de conocer mi situación siempre estuvieron ahí apoyándome y animándome a cumplir mis propósitos.

Agradecimientos

Agradezco a Dios padre por haberme brindado salud y dejarme vivir este logro tan importante para mi vida. Agradezco a mi familia por haberme dado este apoyo necesario para realizar mi formación profesional. También al Instituto Tecnológico de Cd. Madero (I.T.C.M), por haber sido mi casa de estudios, así como todos los maestros de esta institución por brindarme una buena formación profesional, así como también la División de Estudios de Posgrado e Investigación del (I.T.C.M). Doy por último mi gratitud a la siguiente persona por haberme dado su apoyo en el transcurso de estos 2 años, por sus palabras y por orientarme en mi proyecto.

Dr. Gastón Hernández Martínez.

“MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE CORROSIÓN EN ELECTRODO DE TIERRA PARA USO INDUSTRIAL.”

Presenta:

JORGE HÉCTOR JUÁREZ MARTÍNEZ.

Asesor:

DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ.

Abstract

In the present work was designed, analyzed and performed the electronic measurement of corrosion in ground electrode for industrial use, likewise the analysis of results was checked using the software Arduino 1.8.4, we can see the graph of the corrosion of the said electrode.

Chapter 1 presents a brief review of the objectives that were considered during this analysis of corrosion measurement in ground systems, as well as their importance in the industry or small companies etc., nowadays, the tools to be used as are the software's are very useful within engineering.

Chapter 2 describes the entire theory that was needed to understand the development of a safe and reliable electronic measurement of corrosion in a land system. It exposes the problematic of the systems of grounding, as well as the different parameters that influence the corrosion of the ground electrode, between the parameters are the values of the resistance of the electrode and the earth, the resistivity of the ground and the corrosion In a ground rod, in order to obtain a safe and reliable ground system, a measurement of the electrode behavior must be made.

In chapter 3 the corrosion measurement system is exposed through the rugosity of the rod, visualization of the magnetic field in smooth and rough conductor, as well as the type of sensor or roughness measuring techniques that can help us within the industry.

While in Chapter 4 links the objective of Chapter 3, where the electronic measurement of corrosion in ground electrode for industrial use is made, this is considered a more efficient check of analysis and results, to determine if there is an electrode magnetic field of ground and likewise have a safe and reliable system, obtaining the graph of the electronic measurement of corrosion using the Arduino software 1.8.4

Resumen

En el presente trabajo se diseñó, analizo y realizo la medición electrónica de corrosión en electrodo de tierra para uso industrial, así mismo se comprobó el análisis de resultados usando el software Arduino 1.8.4, podremos observar la gráfica de la corrosión del dicho electrodo.

En el capítulo 1 se presenta una reseña breve de los objetivos que se consideraron durante este análisis de medición de corrosión en sistemas de tierra, así como su importancia en la industria o empresas pequeñas etc., ahora en la actualidad, las herramientas a utilizar como son los software son de mucha utilidad dentro de la ingeniería.

En el capítulo 2 se describe toda la teoría que se necesitó comprender para la elaboración de una medición electrónica de corrosión en sistema de tierras seguro y confiable. Se expone la problemática de los sistemas de puesta a tierra, así como los distintos parámetros que influyen en la corrosión del electrodo de tierra, entre los parámetros se encuentran los valores de la resistencia del electrodo y la tierra, la resistividad del terreno y la corrosión en varilla de tierra, para llegar a la obtención de un sistema de tierra seguro y confiable se debe hacer una medición del comportamiento del electrodo.

En el capítulo 3 se expone el sistema de medición de corrosión a través de la rugosidad de la varilla, visualización del campo magnético en conductor liso y rugoso, como también el tipo de sensor o técnicas de medición de rugosidad que nos pueden ayudar dentro de la industria.

Mientras que en el capítulo 4 enlaza el objetivo del capítulo 3, donde se realiza la medición electrónica de corrosión en electrodo de tierra para uso industrial, con esto se considera una comprobación más eficiente de análisis y resultados, para determinar si hay campo magnético en electrodo de tierra y así mismo tener un sistema seguro y confiable, obteniendo la gráfica de la medición electrónica de corrosión mediante el software Arduino 1.8.4

Lista de Figuras

	<i>Página</i>
Figura 2.1:	Detalle de instalación de electrodo de tierra tipo copperweld..... 22
Figura 2.2:	Electrodo de tierra tipo placa..... 23
Figura 2.3:	Anillo de tierra..... 24
Figura 2.4:	Electrodo de tierra tipo malla..... 24
Figura 2.5:	Electrodo de tierra tipo rehilete..... 25
Figura 2.6:	Electrodo de tierra del tipo químico..... 25
Figura 2.7:	Sistema radial..... 27
Figura 2.8:	Sistema anillo..... 27
Figura 2.9:	Sistema de red o malla..... 28
Figura 2.10:	Rayo producido por una nube cargada negativamente contra tierra según el modelo de Hasbrouk..... 30
Figura 2.11:	Evolución de la descarga atmosférica..... 33
Figura 2.12:	Sistema franklin..... 36
Figura 2.13:	Sistema tipo jaula Faraday..... 38
Figura 2.14:	Estructura de protección de descarga atmosférica..... 39
Figura 2.15:	Protección con sistema tipo jaula Faraday..... 40
Figura 2.16:	Apartarrayos..... 41
Figura 2.17:	Posición de electrodos y gráfica de valores de resistencia eléctrica vs. Distancia..... 46
Figura 2.18:	Separación de electrodo a una distancia de 1.83 m entre sí..... 49
Figura 2.19:	Elementos que constituye la resistencia de un electrodo..... 50
Figura 2.20:	Megger de Cuatro Terminales..... 58
Figura 3.1:	Campo magnético en conductor uniforme..... 64
Figura 3.2:	Campo magnético circula alrededor del conductor..... 65
Figura 3.3:	Integral de campo magnético en un conductor..... 65
Figura 3.4:	a) Campo magnético en un conductor uniforme b) Campo magnético en un conductor rugoso..... 66
Figura 3.5:	Grafica del campo magnético en el a) conductor uniforme b) conductor rugoso. 67
Figura 3.6:	Medidor de rugosidad PCE-RT 10..... 68
Figura 3.7:	Rugosímetro PCE-RT1200..... 68
Figura 3.8:	Grafica de la rugosidad superficial..... 69
Figura 3.9:	Perfiles con la mismo Ra, pero con un comportamiento al rozamiento muy diferente..... 69
Figura 3.10:	Parámetros de la rugosidad Rp, RV Y Rs. 70
Figura 3.11:	Medidor de rugosidad..... 70

Figura 3.12:	Perfil de rugosidad medido, la trayectoria que sigue el patín y detalle de la punta de la aguja del rugosímetro.....	71
Figura 4.1:	Principio del funcionamiento.	73
Figura 4.2:	Diagrama del regulador con LM317.....	73
Figura 4.3:	Componentes del regulador con LM317.....	74
Figura 4.4:	Fuente regulable de CD.....	74
Figura 4.5:	Sensor magneto-resistivo (kmz60).....	75
Figura 4.6:	Información del sensor kmz60.....	75
Figura 4.7:	Diagrama de conexión sensor kmz60.....	76
Figura 5.8:	DIPTRACE elaboración del circuito kmz60.....	76
Figura 4.9:	Diseño del PCB Kmz60.....	77
Figura 4.10:	PCB KMZ60.....	77
Figura 4.11:	Placa Arduino MEGA 2560.....	78
Figura 4.12:	Código Arduino para el sensor kmz60.....	79
Figura 4.13:	Selección serial plotter.....	80
Figura 4.14:	Grafica del sensor kmz60 al momento de pasar el imán varias veces.	80
Figura 4.15:	Fuente regulable inyectando voltaje de 5 volt y una corriente de 0.16	
Figura 4.16:	Amp.....	81
Figura 4.17:	Visualización de presencia de campo magnético con EMF SENSOR	81
	Fuente regulable inyectando voltaje de 10 volt y una corriente de 0.40	
Figura 4.18:	Amp.....	82
Figura 4.19:	Observación de campo magnético con EMF SENSOR.....	82
Figura 4.20:	Fuente variable de CA.....	83
Figura 4.21:	Conexión de la fuente variable CA.....	84
Figura 4.22:	Detección de campo magnético en el electrodo de tierra.	84
	Medición de campo magnético a) lado izquierdo presencia de campo magnético 1.38 micro tesla con el EMF SENSOR ala mitad de la pluma 7.5 cm b) lado derecho presencia de campo magnético 0.55	
Figura 4.23:	micro tesla con EFM SENSOR a 10 cm.....	85
	Medición de campo magnético a) lado izquierdo presencia de campo magnético 0.36 micro tesla con el EMF SENSOR 12 cm b) lado derecho presencia de campo magnético 0.08 micro tesla con EFM	
	SENSOR a 15 cm.....	86

Lista de Tablas

Página

Tabla 1.1		
Tabla 2.1	Características del electrodo TOTAL GROUN.....	12
	valores de resistencia a tierra.....	53

Contenido

	<i>Página</i>
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO	1
(RESUMEN/ABSTRACT)	2
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
CAPÍTULO 1: PROTOCOLO METODOLÓGICO	9
1.1. ANTECEDENTES	9
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.4. OBJETIVO	13
1.5. HIPOTESIS.....	14
1.6. ALCANCES Y LIMITES.....	14
CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO.	15
2.1. REDES DE TIERRA.....	15
2.1.1 IMPORTANCIA DE LA RED DE TIERRA.....	16
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE TIERRA Y ALGUNOS TIPOS.....	17
2.1.3 RED DE TIERRA PARA PROTECCIÓN.....	19
2.1.4 FACTORES BÁSICOS A CONSIDERAR EN UNA RED DE TIERRA.....	19
2.1.5 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN SISTEMA DE TIERRA.....	26
2.1.6 CONFIGURACIONES BÁSICAS DE LAS REDES DE TIERRA....	27
2.2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	29
2.2.1 TEORÍA DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	29
2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	31
2.2.3 CLAVES PARA UNA BUENA PROTECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	34
2.2.4 SISTEMA DE PARARRAYOS.....	34
2.2.5 SISTEMA FRANKLIN.....	36
2.2.6 SISTEMA TIPO JAULA FARADAY.....	37
2.2.7 PROTECCIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA...	38
2.2.8 PROTECCIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.....	39
2.2.9 PROTECCIÓN DE EQUIPOS ELÉCTRICOS EN MEDIA Y ALTA TENSIÓN.....	40

2.3	NORMATIVIDAD NOM-022-STPS.....	41
2.3.1	DESCARGA ATMOSFÉRICA NOM-002-STPS-2015.....	41
2.3.2	MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE LA RED DE PUESTA A TIERRA.....	44
2.4	VALORES DE LA RESISTENCIA DEL ELECTRODO Y LA TIERRA....	48
2.4.1	COMPONENTES DE LA RESISTENCIA DE UN ELECTRODO.....	50
2.4.2	¿QUÉ AFECTA LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA?.....	51
2.4.3	VALORES ACEPTABLES DE RESISTENCIA A TIERRA.....	53
2.5	RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	53
2.5.1	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	56
2.5.2	MÉTODOS DE MEDICIÓN RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	57
2.5.2.1	MÉTODO DE WERNER.....	59
2.5.2.2	MÉTODO DE SCHLUMBERGER.....	60
2.6	CORROSIÓN EN VARILLA DE TIERRA.	61
2.6.1	CLASIFICACIÓN DE CORROSIÓN.....	62

CAPÍTULO 3: SISTEMA DE MEDICIÓN DE CORROSIÓN A TRAVÉS DE LA RUGOSIDAD DE LA VARILLA. 64

3.1.	CAMPO MAGNETICO DE CONDUCTOR LISO.....	64
3.2.	CAMPO MAGNETICO EN CONDUCTO RUGOSO.....	66
3.3.	SENSORES O TECNICAS DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD.....	67
4.3.1	MEDIDOR DE RUGOSIDAD PCE-RT 10.....	67
4.3.2	RUGOSIMETRO PCE-RT1200.....	68
4.3.3	TECNICA DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD.....	69

CAPÍTULO 4: MEDICIÓN ELECTRONICA DE CORROSIÓN EN ELECTRODO DE TIERRA PARA USO INDUSTRIAL..... 72

4.1.	MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE CORROSIÓN CON SENSOR MAGNETO-RESISTIVO (KMZ60), ARDUINO MEGA 2560 Y SOFTWARE ARDUINO 1.8.4.....	72
------	---	----

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

5.1.	CONCLUSIONES	87
5.2.	REFERENCIAS	88

Protocolo Metodológico

1.1. ANTECEDENTES. [1]

Sabemos que todos los sistemas eléctricos y electrónicos necesitan ser aterrizados, por puesta a tierra generalmente entendemos que es una conexión eléctrica a la masa general de la tierra siendo enterrado en suelo, roca, etc. La práctica de la puesta a tierra se ha da continuamente y se ha desarrollado progresivamente, de modo que tales conexiones a tierra se encuentran en casi todos los puntos de los sistemas eléctricos y electrónicos.

Un sistema de puesta a tierra consiste en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen nuestros equipos en caso de corrientes parásitas.

El objetivo de un sistema de puesta a tierra es: 1) Proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, 2) el brindar seguridad a las personas.

Pero entendemos que en los últimos años el electrodo ha tenido diversos problemas por corrosión y cada vez han aumentado más los daños, ya que los metales hacen contacto directo con el agua o el suelo (electrolitos), y puede sufrir Corrosión por causa de la formación de Celdas voltaicas, de corrientes parásitas, y suelos corrosivos. No se ha garantizado una posible protección a los electrodos de puesta a tierra de la corrosión Encerrándolos completamente, es decir, separando los metales del suelo, La mayoría de los cables y conductores poseen vainas que forman una barrera contra la humedad y las agresiones mecánicas externas, es decir es una funda de protección, pues todas las vainas habituales que

se han utilizado hasta ahora han tenido una alta resistencia eléctrica y por lo tanto invalidan el efecto de los electrodos de puesta a tierra.

Los electrodos de puesta a tierra fabricados con un material uniforme se ven claramente amenazados por la corrosión proveniente de los suelos corrosivos y de la formación de celdas de concentración.

El riesgo de corrosión por los suelos siempre depende del material y del tipo y de la composición del suelo. Por otro lado, la formación de celdas entre diferentes metales con potenciales de (metal/electrolitos) diferentes causan riesgos. Sin embargo, no se sabe exactamente si las armaduras de fundaciones De hormigón también pueden convertirse en el cátodo de una celda y así causar corrosión a otras instalaciones.

La relación de superficie ánodo/cátodo es cada vez más desfavorable y el riesgo de corrosión de los metales más básicos se incrementa inevitablemente.

El electrodo de tierra se ve afectado por esas razones, y no solo eso sino también por la composición del terreno Ya sea rocosa, arenosa o seca, la temperatura ambiente, el agua y la humedad.

De acuerdo con la investigación en la norma oficial mexicana NOM-001-SEDE-2012 se encuentran los siguientes requisitos generales, especificaciones y dimensiones con respecto a la corrosión.

Artículo. 250-53. Instalación del sistema de electrodo de puesta a tierra.

Artículo. 250-70. Métodos de conexión del conductor de puesta a tierra y de unión a los electrodos

Artículo. 921-7. Material de los conductores de puesta a tierra.

Artículo. 921-13. Electrodos de puesta a tierra.

Artículo. 921-17. Superficies de contacto.

Artículo. 921-18. Resistencia a tierra de electrodos. Disposiciones generales.

1.2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El sistema de puesta a tierra es parte fundamental en cualquier instalación eléctrica como pueden ser: Centrales generadoras, subestaciones eléctricas, líneas de transmisión, plantas industriales etc., muchas veces no se les da seriedad necesaria. El no contar con una buena protección de puesta tierra puede tener ciertas consecuencias a personas, equipos eléctricos y electrónicos.

Actualmente no se sabe el estado de la corrosión del electrodo, ya que la mayoría de las empresas o compañías no las quieren desenterrar porque puede o tiene una placa de concreto muy sólida, esto hace que se lleve tiempo en romper el concreto y económicamente es caro.

Por otro lado, al hacer una instalación de puesta a tierra algunas compañías prefieren usar suelo artificial para mejorar la resistividad, pero eso no es 100% confiable ya que con el tiempo el electrodo de todos modos tendrá una corrosión muy alta dependiendo de los diversos factores: la composición del suelo, humedad, concreto y temperatura.

Debemos considerar la condición del electrodo en un sistema de tierra, el electrodo de tierra provee la conexión física para disipar la corriente a tierra. Existen 2 tipos básicos de electrodos: 1.- el natural, que incluye todo el metal enterrado, como tuberías de agua, la estructura del edificio (si está efectivamente conectada a tierra) 2.- el metal de refuerzo de la cimentación.

Los electrodos fabricados son instalados específicamente para mejorar el desempeño de los sistemas de tierra que incluyen mallas de alambre, platos metálicos, conductor de cobre desnudo y varillas directamente enterradas en el terreno.

La varilla de tierra es el electrodo más utilizado. TOTAL, GROUND es el mayor fabricante a nivel nacional de varillas de tierra y ofrece una línea completa de varillas y accesorios para cumplir con cualquier necesidad del cliente.

La varilla TOTAL GROUND para puesta a tierra cumple las especificaciones marcadas por la NOM 001-SEDE-2012 art. 250-83, C.F.E, PEMEX, los estándares UL 467, Y la especificación CFE 56100-16. La varilla de tierra TOTAL GROUND es fabricada mediante un cuidadoso proceso en el que se supervisa paso a paso el cumplimiento de estas especificaciones.

Características:

Tabla 1.1 Características del electrodo TOTAL GROUND

CONCEPTO	VALOR	
Largo	1m, 1.5 mts, 3 mts. (+-10 mm)	
Diámetro	5/8", 3/4" y 1/2"	
Masa aproximada	3.8 kg	
Rectitud	0.083 cm/m	
Núcleo	Material	Acero estirado en frío AISI 1018
	Diámetro	9/16"
Recubrimiento	Material	Cobre electrolítico
	Espesor mínimo	Hasta 0.250 mm.
	Adherencia	No se presenta desprendimiento del recubrimiento del núcleo

*Varilla de acero con recubrimiento de cobre electrolítico.

*Elaborados en acero AISI 1018, estirado en frío el cual ofrece mejores propiedades mecánicas para la varilla.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, artículo 921-18 “Resistencia a tierra de electrodos” especifica que los sistemas tierra en las instalaciones eléctricas debe tener un máximo 25 Ω de resistencia para industrias y subestaciones, para instalaciones subterráneas el valor recomendado de resistencia a tierra es de 5 Ω o menos.

1.3. JUSTIFICACION.

Este proyecto tendrá grandes beneficios para todas las empresas a nivel municipal, nacional y por qué no a nivel mundial. Ya que es importante saber el estado de la corrosión del electrodo (varilla de tierra), sin sacarlo de la tierra o de la placa de concreto. Esto nos podría ayudar a disminuir los problemas presentados año tras año por la corrosión.

Actualmente no hay ninguna estadística en la cual nos podamos basar del porque este problema, sino que lo hacemos como un método prevención antes de que pueda suceder.

Y este nuevo aporte de la medición electrónica de corrosión en el electrodo de tierra para uso industrial es precisamente para brindarnos mayor seguridad, ya que la corrosión se hace presente cada vez más.

1.4. OBJETIVO.

Es tener claramente una medición electrónica de corrosión en electrodo de tierra para conocer el deterioro del mismo electrodo, ya que ha sido mayormente afectada por diversos medios: humedad, agua, suelo y temperatura, esto hace que no pueda tener una buena resistividad (ohm), y que al paso del tiempo no se logre tener una protección al 100% en los equipos y en el personal dentro de una compañía u empresa.

El propósito es conocer el estado del electrodo de tierra de una subestación, puerto industrial sin sacarla ya que de esta manera sabremos si está en buenas condiciones o en malas condiciones de resistividad, para así mismo poder realizar un cambio de electrodo.

VENTAJAS

- * Evitar sacar el electrodo de tierra del hormigón o de la misma tierra
- *Será más económico, fácil de manejar el dispositivo y tendrá una interfaz al pc
- *Obtendrá la resistividad del electrodo, (monitoreo de la rugosidad del electrodo en tiempo real donde podremos ver la gráfica)
- *Ahorro de tiempo en la realización de mediciones y será de mayor seguridad

1.5. HIPOTESIS.

Es posible determinar el grado de corrosión del electrodo de tierra mediante un dispositivo digital, basado en un microcontrolador y un sensor adecuado, analizando el deterioro de la varilla a partir del campo magnético.

1.6. ALCANCES Y LIMITES.

- Se analizará el electrodo de tierra.
- El análisis se realizará por la presencia de campo magnético.
- El análisis del campo magnético se realizará a través de una fuente de cd
- El diseño del sensor se realizará a través del software DIP TRACE 3.3
- La medición electrónica de corrosión se realizará mediante técnicas de medición de deterioro (empeoramiento gradual) con un sensor magneto-resistivo.

Capítulo

2

Marco teórico

2.1. REDES DE TIERRA. [1]

En el diseño y proyecto de las instalaciones destinadas al suministro o utilización de la energía eléctrica, una de las mayores preocupaciones de los ingenieros de diseño ha sido como conectar a tierra los equipos eléctricos de una manera segura y apropiada.

El problema existe en todos los campos de la Ingeniería eléctrica, desde las bajas corrientes a tierra de los equipos electrónicos, hasta las altas corrientes a tierra de las grandes subestaciones en extra alta tensión.

Todos los objetos metálicos que encierren conductores eléctricos o que probablemente queden energizados por corrientes eléctricas originadas por fallas del sistema eléctrico, descargas electrostáticas o por descargas atmosféricas, deben quedar firmemente conectados a tierra para garantizar la seguridad del personal, reducir la probabilidad de incendios y asegurar la protección de los equipos para lograr su funcionamiento normal.

Si los objetos están firmemente conectados a tierra, se facilitará la operación de los dispositivos de sobre corriente de falla a tierra y se permitirá que las corrientes de retorno provenientes de filtros de interferencia electromagnética y supresores de sobretensiones conectados entre línea y tierra o entre línea y chasis, fluyan de manera adecuada.

Como antes mencionamos Un sistema de tierras es el conjunto de elementos interconectados que tiene como objetivo evitar diferencias de potencial peligrosas en una instalación eléctrica y que, al mismo tiempo, permita el paso de las corrientes de falla o de las descargas

atmosféricas a tierra, logrando con esto, proporcionar seguridad al personal, equipos e instalaciones eléctricas, asegurando una buena calidad de la energía.

Bajo el nombre genérico de sistema de tierra se conoce tanto a la conexión a tierra del sistema de distribución, como a la conexión o puesta a tierra del equipo eléctrico y no eléctrico.

2.1.1 IMPORTANCIA DE LA RED DE TIERRA. [1]

Como ya se indicó, un sistema de conexión a tierra es absolutamente indispensable por razones de seguridad. Proporciona el medio fundamental por el cual una corriente eléctrica irregular puede llevarse a tierra, o voltaje cero, sin riesgo.

Una gran parte de los accidentes personales en la industria y en cualquier otra parte donde se tenga un sistema eléctrico, debidos a causas eléctricas, están relacionados con el contacto directo con partes metálicas. Se ha encontrado que la causa de estos accidentes ha sido la falta de un sistema de tierra o sistemas de tierra adecuados.

Estadísticamente el 10% de los incendios originados en las Instalaciones Eléctricas se deben a fallas en los sistemas de tierras. Por esta razón, se deduce que, desde el diseño de cualquier instalación eléctrica para plantas industriales, hospitales, oficinas edificios públicos, etc. se le debe dar gran importancia y atención al sistema de tierras.

El disponer de una red de tierra adecuada es uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones en subestaciones, Central generadora, industrias, etc. A esta red se conectan los neutros de los equipos eléctricos, pararrayos, cables de guarda y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

Las necesidades de contar con una red de tierra tienen como función principal:

1. Proveer un medio seguro para proteger al personal en la proximidad de sistemas o equipos conectados a tierra, de los peligros de una descarga eléctrica bajo condiciones de falla.
2. Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas a tierra, sin que se excedan los límites de operación de los equipos.
3. Proporcionar una conexión a tierra para el punto neutro de los equipos que así lo requieran (generadores, transformadores, reactores, etc.).
4. Proporcionar un medio de descarga y desenergización de equipos antes de proceder a tareas de mantenimiento.
5. Facilitar mediante la operación de relevadores y otros dispositivos de protección, la eliminación de fallas a tierra en el sistema.

2.1.2 CLASIFICACION DE LAS REDES DE TIERRA Y ALGUNOS TIPOS. [1]

- **Sistema de tierra en Baja Tensión.**

La NOM-001-SEDE-2012 exige a los usuarios de la energía eléctrica su propia conexión a tierra y dice: “En un sistema secundario de suministro puesto a tierra, cada servicio individual debe tener una conexión a un electrodo de tierra. Esta conexión debe hacerse como parte de la instalación del usuario, en el lado del abastecimiento del medio de desconexión principal y no en el lado de la carga”.

Los sistemas de tierra en baja tensión aparentemente son los más simples, ya que no se diseñan en base a potenciales de paso o de contacto, sin embargo, es un hecho que la mayor parte de los accidentes por este concepto ocurren en el hogar, en tinas de hidromasaje, equipos de baño, lavadoras, secadoras, etc.

- **Sistema de tierra en Media y Alta Tensión.**

Es común que en subestaciones de potencia se piensa que con tener una resistencia de tierra baja es suficiente para proteger los equipos y al personal, sin embargo, existen factores que son determinantes en el diseño de un sistema de tierras ya que se pueden presentar potenciales peligrosos al momento de una falla de corto circuito o descargas atmosféricas, algunos de estos factores son; la resistividad del terreno, la corriente de falla de corto circuito, tamaño del local de la subestación, duración de la falla, geometría de la malla, etc.

Este sistema de tierra se basa en la protección del personal y los equipos, disipando las corrientes de falla a tierra sin elevar el potencial que se presenta más allá del permisible. Es decir poner especial interés en los criterios de las tensiones de paso y contacto.

- **Sistema de tierra de los equipos eléctricos.**

Aplica en equipos eléctricos para que sus protecciones se activen ya que estas se referencian a tierra, así eliminan los potenciales indeseables que pudieran poner en peligro la vida y los equipos propiamente.

- **Sistema de tierra en señales electrónicas.**

Cuando nuestros equipos electrónicos manejan señales y en muchas ocasiones entre conexiones es posible que utilicen cables de diversas dimensiones y para evitar la contaminación con señales en frecuencias diferentes a la deseada su utiliza blindaje, cable de maya esta se aterriza. Inclusive hay módulos totalmente blindados, construidos en cajas prácticamente de metal para evitar esa contaminación llamada interferencia.

- **Sistema de tierra de protección electrónica.**

Para evitar la destrucción de los elementos semiconductores por voltaje, se colocan dispositivos de protección conectados entre los conductores activos y la referencia cero.

- **Sistema de tierra de protección atmosférica.**

Sirve para canalizar la energía de los rayos a tierra sin mayores daños a personas y propiedades. Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios a proteger.

- **Sistema de tierra de protección electrostática.**

Sirve para neutralizar las cargas electrostáticas producidas en los materiales dieléctricos. Se logra uniendo todas las partes metálicas y dieléctricas, utilizando el planeta tierra como referencia de voltaje cero.

2.1.3. RED DE TIERRA PARA PROTECCION. [2]

Tiene como objetivo conectar eléctricamente a tierra todos los elementos metálicos que forman parte de la instalación eléctrica, que no se encuentran sujetos a tensión normalmente, pero que pueden tener diferencias de potencial a causa de fallas accidentales, estos pueden ser: tableros eléctricos, tanque de interruptor y transformador, carcasas de las máquinas eléctricas, estructura metálica de las subestaciones o líneas de transmisión y en general todos los equipos eléctricos.

2.1.4. FACTORES BASICOS A CONSIDERAR EN UNA RED DE TIERRAS. [3]

Algunos de los factores que tienen un papel importante en el diseño del sistema de tierra son los siguientes:

- **La resistividad del terreno.**

Esta cantidad se expresa en ohm-m y representa la resistencia de 1 m³ de tierra, medida entre superficies opuestas.

- **Tamaño o extensión del sistema de tierras.**

Este es un factor importante, ya que, si el sistema es muy pequeño para manejar grandes corrientes de falla, pueden existir gradientes de potencial sobre la superficie, haciendo

riesgoso esto para el contacto. En forma ideal el concepto de un buen sistema de puesta a tierra, ha sido el de obtener una resistencia a tierra tan baja como sea posible. Sin embargo, en sistemas donde las corrientes de falla son excesivamente altas, puede ser imposible, mantener potenciales a tierra dentro de los límites de seguridad, aunque la resistencia de tierra se mantenga baja.

Existe una diversidad de suelos y las características de estos son tan diferentes que algunos no conducen la electricidad, es decir son aislantes, sin embargo, la gran mayoría de ellos son conductores y especialmente buenos en épocas húmedas. Por ejemplo, en la Ciudad de México, en general el suelo es muy heterogéneo, teniendo zonas localizadas como el sur con roca volcánica, tepetate y arena en el poniente, tierra húmeda en el oriente y roca o tepetate en el norte.

Cuando en el suelo se entierra un electrodo de tierra, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de una determinada resistencia, combinada en paralelo con un dieléctrico, excepto en suelos muy resistivos, cuando se presentan ondas de muy alta frecuencia y frentes de onda con pendiente escarpada, el suelo se comporta como una resistencia pura debido a que la corriente de carga es despreciable en comparación con la corriente de fuga. La resistividad del suelo básicamente está determinada por el tipo de terreno, el contenido de humedad, su composición química y la temperatura entre otros factores y se mide en ohm.

2.1.5. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN SISTEMA DE TIERRAS. [3]

Los elementos principales de un sistema de tierras es el siguiente:

- Electroodos.
- Conductores.
- Conectores.

Electrodos.

Son elementos metálicos conductores, los cuales se clavan en el terreno y sirven para encontrar zonas húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica en el subsuelo. Con el fin de mantener un potencial de tierra en todos los conductores que estén conectados a ellos y de esta forma disipar en el terreno todas las corrientes de falla. Son especialmente importantes en terrenos sin vegetación y por lo tanto secos.

Pueden ser fabricados de acero, acero galvanizado, acero inoxidable, cobre, aluminio, o una combinación de éstos (copperweld). La selección del material dependerá de las características del terreno.

Para instalaciones eléctricas la NOM-001-SEDE-2012 en su artículo 250-50 establece que la resistencia de una varilla o electrodo de tierra no debe exceder de 25 Ω . Esto se toma como un límite superior.

Los electrodos de tierra se pueden encontrar en diferentes tamaños, formas, y con diferentes características.

A continuación, se describen los tipos de electrodos más comunes:

***Varilla Copperweld.**

Esta varilla es una de las más usadas, ya que es de bajo costo. Este tipo de electrodo es fabricado de acero cubierta de cobre (copperweld), el cual combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, su longitud es de 3.05 metros y los diámetros nominales más comerciales son: 5/8" y 3/4" o bien 14.3 mm² y 19 mm².

Esta varilla se debe enterrar en forma vertical y a una profundidad de por lo menos de 2.4 metros, excepto si se encuentra roca, en cuyo caso el electrodo de puesta a tierra se debe clavar a un ángulo oblicuo que no forme más de 45° con la vertical o se acepta que la varilla

vaya enterrada en forma horizontal, siempre y cuando sea en una zanja de mínimo 800 mm de profundidad. (Según Art. 250-83(c)(3) de la NOM- 001-SEDE-2012). (Ver figura 1.1).

La varilla copperweld no tiene mucha área de contacto, pero sí una longitud considerable, con la cual es posible un contacto con capas de tierra húmedas, lo cual se obtiene un valor de resistencia bajo.

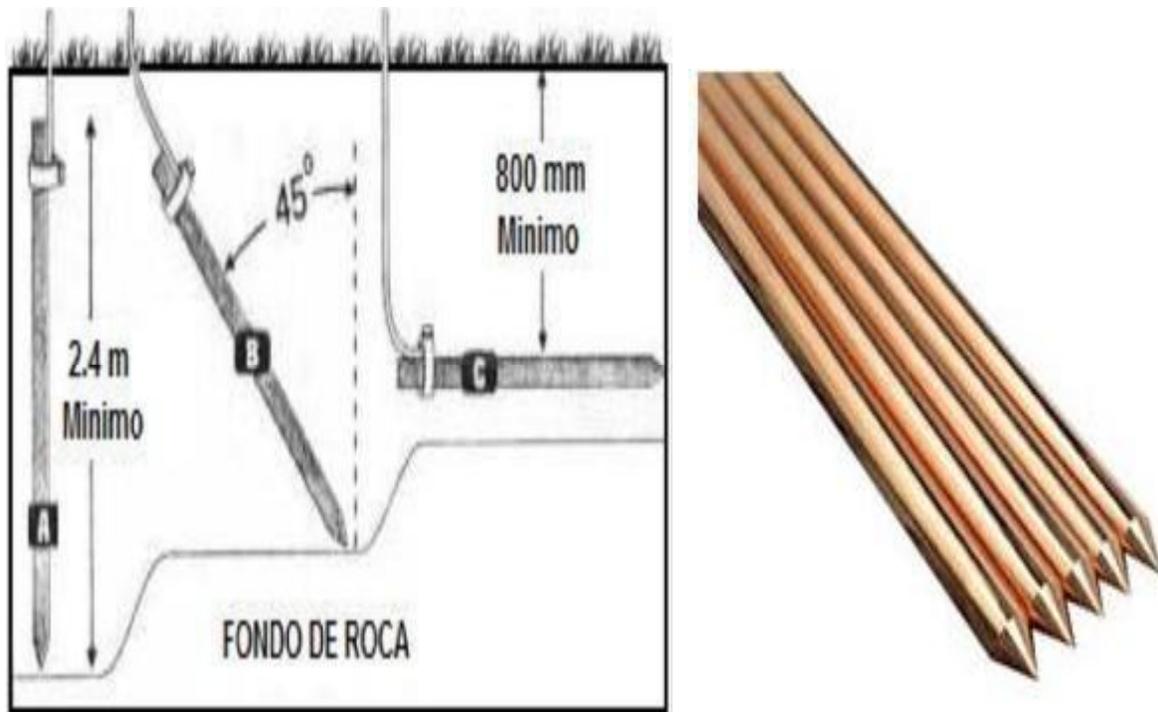


Figura 2.1: Detalle de instalación de electrodo de tierra tipo copperweld.

Estas varillas combinan las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del fierro; poseen una buena conductividad eléctrica, excelente resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica para ser clavadas en el terreno.

Placa.

Debido a que este electrodo tiene una gran área de contacto es recomendado en terrenos que tengan alta resistividad. Según el artículo 250-52(h) de la NOM 001- SEDE- 2012 nos dice que estos electrodos tipo placa se deben de instalar a una distancia mínima de 75 cm por debajo de la superficie de la tierra.

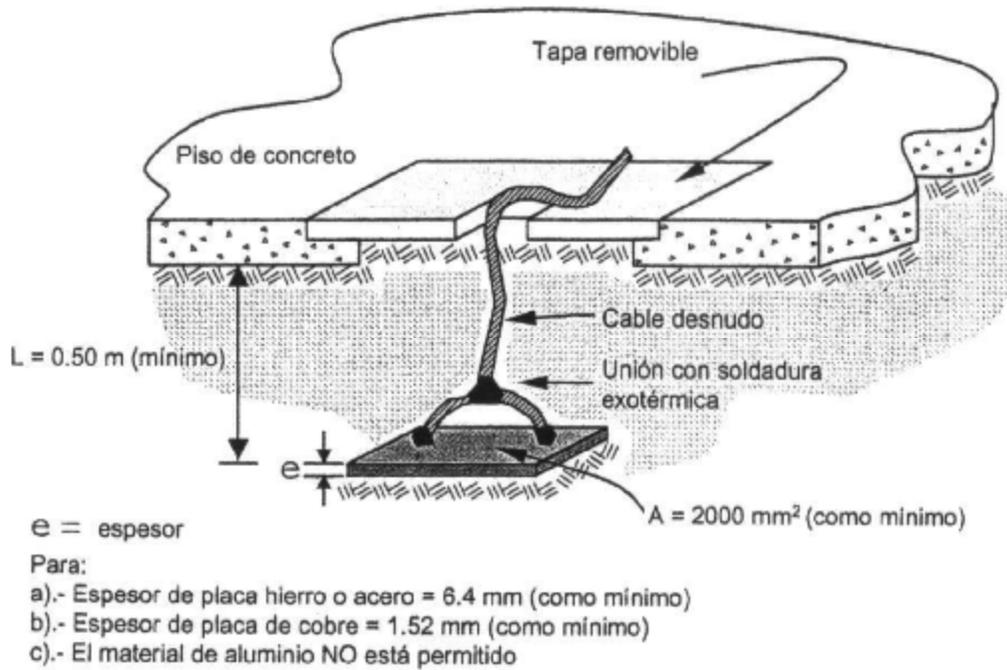


Figura 2.2: Electrodo de tierra tipo placa.

Anillo de tierra.

Este consiste en un anillo de tierra que rodee el edificio o estructura, en contacto directo con la tierra y a una profundidad bajo la superficie de la tierra de 75cm. (Art. 250- 52(f) de la NOM-001-SEDE-2012).

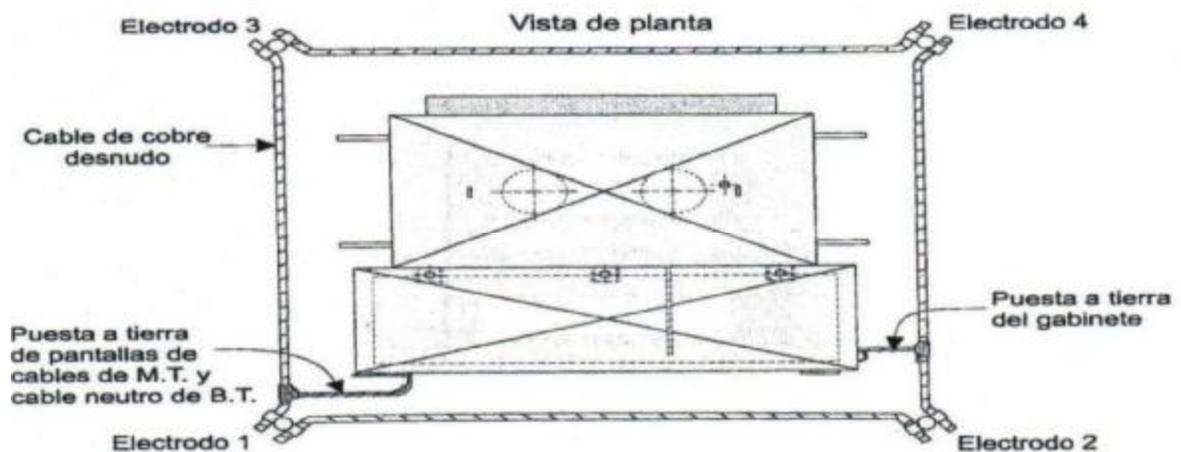


Figura 2.3: Anillo de tierra.

Malla.

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.

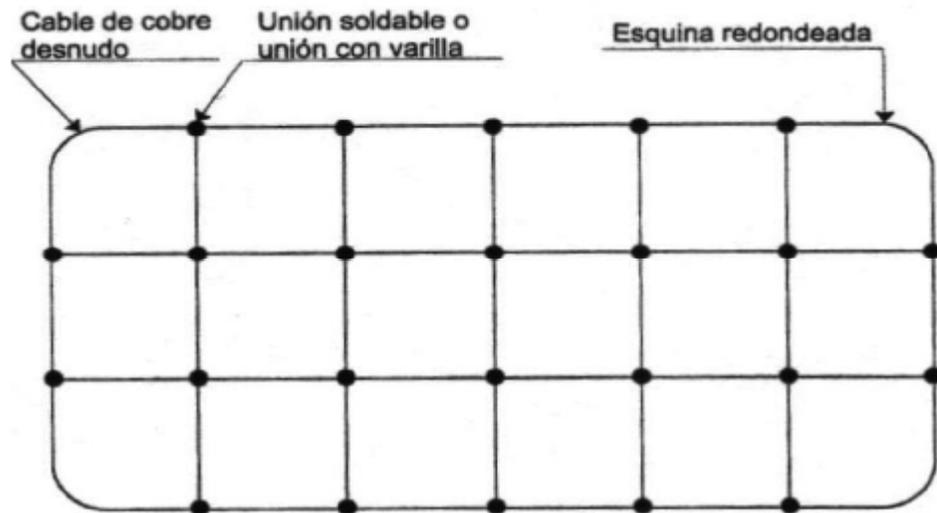


Figura 2.4: Electrodo de tierra tipo malla.

A continuación, se describen los electrodos no especificados por la NOM-001-SEDE-2012, pero existentes en el mercado.

Rehilete.

Este electrodo se forma de dos placas de cobre cruzadas, las cuales van soldadas y estas a la vez a un conductor (cable de cobre) mediante soldadura exotérmica. Este tipo de electrodo es bueno para terrenos donde es difícil excavar, ya que tiene mucha área de contacto.

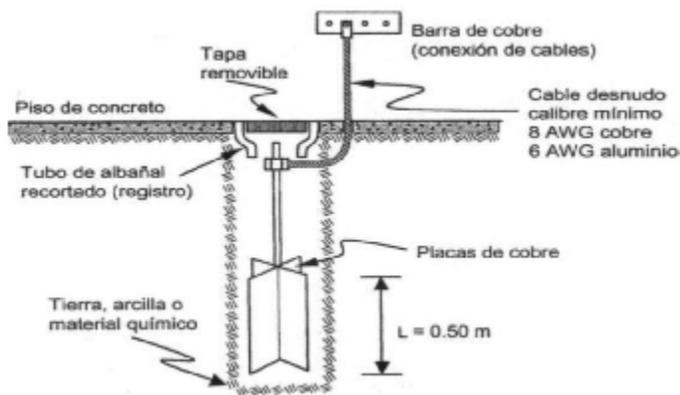


Figura 2.5: Electrodo de tierra tipo rehilete.

Electrodos químicos.

Los electrodos químicos son aquellos electrodos a los que se les adiciona algún compuesto químico para aumentar la conductividad y de esta forma disminuir el valor de resistencia.

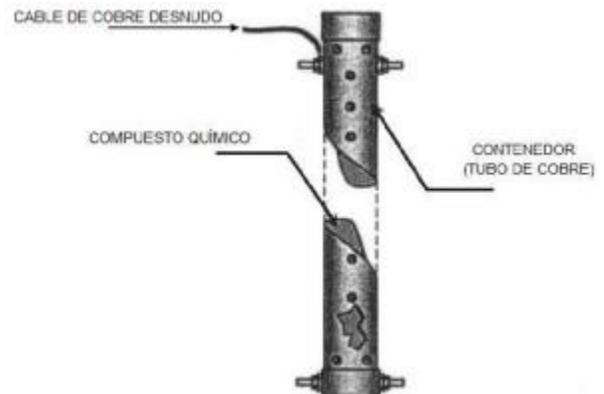
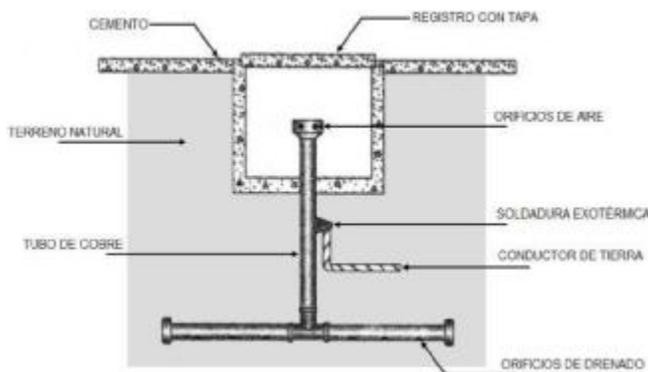


Figura 2.6: Electrodo de tierra del tipo químico.

Disminuye la resistencia eléctrica de contacto a tierra por medio de su contenido químico, facilitando el paso de la corriente eléctrica, propia de la descarga atmosférica o bien de corto circuito, aumentando así su volumen de disipación y reduciendo el tiempo de respuesta. Actúa 10000 veces más rápido que el contacto metal-tierra, disipando la energía eléctrica de corto circuito o del rayo, estabilizando la tensión de su instalación eléctrica, permitiendo operar a tiempo los sistemas de protección.

Con base en los resultados se reporta que el mejor comportamiento corresponde a la varilla copperweld, siendo la más utilizada gracias a su gran eficiencia y bajo costo de material e instalación, en algunos casos para mejorar el comportamiento de esta puede combinarse con contra-antena, por el contrario, los electrodos más deficientes fueron los prefabricados de grafito (electrodos químicos).

2.1.6. CONFIGURACIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRA. [4]

Una red de protección de tierra es usada para establecer un potencial uniforme en y alrededor de la estructura, está unida sólidamente a los electrodos de tierra.

Para las redes de tierra se tienen básicamente tres disposiciones, que son las siguientes:

- Sistema radial
- Sistema en anillo
- Sistema de red o malla

Sistema radial.

Este sistema consiste en uno o varios electrodos de tierra, a los cuales se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos. Esta disposición es la más económica, pero la menos confiable, ya que al producirse una falla en un sistema o en el equipo, se generan grandes gradientes de potencial.

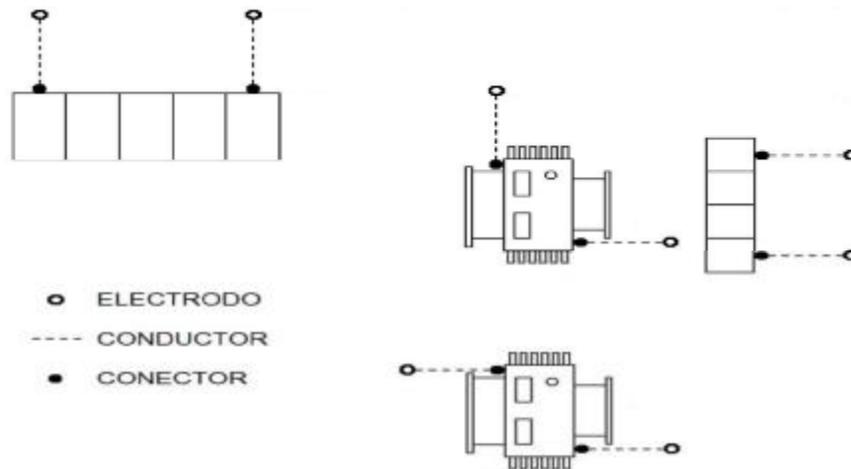


Figura 2.7: Sistema radial.

Sistema anillo.

Este sistema se obtiene colocando en forma de anillo un conductor de cobre de suficiente calibre alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación eléctrica y conectando derivaciones a cada uno de los equipos, mediante un conductor de un calibre menor.

Es un sistema económico y eficiente, en él se eliminan las grandes distancias de descarga a tierra del sistema radial. Por su configuración, el sistema en anillo no limita potenciales, únicamente puede proporcionar, valores bajos de resistencia a tierra.

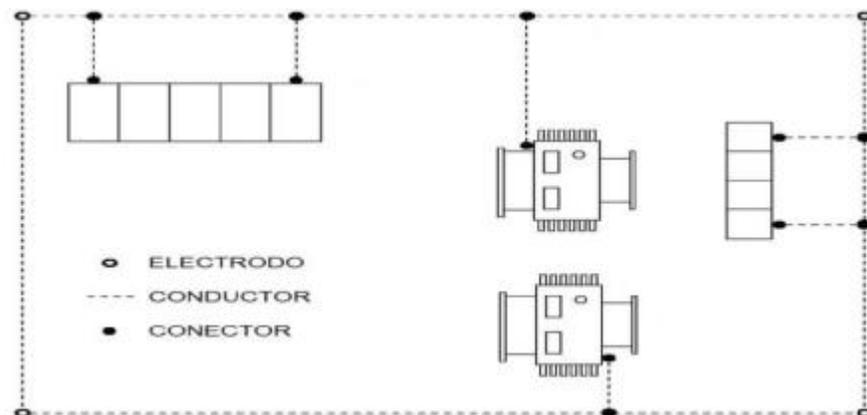


Figura 2.8: Sistema anillo.

Sistema de red o malla.

El sistema de malla es el más usado actualmente en las subestaciones eléctricas. Consiste, como su nombre lo indica, en un arreglo de conductores perpendiculares formando una malla o retícula, a la cual se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos. En el perímetro de la malla, generalmente se colocan varillas o electrodos de tierra.

Cuando las corrientes de falla circulan por el terreno natural se generan potenciales que la red de tierras debe limitar para que no resulten peligrosos para el personal.

El sistema de malla limita estos potenciales en el área de la subestación y además proporciona valores bajos de resistencia a tierra para el sistema eléctrico. Este sistema es el más eficiente, pero también el más caro de los tres tipos.

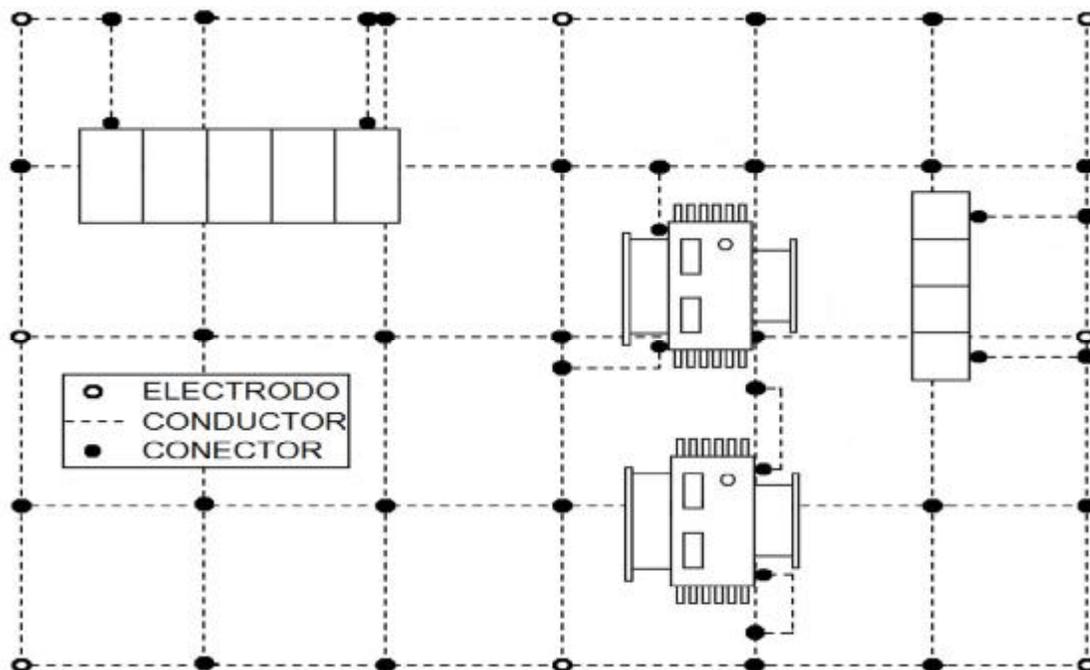


Figura 2.9: Sistema de red o malla.

2.2. DESCARGAS ATMOSFERICAS. [4]

2.2.1. TEORIA DE LA DESCARGA ATMOSFERICA.

Una descarga atmosférica es conocida como rayo, es la igualación violenta de cargas de un campo eléctrico que se ha creado entre una nube y la tierra o, entre nubes.

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

Los rayos que inician en tierra son relativamente raros y ocurren normalmente en montañas o en estructuras altas.

Los rayos iniciados en las nubes negativas normalmente aparecen en nubes de tormenta del tipo cumulonimbus convectivas que usualmente miden de 3 a más de 50 km de largo, y son consecuencia de un rompimiento dieléctrico atmosférico.

Este rompimiento una vez iniciado, avanza en zigzag a razón de unos 50 metros por microsegundo con descansos de 50 microsegundos.

Una vez que el rompimiento creó una columna de plasma en el aire, la descarga eléctrica surgirá inmediatamente dentro de un hemisferio de unos 50 m de radio del punto de potencial más alto. Y, cualquier objeto puede ser el foco de esta descarga hacia arriba de partículas positivas, aún desde una parte metálica debajo de una torre.

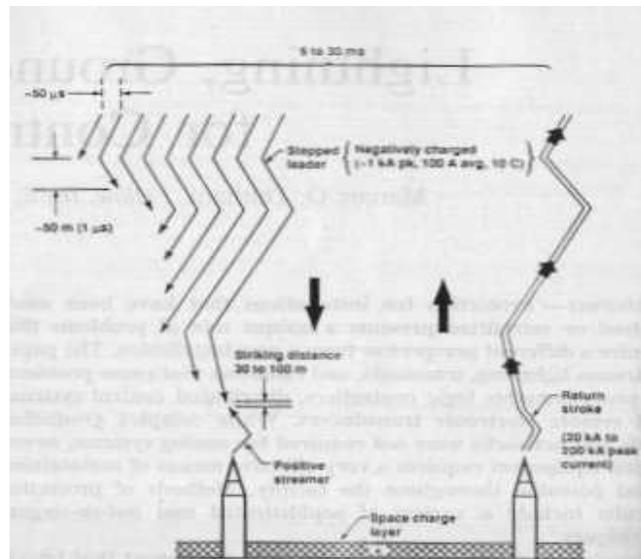


Figura 2.10: Rayo producido por una nube cargada negativamente contra tierra según el modelo de Hasbrouk.

Por lo regular los rayos consisten en descargas múltiples, con intervalos entre descargas de decenas a centenas de milisegundos. La primera descarga es la que tiene mayor amplitud, mientras que las subsecuentes tienen tiempos de ataque más rápidos, aunque la velocidad de las descargas se ha encontrado que depende del lugar geográfico. La primera descarga está entre 6 y 15×10^7 m/s y la segunda entre 11 y 13×10^7 m/s.

Las descargas atmosféricas pueden causar grandes diferencias de potencial en sistemas eléctricos distribuidos fuera de edificios o de estructuras protegidas. A consecuencia de ello, pueden circular grandes corrientes en las canalizaciones metálicas, y entre conductores que conectan dos zonas aisladas. Pero, aún sin la descarga, una nube cargada electrostáticamente crea diferencias de potencial en la tierra directamente debajo de ella.

El campo eléctrico debajo de una nube de tormenta es generalmente considerado entre 10 y 30 kV/m. Es importante, comparar estos valores con el de 1.5 kV/m con el que las puntas empiezan a emitir iones.

Algunas particularidades aumentan la probabilidad de la caída de rayos en un lugar. Por ejemplo, la frecuencia de descargas en un lugar es proporcional al cuadrado de la altura sobre

el terreno circundante. Esto hace que las estructuras aisladas sean particularmente vulnerables. Además, las puntas agudas incrementan también la probabilidad de una descarga.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. [5]

A continuación, se describirán las características de las descargas atmosféricas las cuales son:

- Formación (carga eléctrica en las nubes)
- Evolución de las descargas
- El trueno

Formación (carga eléctrica en las nubes).

Las descargas atmosféricas se presentan cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera (alturas entre 5 y 12Km). Al aumentar la carga se forman potenciales de hasta 300 MV entre nubes y tierra.

La descarga se forma en nubes de tormenta del tipo **cumulonimbus**. Estas se caracterizan por estar formadas por columnas de aire caliente que ascienden por convección, cuando la atmósfera se hace inestable, debido a grandes gradientes de temperatura. El interior de esas nubes es recorrido por rápidas corrientes de aire ascendentes y descendentes de velocidades hasta de 300 km/h.

La carga eléctrica se forma al separar estas fuertes corrientes de aire, las partículas de agua y hielo en partículas ionizadas. La carga se concentra en un disco de un diámetro de 10 Km. y una altura aproximada de 5 km. Esta carga es en la mayoría de los casos predominantemente negativa.

A medida que se empieza a incrementar la carga y el voltaje en las cercanías de las nubes cargadas, se empieza a rebasar el gradiente crítico, (30 kV en aire seco, 10 kV en las condiciones de presión y presencia de gotas de agua existentes en las nubes). Se empieza a presentar ionización del aire y, por lo tanto, se van

formando caminos para la conducción de la carga hacia el punto de potencial cero que es la tierra.

Evolución de la descarga.

El camino de ionización que se inicia lleva un primer flujo de carga hacia capas más bajas. Este primer flujo es llamado el líder. El líder desciende unos 50 a 100m en un microsegundo, detiene su marcha unos 50 microsegundos mientras se acumula la carga transferida desde la nube y se forma un nuevo camino ionizado que va a crear un nuevo avance del líder (figura 1). Estos avances y reposos de este primer flujo de carga, hacen que se le conozca como el **líder escalonado**. Este sigue avanzando hasta llegar cerca de los objetos y estructuras más altos, los cuales empiezan a emitir chispas que van al encuentro del líder.

Al cerrarse eléctricamente el camino a tierra, la carga se desplaza a una velocidad vertiginosa, produciéndose la **descarga de retorno** de gran luminosidad, etapa del rayo considerada como la más energética de todas.

El canal de la descarga en cuyo interior existe un hilo conductor de plasma, puede llegar a temperaturas de 30.000 °C y la presión del aire subir hasta 100 atmósferas.

El diámetro del canal es de unos 10cm.

La descarga de una nube puede generar nuevas reparticiones de carga en la atmósfera, presentándose descargas horizontales entre varias nubes de tormenta. Es posible, por lo tanto, que se desencadene otra descarga atmosférica de similar ubicación a la anterior, que utilice los mismos caminos ionizados que dejó la primera.

El trueno.

El trueno es la señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande rápidamente de él, se puede extraer información sobre la localización, tamaño y orientación del rayo.

El aire en el canal de la descarga se calienta y se expande en forma de una onda de choque. Posteriormente, esta onda se vuelve energía acústica produciéndose el trueno. Cada componente del rayo: el líder escalonado, los líderes rápidos, las descargas de retorno, contribuyen al trueno.

Los componentes más energéticos producen las frecuencias más bajas del sonido. Estas frecuencias bajas se atenúan menos que las altas, ya que la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Por ello, un rayo no muy energético puede no oírse ya a 10 km.

El estudio del trueno ha perfeccionado los conocimientos que ya se tenían sobre el rayo y constituye un elemento fundamental para el estudio de las descargas entre las nubes y del canal de la descarga en el interior de una nube donde los medios visuales no pueden suministrar información. Adicionalmente, nos aporta criterios para la interpretación de los datos de nivel isocerámico.

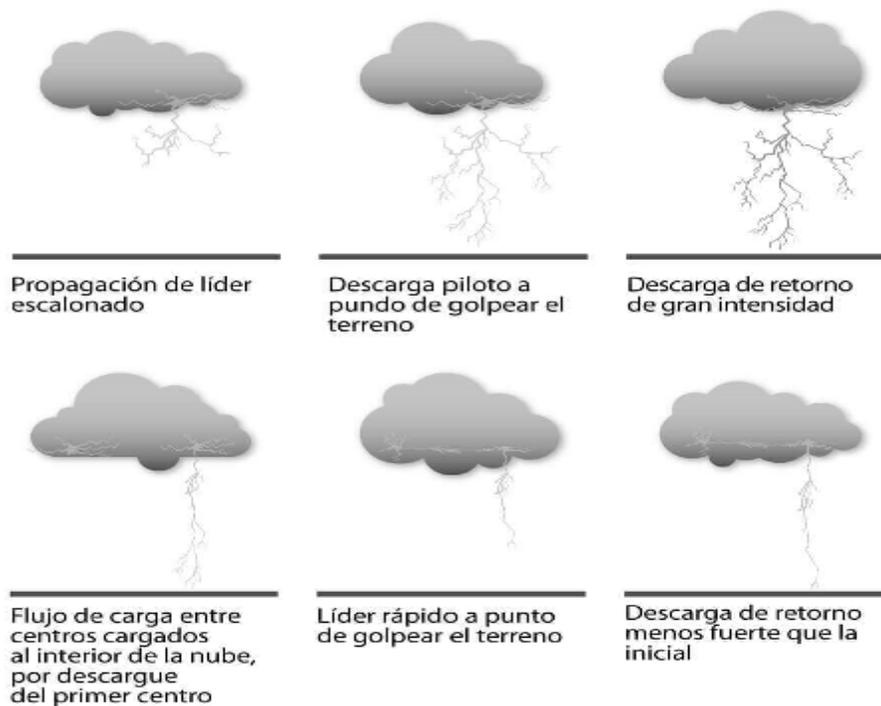


Figura 2.11: Evolución de la descarga atmosférica.

2.2.3. CLAVES PARA UNA BUENA PROTECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. [6]

- Los conductores de bajada son distribuidos a lo largo del perímetro de la edificación, de acuerdo con el nivel de protección, con preferencia para las esquinas principales.
- En edificaciones encima de 20 metros de altura, los conductores de bajadas entre dos anillos intermediarios horizontales deben tener el mismo tamaño que los conductores de captación, debido a la presencia de descargas laterales.
- Para minimizar los daños estéticos en las fachadas y en los niveles de las terrazas, se pueden utilizar conductores chatos de cobre.
- Una malla de aterramiento debe ser hecha con cabos de cobre desnudos de #50mm² a 0,5m de profundidad en el suelo, interconectando todas las bajadas.
- Los electrodos de aterramiento tipo copperweld deben tener una alta capa (254 micrones). Los electrodos de baja capa no son permitidos.
- Las conexiones enterradas deben ser de preferencia con soldadura exotérmica. Si fueran usados conectores de ahogo, debe instalarse una caja de inspección sólo para protección y mantenimiento del conector.
- Las equalizaciones de potencias deben ser ejecutadas en el nivel del suelo y a cada 20 metros de altura, donde son interconectadas todas las mallas de aterramiento, bien como todas las plumadas metálicas, además de la propia estructura de la edificación.
- Las cañerías de gas con protección catódica no pueden ser vinculados directamente. En este caso se debe instalar un DPS tipo centellador.
- Hay que recordar que el cobre es el mejor conductor de energía y tiene un papel fundamental en la instalación de los pararrayos que protegen el patrimonio de su vida.

2.2.4. SISTEMAS DE PARARRAYOS. [6]

Los rayos ocurren con diferentes intensidades y un sistema que proteja contra su efecto deberá ser diseñado tomando en cuenta los rayos promedio o mayores del área en cuestión. Las descargas no pueden ser detenidas, pero la energía puede ser desviada en una forma controlada. El intentar proteger contra descargas directas puede ser excesivamente caro.

Un sistema de protección contra descargas, llamado de pararrayos, debe:

- Capturar el rayo en el punto diseñado para tal propósito llamado terminal aérea.
- Conducir la energía de la descarga a tierra, mediante un sistema de cables conductores que transfiere la energía de la descarga mediante trayectorias de baja impedancia, y;
- Disipar la energía en un sistema de terminales (electrodos) en tierra.

Cuando la energía de un rayo viaja a través de una trayectoria de gran impedancia, el daño causado puede ser grave por el calor y las fuerzas mecánicas que se crean

Como la tierra no tiene una resistividad uniforme en todos los puntos, dentro de un mismo predio puede existir un potencial entre dos placas de metal enterradas. Por eso, en un sistema de electrodos múltiples conectados entre sí, a manera de malla, existe la probabilidad de que exista una diferencia de potencial entre algunos de sus puntos aterrizados.

El problema de diferencia de potenciales entre electrodos se complica aún más cuando una nube cargada pasa por encima de la malla. Además, una descarga eléctrica que caiga cerca, causará grandes corrientes en la tierra para restablecer el equilibrio de cargas. Al fluir esta corriente por tierra, causará una diferencia de potencial entre los diferentes electrodos y esta diferencia de potencial, a su vez, causará que fluya corriente por los conductores de la malla.

Es conocido que un campo magnético se crea cada vez que existe un rayo, no importando si es a tierra o entre nubes. Este campo induce una corriente en cualquier conductor en la vecindad del rayo. Si existen electrodos al final de ese conductor, fluirá por tierra la corriente cerrando el circuito. Por ejemplo, un oleoducto puede transmitir la corriente de una descarga a una gran distancia del punto donde la descarga tuvo lugar.

Los rayos son señales eléctricas de alta frecuencia, gran potencial y alta corriente, por ello son causa de interferencia en sistemas electrónicos. Son de alta frecuencia por la elevada razón de cambio de la señal, de aproximadamente 1 us. Por ello, para dirigir a tierra las descargas atmosféricas se utilizan las técnicas para señales en altas frecuencias.

Como los rayos se reflejan como cualquier onda de alta frecuencia, es básico que la impedancia a tierra sea baja para la descarga, ya que todas las partes del sistema conectadas

a tierra elevarán y bajarán su potencial con respecto de tierra al tiempo de la descarga. Como ejemplo una malla de 30 x 30 m con 36 cuadrados, de cable de 0.5 cm de diámetro tiene una inductancia de 400×10^{-7} H, lo que dará una impedancia de 25 ohm.

2.2.5. SISTEMA FRANKLIN. [6]

Benjamín Franklin fue el primero en darse cuenta de que la altura era un factor importante en el diseño de protecciones contra rayos.

El rango de atracción de un pararrayos es la distancia sobre la cual un pararrayos sencillo vertical de una altura dada sobre un plano limpio atrae una descarga atmosférica. El espacio protegido por tal dispositivo define el lugar en que la construcción no suele ser afectada por una descarga directa.

El sistema más sencillo y antiguo de pararrayos, es el que consiste en terminales aéreas de cobre, bronce o aluminio anodizado terminadas en punta, llamadas puntas Franklin, colocadas sobre las estructuras a proteger de los rayos. Este sistema se aplica en iglesias, casas de campo, graneros y otras estructuras ordinarias.

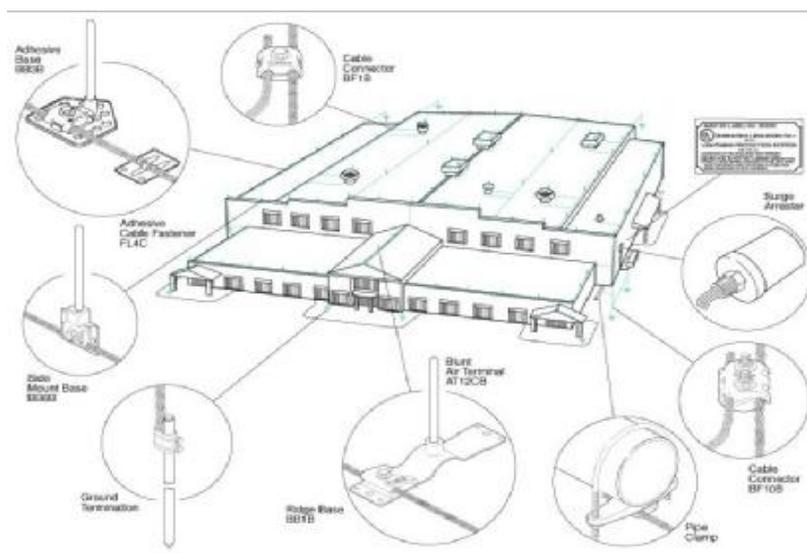


Figura 2.12: Sistema Franklin

Para asegurarnos de una buena conexión y de una baja impedancia, por lo menos cada terminal aérea debe tener dos trayectorias a tierra, y estas trayectorias deben estar cuando más a 30 m de separadas entre sí.

De acuerdo con la norma NFPA-780, el sistema de electrodos para la protección contra descargas atmosféricas depende también de las condiciones del suelo. De ahí que, para estructuras ordinarias menores a 23 m de altura, en:

- Arcilla Profunda y Húmeda. - Una simple varilla de 3 m es suficiente.
- Suelo arenoso. - Se requieren dos o más varillas espaciadas más de 3 m.
- Suelo con tierra poco profunda. - Se emplean trincheras radiales al edificio de 5 m de largo y 60 cm de ancho en arcilla. Si la roca está más superficial, el conductor podría colocarse sobre la roca.
- Rocas. - En un suelo muy poco profundo, un cable en anillo se instala en una trinchera alrededor de la estructura. Para mejorar aún el contacto.

2.2.6. SISTEMA TIPO JAULA DE FARADAY. [6]

Para estructuras grandes, se utiliza una modificación al sistema Franklin de pararrayos, al añadir a las terminales aéreas conductores que crucen sobre la estructura a proteger como una caja de Faraday limitada sobre y a los lados de la construcción, y todo ese conjunto resultante es conectado a cables múltiples de bajada, que a su vez se conectan al sistema de tierras perimetral del edificio.

Los edificios modernos con estructura de acero y con varillas embebidas en concreto se acercan al concepto de la jaula de Faraday, y el riesgo de que un rayo que penetre en un edificio protegido de esta manera es extremadamente pequeño.

Aunque se debe notar que los rieles de los elevadores no deben ser usados como el conductor de bajada de los pararrayos, la NOM-001-SEDE-2012 permite que se unan al sistema de pararrayos.

Para hacer más efectiva la protección de este sistema, se usan puntas del tipo Franklin o del tipo "paraguas" (patentadas).

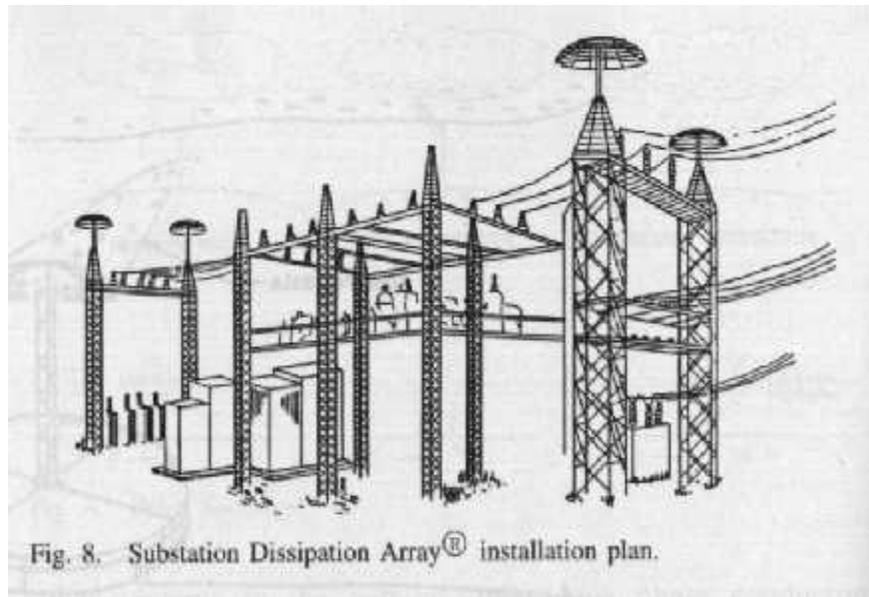


Figura 2.13: Sistema tipo jaula Faraday.

2.2.7 PROTECCIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

La probabilidad de que un rayo caiga en una torre de transmisión ha sido ampliamente estudiada.

También, se ha encontrado que las corrientes de descargas son mayores (>80 kA) en los lugares de índice isoqueráunico alto.

Los distintos componentes de una línea están definidos por sus características de voltaje-tiempo o nivel básico de impulso. Si la descarga probable tiene un voltaje que excede éstas, un flameo aparecerá.

La protección contra descargas atmosféricas de líneas aéreas de energía eléctrica se logra colocando un hilo puesto a tierra sobre ellas, llamado hilo de guarda y, mediante apartarrayos. El ángulo de protección obtenido al colocar un hilo de guarda es de 30 grados siempre y cuando el hilo se conecte a una tierra de baja resistencia (25 ohm o menos). Hay que notar que esta protección no protege a los equipos.

Los árboles altos y cerca de las líneas protegen las líneas de transmisión contra descargas atmosféricas.

Para líneas de distribución, el uso únicamente del hilo de guarda es económicamente aceptable en donde el terreno por donde pasa la línea tiene una baja resistividad. En cambio, se utilizan los apartarrayos sin hilo de guarda en terrenos donde se tiene resistencia a tierra de electrodos de más de 25 ohm.

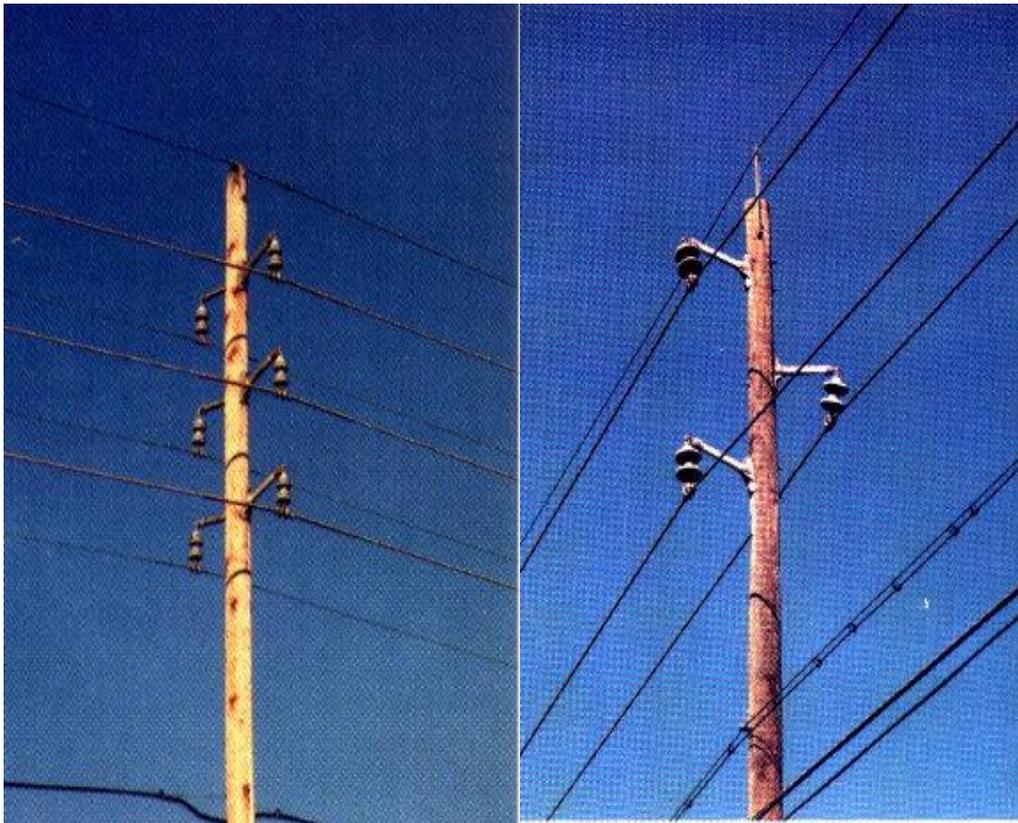


Figura 2.14: Estructura de protección de descarga atmosférica.

2.2.8. PROTECCIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.

Las subestaciones de potencia son protegidas por puntas pararrayos colocadas sobre las estructuras, y por los hilos de guarda de las líneas que rematan en la subestación. Los hilos de guarda están conectados directamente a la malla de tierra de la subestación.

En el caso de las estructuras metálicas tipo rejilla, las mismas estructuras forman una jaula de Faraday de protección



Figura 2.15: Protección con sistema tipo jaula Faraday.

Las subestaciones de distribución no son protegidas contra una descarga atmosférica directa, porque se ha comprobado que los rayos caen mayormente sobre las líneas.

2.2.9. PROTECCIÓN DE EQUIPOS ELÉCTRICOS EN MEDIA Y ALTA TENSIÓN.

Las descargas estáticas producen en los conductores una onda de sobrevoltaje viajera en los dos sentidos, en su viaje a tierra. Cuando esta onda llega a una discontinuidad en el circuito, que puede ser un ramal sin uso, la onda de voltaje se refleja y en ciertos lugares puede llegar a ser de hasta del doble de la amplitud original. los apartarrayos, que son aparatos eléctricos que dirigen a tierra los sobrevoltajes, deben colocarse uno por fase y lo más cerca posible del equipo a proteger, como transformadores, interruptores, reguladores de voltaje, etc. para ser mayor su efectividad.



Figura 2.16: Apartarrayos

Los apartarrayos están definidos por sus características de "flameo" y por su voltaje cuando entran en operación. Estas características se coordinan con las de los otros aislamientos para definir la clase de nivel básico de impulso.

La NOM-001-SEDE-2012 (280-24) observa que el conductor de puesta a tierra directa del apartarrayos de un sistema de distribución podrá interconectarse al neutro del secundario siempre y cuando éste último tenga una conexión a una tubería metálica subterránea de agua, o, siempre y cuando sea un sistema secundario multiterrizado. Y, que los conductores no se lleven en cubiertas metálicas a menos de que se conecten a éstas en sus dos extremos (280-25).

2.3. NORMATIVIDAD NOM-022-STPS.

2.3.1. Descarga atmosférica NOM-002-STPS-2015.

En el punto 8 refiere al Sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas y las reglas que deben cumplir de acuerdo con la norma.

A continuación, se da ciertas reglas que se deben cumplir estas son:

8.1 Los centros de trabajo o áreas que se clasifiquen como riesgo de incendio alto de acuerdo con lo establecido por la NOM-002-STPS-2015, o las que la sustituyan, deberán

instalar un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, tal como el sistema de pararrayos.

Para el diseño e instalación del sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, puede consultarse la Norma Mexicana NMX-J-549-ANCE-2005, o las que la sustituyan.

En la Guía de referencia I, se presentan algunos ejemplos en los que se sugiere considerar la instalación de un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

8.2 Para seleccionar un sistema externo de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, ya sea con terminales aéreas convencionales o terminales aéreas de tecnologías alternativas, se deberán considerar, al menos, los factores siguientes:

- a) El arreglo general del centro de trabajo (planta, cortes y elevaciones);
- b) Las sustancias inflamables o explosivas que se almacenen, manejen o transporten en el centro de trabajo, en cuanto a su inflamabilidad o explosividad, y la tendencia a generar y acumular cargas eléctricas estáticas, por sus características fisicoquímicas y las de los contenedores y/o tuberías, así como la naturaleza de los procesos a que están sujetas, y las condiciones presentes del ambiente;
- c) La densidad del rayo a tierra de la región, y
- d) La zona de protección del sistema.

8.3 El centro de trabajo deberá contar con un estudio que demuestre que el área de cobertura del sistema externo de protección contra descargas eléctricas atmosféricas comprende el edificio, local o zona de riesgo en la que se manejan las sustancias inflamables o explosivas. El estudio deberá ser elaborado por un ingeniero electricista o afín, y contener, al menos, lo siguiente:

- a) Tipo y características del sistema instalado;
- b) Altura de las terminales aéreas que sobresalen de cualquiera de las estructuras circundantes;
- c) Ubicación del sistema;
- d) Área de cobertura de protección con la metodología utilizada para su cálculo, y
- e) Nombre y firma de quien lo elaboró, así como número de cédula profesional.

8.4 Para reducir el riesgo de choque eléctrico derivado de la circulación de la corriente de rayo en los conductores de bajada y en los elementos de la red de puesta a tierra del sistema externo de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, se deberá adoptar lo siguiente:

- a) Instalar un arreglo del sistema de puesta a tierra y proveer una superficie de alta resistividad en la zona de tránsito de trabajadores, tal como grava triturada de 0.10 metros de espesor como mínimo, entre el terreno natural y los elementos del sistema de puesta a tierra;
- b) Proveer una canalización no metálica con resistencia a la intemperie sobre la superficie del conductor de bajada con el objeto de reducir la posibilidad de contacto accidental o incidental de los trabajadores;
- c) Colocar en la canalización avisos de precaución que indiquen el "PELIGRO: EVENTUAL CORRIENTE DE RAYO", conforme a lo dispuesto por la NOM-026-STPS-2008, o las que la sustituyan;
- d) Unir eléctricamente al sistema de puesta a tierra (por debajo del nivel de piso) todos los elementos metálicos y acero de refuerzo de la estructura a proteger, mediante electrodos de puesta a tierra horizontales colocados a una profundidad mínima de 0.60 metros, y
- e) Instalar el conductor de bajada de tal forma que su recorrido sea lo más corto posible y se eviten cruces con instalaciones eléctricas.

8.5 Los trabajadores que realicen actividades en lugares en los que exista exposición a la incidencia de descargas atmosféricas, y no estén protegidos contra este riesgo, tales como azoteas de edificios que sobresalen en altura con respecto a otras estructuras contiguas, postes o torres de alumbrado o cableado, plataformas elevadas, antenas, entre otros, deberán suspender la actividad tan pronto se aproxime una tormenta eléctrica.

8.6 La red de puesta a tierra de los sistemas de pararrayos deberá interconectarse con otras redes de puesta a tierra, tales como las de motores, subestaciones o sistema eléctrico en general.

8.7 Los electrodos de la red de puesta a tierra de los sistemas de pararrayos deberán permitir su desconexión cuando se realice la medición a que se refiere el Capítulo 9 de esta

Norma. Para ello, los electrodos deberán contar con medios que permitan su desconexión y que eviten falsos contactos.

8.8 Queda prohibido utilizar pararrayos que estén fabricados o funcionen a base de materiales radiactivos.

2.3.2 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE LA RED DE PUESTA A TIERRA.

En la norma-022-stps-2015 en el punto 9 se habla de la Medición de la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra

9.1 La medición de la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra se deberá realizar aplicando el método de caída de tensión, de conformidad con lo que prevé el numeral 9.4 de la presente Norma. Esta medición deberá efectuarse tomando en consideración la condición más desfavorable en cuanto al grado de humedad del terreno en el que se ha instalado la red de puesta a tierra.

9.2 Para realizar la medición de la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra se deberá contar con los instrumentos siguientes:

- a) Equipo de medición de resistencia de tierra con las características siguientes:
 - 1) Intervalo de frecuencia de 90 Hz a 200 Hz o mayor, y
 - 2) Con capacidad de proveer corriente con valores de al menos 0.1 mA;
- b) Accesorios provistos por el fabricante del equipo de medición o, en caso de no contar con accesorios para el equipo de medición, utilizar cable o cordón aislado de cobre de forro apropiado a las condiciones de uso con una designación de uso más común de 2.08 mm² (14 AWG) o 1.307 mm² (16 AWG), con accesorios en sus extremos para la correcta conexión al equipo y electrodos auxiliares con una longitud mínima de 50 centímetros y un diámetro mínimo de 13 milímetros de alguno de los materiales siguientes: acero inoxidable, acero con recubrimiento de cobre o acero galvanizado;
- c) Óhmetro o medidor de resistencia a tierra para comprobar la continuidad de las conexiones a tierra, con una resolución de al menos 1 ohm;
- d) Voltímetro con resolución de al menos 1 volt, y

- e) Flexómetro o instrumento similar de medición de longitud.

9.3 El óhmetro o medidor de resistencia a tierra y el voltímetro deberán contar con certificado de calibración vigente, en los términos de lo determinado por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

9.4 La medición de la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra se deberá realizar conforme a lo siguiente:

- a) Verificar que el electrodo bajo prueba (que corresponde a la red de puesta a tierra) esté desconectado de la red de puesta a tierra, considerando lo siguiente:
- 1) Realizar la desconexión de la red de puesta a tierra, con los equipos eléctricos desenergizados, y
 - 2) Efectuar la medición de la resistencia a tierra desconectando cada electrodo de forma individual, cuando ésta se realice en condiciones de operación normal, a fin de no desproteger a los trabajadores;
- b) Ajustar a cero la aguja del instrumento de medición analógico o verificar que la fuente de poder del equipo digital tenga suficiente energía para realizar el conjunto de mediciones;
- c) Aplicar el método de caída de tensión de la manera siguiente:
- 1) Hacer circular una corriente entre dos electrodos: uno llamado C1 (que corresponde a la red de puesta a tierra) y un electrodo auxiliar denominado C2, mismo que se introduce al terreno a una distancia mínima de 20 metros de C1. Para realizar la primera medición se introduce en el terreno otro electrodo auxiliar llamado P1, a un metro de distancia de C1, entre el electrodo bajo prueba C1 y el electrodo auxiliar C2;
 - 2) Desplazar el electrodo auxiliar P1 de manera lineal a 3 metros de la primera medición y en dirección al electrodo auxiliar C2 para realizar la segunda medición, y
 - 3) Realizar las mediciones siguientes desplazando el electrodo auxiliar P1 cada 3 metros hasta complementar 19 metros. En la Figura 1 se muestra la colocación de los electrodos de la red de puesta a tierra, y auxiliares;
- d) Registrar los valores obtenidos de las mediciones;

- e) Elaborar una gráfica con base en los valores registrados, similar a la que se ilustra en la parte inferior de la Figura 2.17 siguiente;

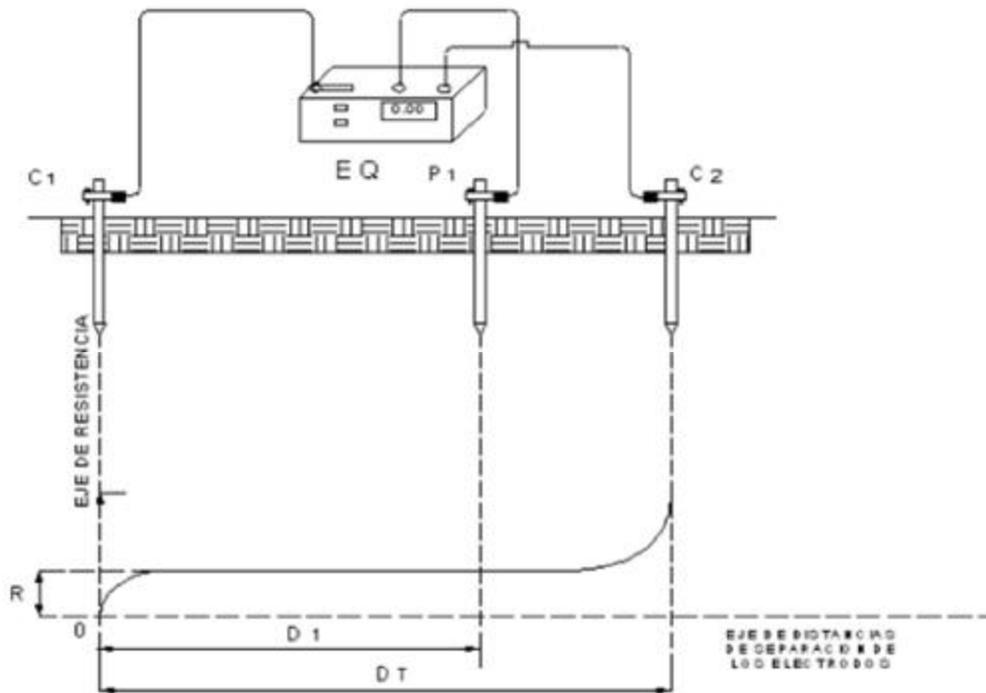


Figura 2.17: Posición de electrodos y gráfica de valores de resistencia eléctrica vs. Distancia

D1 Distancia entre el electrodo de la red de puesta a tierra C1 y el electrodo auxiliar P1.

DT Distancia entre el electrodo de la red de puesta a tierra C1 y el electrodo auxiliar C2.

- f) Obtener el valor de la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra de la intersección del eje de resistencia con la parte paralela de la curva al eje de las distancias;
- g) Repetir las mediciones alejando el electrodo C2 del electrodo C1, cuando la curva obtenida no presente un tramo paralelo, hasta obtener valores paralelos al eje de las distancias, y
- h) Verificar que los valores de la resistencia a tierra, de la red de puesta a tierra que se obtengan en esta prueba, sean menores o iguales a 10 ohm para el (los) electrodo(s) del sistema de pararrayos, y/o tener un valor menor o igual a 25 ohm para la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra.

9.5 El resultado de las mediciones tendrá que registrarse, dicho registro deberá contener, como mínimo, lo siguiente:

- a) Los datos del centro de trabajo:
 - 1) Nombre o razón social del centro de trabajo;
 - 2) Domicilio del centro de trabajo;
 - 3) Fecha de realización de la medición, y
 - 4) Nombre y firma de la persona que realizó la medición;
- b) Los datos de los instrumentos de medición:
 - 1) Nombre genérico del instrumento utilizado;
 - 2) Características del equipo de medición utilizado (modelo, número de serie, intervalos de medición, precisión, exactitud, etc.), y
 - 3) Copia del certificado de calibración vigente del instrumento utilizado;
- c) Los valores de las mediciones:
 - 1) Valores de resistencia a tierra de la red de puesta a tierra y/o de la resistencia a tierra del (los) electrodo(s) del sistema de pararrayos, y
 - 2) Indicación de si existe continuidad eléctrica de los puntos de conexión del sistema;
- d) El croquis en el que se muestre los puntos de medición del sistema de puesta a tierra y, en su caso, del (los) electrodo(s) del sistema pararrayos, y
- e) Las características del sistema de pararrayos utilizado, en su caso, con al menos lo siguiente:
 - 1) Tipo de sistema de pararrayos;
 - 2) Altura de las terminales aéreas;
 - 3) Ubicación, y
 - 4) Área de cobertura de protección

2.4. VALORES DE LA RESISTENCIA DEL ELECTRODO Y LA TIERRA.

Existe bastante confusión con respecto a lo que constituye una buena puesta a tierra y cuál debe ser el valor de la resistencia de puesta a tierra. Idealmente, una puesta a tierra debe tener una resistencia de cero ohmios. No existe un único umbral estándar de resistencia de puesta a tierra que sea reconocido por todas las agencias. Sin embargo, la NFPA y la IEEE han recomendado un valor de resistencia de puesta a tierra de 5,0 ohmios o menos.

Asegurando de que la impedancia del sistema a la puesta a tierra sea de menos de 25 ohmios, tal como se especifica en NEC 250.56. En instalaciones con equipo sensible, debe ser de 5,0 ohmios o menos”. El sector de las telecomunicaciones con frecuencia ha utilizado 5,0 ohmios o menos como su valor para puesta a tierra y unión. La meta en la resistencia de puesta a tierra es lograr el mínimo valor de resistencia de puesta a tierra posible que tenga sentido tanto económica como físicamente.

NOM-001-SEDE-2012 (250-84). La NOM permite para los sistemas con un electrodo único que conste de una varilla, tubería o placa, que no tiene una resistencia a tierra de 25 ohm o menos, que se complemente con electrodos adicionales de los tipos mencionados anteriormente, separados por lo menos una distancia de 1,83 m.

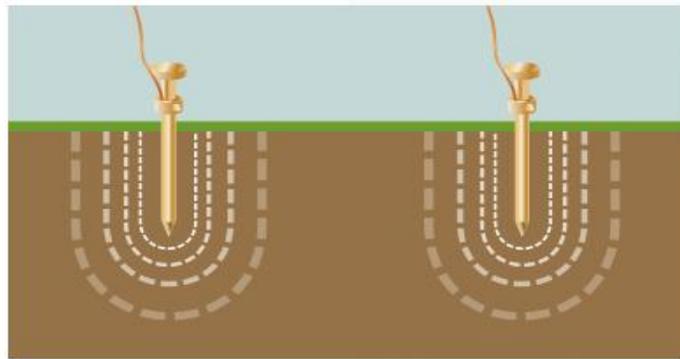


Figura 2.18: Separación de electrodo a una distancia de 1.83 m entre sí.

Si la resistencia del electrodo único mencionado excede del valor buscado, esa resistencia se puede reducir de las siguientes maneras:

- Varilla de mayor diámetro

Usando varillas de 19 mm en lugar de varillas de 13 mm se logra una reducción en la resistencia a tierra de hasta un 10% máximo.

- Varillas más largas

Para los casos donde las capas superiores de la tierra son de arena y donde a gran profundidad se encuentra una capa de terreno húmedo, existen varillas que se acoplan unas a otras para lograr longitudes hasta de 15 m.

Por lo general, doblando el largo, se obtiene una reducción del 40% de resistencia a tierra. Otra ventaja es que, con el uso de varillas largas, se controla el gradiente de potencial en la superficie.

- Varillas en paralelo

El colocar varias varillas en paralelo es una manera muy efectiva de bajar la resistividad. Pero, las varillas de tierra no deben ser colocadas muy cerca una de otra, porque cada varilla afecta la impedancia del circuito, por los efectos mutuos. La NOM establece que la distancia entre ellas o de cualquier electrodo, no debe ser menos de 1,8 m, aunque se recomienda que estén separadas más del largo de cualquiera de ellas.

2.4.1. COMPONENTES DE LA RESISTENCIA DE UN ELECTRODO.

1- Resistencia del electrodo (metal).

2- Resistencia de contacto entre el electrodo y el terreno.

Se puede despreciar si el electrodo está exento de cualquier cubierta aislante como tintas, pinturas, grasas, etc. y si la tierra está bien compactada en la zona de contacto de sus paredes.

3- Resistencia del terreno (resistencia del cuerpo de tierra).

Esta es realmente la componente que influye en el valor de la resistencia de una puesta a tierra y depende básicamente de la resistividad del suelo y de la distribución de la corriente proveniente del electrodo.

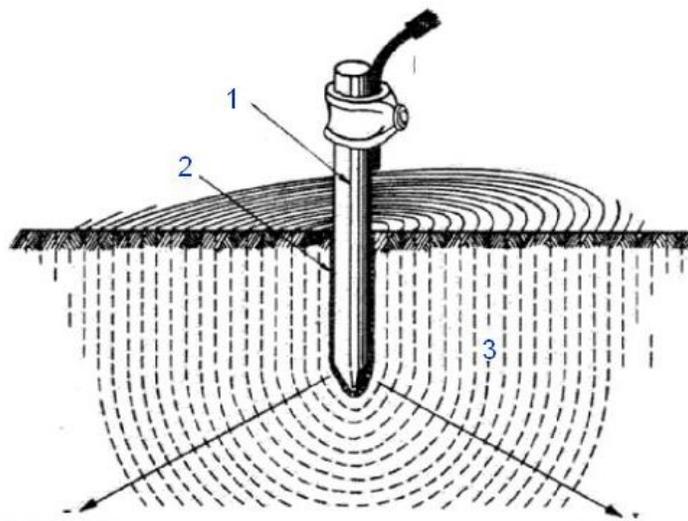


Figura 2.19: Elementos que constituye la resistencia de un electrodo.

2.4.2. ¿QUÉ AFECTA LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA?

La norma NEC (250-83-3) requiere que esté en contacto con el terreno una mínima longitud del electrodo de puesta a tierra de 2,5 metros (8 pies). Sin embargo, existen cuatro variables que afectan la resistencia de un sistema de puesta a tierra:

1. Longitud y profundidad del electrodo de puesta a tierra.
2. Diámetro del electrodo de puesta a tierra.
3. Número de electrodos de puesta a tierra
4. Diseño del sistema de puesta a tierra.

1- Longitud y profundidad del electrodo de puesta a tierra

El terreno no tiene una resistividad constante, y puede ser muy impredecible. Resulta crítico al instalar el electrodo de puesta a tierra que este se encuentre debajo de la línea de congelamiento. Esto se hace para que la resistencia de puesta a tierra no se vea demasiado influida por el congelamiento del terreno circundante. La manera más eficaz de disminuir la resistencia de puesta a tierra es hincar los electrodos de puesta a tierra a una mayor profundidad.

Por lo general, al duplicar la longitud del electrodo de puesta a tierra, es posible reducir el nivel de resistencia en un 40 % adicional. Hay ocasiones en las que es físicamente imposible hincar las varillas de puesta a tierra a una profundidad mayor; se trata de áreas compuestas de roca, granito, etc. En estos casos, son viables métodos alternativos, que incluyen el uso de cemento de puesta a tierra.

2- Diámetro del electrodo de puesta a tierra

El aumento del diámetro del electrodo de puesta a tierra tiene muy poco efecto en disminuir la resistencia. Por ejemplo, es posible duplicar el diámetro de un electrodo de puesta a tierra, pero la resistencia solo disminuiría en un 10 %

3- Número de electrodos de puesta a tierra

Hay otra manera de disminuir la resistencia de puesta a tierra es utilizar varios electrodos de puesta a tierra. En este diseño, se hinca más de un electrodo en la tierra, y se los conecta en paralelo, a fin de reducir la resistencia. Para que los electrodos adicionales resulten eficaces, el espaciado de las varillas adicionales debe ser al menos igual a la profundidad de la varilla hincada. Sin un espaciado correcto de los electrodos de puesta a tierra, sus esferas de influencia se interceptarán y no se disminuirá la resistencia.

Para asistirlo al instalar una varilla de puesta a tierra que cumpla con los requisitos específicos de resistencia, puede utilizar la tabla de resistencias de puesta a tierra que aparece a continuación. Recuerde, esta debe utilizarse únicamente como regla general, porque el terreno tiene capas y rara vez es homogéneo. Los valores de resistencia variarán enormemente.

4- Diseño del sistema de puesta a tierra

Los sistemas simples de puesta a tierra constan de un único electrodo de puesta a tierra hincado en el terreno. El uso de un único electrodo de puesta a tierra es la forma más común de realizar dicha puesta a tierra y puede encontrarse fuera de su casa o lugar de trabajo. Los sistemas complejos de puesta a tierra constan de varias varillas de puesta a tierra conectadas entre sí, de redes en malla o retícula, de placas de puesta a tierra y de bucles de puesta a tierra. Estos sistemas comúnmente se instalan en las subestaciones de generación de energía eléctrica, oficinas centrales y sitios de torres celulares.

Las redes complejas aumentan drásticamente la cantidad de contacto con la tierra circundante y disminuyen las resistencias de puesta a tierra. Cada electrodo de puesta a tierra tiene su propia "esfera de influencia".

Sistemas de puesta a tierra

Electrodo de puesta a tierra simple

Electrodos de puesta a tierra múltiples conectados

Red de malla

Placa de puesta a tierra

5

Tipo de terreno Resistividad del terreno RE Resisten.

2.4.3. VALORES ACEPTABLES DE RESISTENCIA A TIERRA.

De acuerdo con la Norma oficial mexicana NOM-022-STPS-2015 (9.4) establece que debemos Verificar que los valores de la resistencia a tierra, de la red de puesta a tierra que se obtengan en las pruebas, sean menores o iguales a 10 ohms para el (los) electrodo(s) del sistema de pararrayos, y/o tener un valor menor o igual a 25 ohms para la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra.

Tabla 2.1: Valores de resistencia a tierra.

Aplicación	Resistencia a tierra (Ω)
Sistemas Eléctricos de Baja Tensión	<25 Ω
Sistemas de Protección Contra Rayos	<10 Ω
Sistemas de Telecomunicaciones y Hospitales	<5 Ω

2.5. RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del terreno mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar la puesta a tierra de sistemas.

Como sabemos la resistividad del terreno es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno.

En la medición de la resistividad del terreno, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina

"Resistividad Aparente" que, para el interés de este trabajo, será conocida simplemente como "Resistividad del Terreno".

En la Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-2015 se define el término resistividad, como la resistencia que ofrece al paso de la corriente un cubo de terreno de un metro por lado.

De acuerdo con la NOM-008-SCFI-2002, Su representación dimensional debe estar expresada en Ohm-m, cuya acepción es utilizada internacionalmente.

La resistividad del terreno varía ampliamente y son afectados por diversos factores:

- Sales solubles
- Composición propia del terreno
- Estratigrafía
- Granulometría
- Estado higrométrico
- Temperatura
- Compactación

SALES SOLUBLES

La resistividad del terreno es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas. Como ejemplo, para valores de 1% (por peso) de sal (NaCl) o mayores, la resistividad es prácticamente la misma, pero, para valores menores de esa cantidad, la resistividad es muy alta.

COMPOSICIÓN DEL TERRENO

La composición del terreno depende de la naturaleza de este. Por ejemplo, el terreno de arcilla normal tiene una resistividad de 40-500 ohm-m por lo que una varilla electrodo enterrada 3 m tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200 ohm respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100 ohm o menos con una sola varilla electrodo es virtualmente imposible.

ESTRATIGRAFÍA

El terreno obviamente no es uniforme en sus capas. En los 3 m de longitud de una varilla electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos.

GRANULOMETRÍA

Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla.

ESTADO HIGROMÉTRICO

El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Y, puede tenerse el caso de que, en tiempo de secas, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos.

TEMPERATURA

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto de que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra

COMPACTACIÓN

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación de este. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

2.5.1. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Asimismo, puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas.

En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

El perfil de la resistividad del suelo determinará el valor de la resistencia a tierra y la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un o *Megger* de tierras de cuatro terminales.

Los aparatos de mayor uso, de acuerdo con su principio de operación, pueden ser de 2 tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa.

Los telurómetros deben inyectar una corriente de frecuencia que no sea de 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes que no se deban al aparato sino a ruidos eléctricos. Por ejemplo, si estamos cerca de una subestación o de una línea en servicio, y vamos a realizar mediciones de resistividad y resistencia de tierra, con un aparato de 60 Hz, dichos sistemas van a inducir corrientes por el suelo debido a los campos electromagnéticos de 60 Hz y darán una lectura errónea.

De igual manera sucede cuando los electrodos de prueba están mal conectados o tienen falsos contactos, darán señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el aparato, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas.

También estos aparatos de repente tienen oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas.

Un aparato inteligente, lleva conductores blindados, coaxiales, tiene sistemas de filtraje, de análisis y mide lo que halla, pero esa información la analiza, la filtra y luego la deduce. Por ejemplo, para hacer una medición manda una señal de 100 Hz y mide; luego manda otra señal de 150 Hz y vuelve a medir y puede seguir enviando otras altas frecuencias hasta que los valores van siendo similares, forma una estadística y obtiene un promedio.

Los telurómetros son analógicos o digitales y deben contener 4 carretes de cable calibre 14 AWG normalmente. Para enrollamiento rápido se recomienda construir un sistema devanador que permita reducir el tiempo de la medición. También traen 4 electrodos de material con la dureza suficiente para ser hincados en la tierra con marro. Son de una longitud aproximada de 60 cm y un diámetro de 16 mm. Además de lo anterior se hace necesario contar con una cinta no metálica de 50 m aproximadamente.

Los telurómetros tienen cuatro terminales 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) y están numerados en el aparato C1 P1 P2 C2. Los telurómetros deben estar certificados y probados en el campo con una resistencia antes de realizar las mediciones.

Como la medición obtenida por un telurómetro es puntual, se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90 grados del primero, y, en el sentido de las diagonales. En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.



Figura 2.20: Megger de Cuatro Terminales.

2.5.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

2.5.2.1. METODO WERNER.

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

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

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

Si la distancia enterrada (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A). O sea $A > 20B$, la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

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

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

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

2.5.2.2. MÉTODO DE SCHLUMBERGER.

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

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

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

2.6. CORROSIÓN EN VARILLA DE TIERRA.

En los últimos años el electrodo ha tenido diversos problemas por corrosión y cada vez han aumentado más los daños, ya que los metales hacen contacto directo con el agua o el suelo (electrolitos), y puede sufrir Corrosión por causa de la formación de Celdas voltaicas, de corrientes parásitas, y suelos corrosivos.

No se ha garantizado una posible protección a los electrodos de puesta a tierra de la corrosión Encerrándolos completamente, es decir, separando los metales del suelo, La mayoría de los cables y conductores poseen vainas que forman una barrera contra la humedad y las agresiones mecánicas externas, es decir es una funda de protección, pues todas las vainas habituales que se han utilizado hasta ahora han tenido una alta resistencia eléctrica y por lo tanto invalidan el efecto de los electrodos de puesta a tierra.

Los electrodos de puesta a tierra fabricados con un material uniforme se ven claramente amenazados por la corrosión proveniente de los suelos corrosivos y de la formación de celdas de concentración.

El riesgo de corrosión por los suelos siempre depende del material y del tipo y de la composición del suelo. Por otro lado, la formación de celdas entre diferentes metales con potenciales de (metal/electrolitos) diferentes causan riesgos. Sin embargo, no se sabe exactamente si las armaduras de fundaciones De hormigón también pueden convertirse en el cátodo de una celda y así causar corrosión a otras instalaciones. La relación de superficie ánodo/cátodo es cada vez más desfavorable y el riesgo de corrosión del electrodo de tierra se incrementa inevitablemente.

Los “materiales de la puesta tierra” se derivan las medidas prácticas anticorrosivas y de conservación del buen estado del material, especialmente en lo que respecta a los electrodos de puesta tierra para la protección contra las descargas atmosféricas.

2.6.1. CLASIFICACIÓN DE CORROSIÓN.

La corrosión en electrodo es inevitable, se tiene manifestaciones que pueden derivar en la pérdida de su resistencia, ductilidad o que se presente una falla por agrietamiento.

La mayor parte de proceso de corrosión se deben a los diversos factores que afectan al electrodo de tierra, existen tipos de corrosión:

- 1) Picaduras.
- 2) Corrosión intergranular.
- 3) Agrietamiento.
- 4) Corrosión en suelos.

1) **Picaduras**

Las picaduras se forman debido a la velocidad de corrosión, es un tipo de corrosión que presenta uniformidad, es mayor en unas zonas que otras.

Cuando se tiene un electrodo como ánodo y el ataque es sobre una pequeña zona de este, las picaduras resultantes se definen como profundas. La profundidad de las picaduras se determina a partir del factor de picadura, que es la relación de la penetración máxima producida en el electrodo a la penetración media determinada por la pérdida que se tiene en el electrodo.

La cavitación es un ataque en el cual los electrodos están expuestos a líquidos que se desplazan a grandes velocidades, generalmente estos electrodos sufren corrosión de tipo picadura.

2) Corrosión intergranular

La corrosión intergranular ocurre en los espacios que limitan los granos de un electrodo y produce pérdida de la resistencia mecánica y de la ductilidad.

El material, de área limitada, que forma los espacios intergranulares, y que actúa como ánodo, está en contacto con las superficies de los granos que son más grandes y actúan como cátodos. Este tipo de corrosión con frecuencia penetra con profundidad en el electrodo y causa fallas.

3) Agrietamientos.

Se presentan los siguientes casos de falla por agrietamiento, los cuales son:

*falla por corrosión bajo fatiga, que es cuando electrodo se encuentra sometido a constantes tensiones de tracción repetidas o alternativas en un medio corrosivo.

*límite de fatiga, que es el medio en el cual las tensiones de tracción no son corrosivas.

*corrosión bajo tensiones, tiene presencia cuando un electrodo se encuentra a tracción constante y presenta agrietamiento inmediato.

4) Corrosión en suelos.

Él se caracteriza por ser un electrolito al estar por sales, materia orgánica y humedad. Por lo que los electrodos que se entierran en el suelo se ven afectados por los problemas de la corrosión.

Un suelo natural está formado por arena, arcilla, cal y humus. Lo que afecta directamente a la velocidad de corrosión. En general es desfavorable para la industria el problema de la corrosión.

Capítulo

3

Sistema de medición de corrosión a través de la rugosidad de la varilla

3.1. CAMPO MAGNÉTICO DE CONDUCTOR UNIFORME.

Una vez más podemos confirmar que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos, el primer caso que se estudió fue la corriente rectilínea a través de un conductor.

El resultado de la **experiencia de Oersted** indica que el campo magnético producido por una corriente rectilínea es perpendicular a dicha corriente. Además, el magnetismo natural muestra que las líneas de fuerza son cerradas en todas las experiencias. Por lo tanto, teniendo en cuenta la geometría de la situación, es lógico plantear que las líneas del campo deben ser circunferencias contenidas en planos perpendiculares a la corriente y con el centro en el conductor. La veracidad de esta hipótesis se puede comprobar sencillamente colocando una brújula en diversas posiciones alrededor de la corriente o espolvoreando en un plano perpendicular a la corriente limaduras de hierro, que se imantan y dibujan la línea del campo magnético.



3.1: Campo magnético en conductor uniforme.

Se dice también que el sentido de las líneas del campo magnético verifica respecto del de la corriente la llamada **regla de la mano derecha** o de cualquier rosca (como la de un tornillo o un sacacorchos). esta regla tiene en cuenta que, como es lógico, si se invierte el sentido de la corriente eléctrica, también se invierte el sentido de circulación del campo magnético.

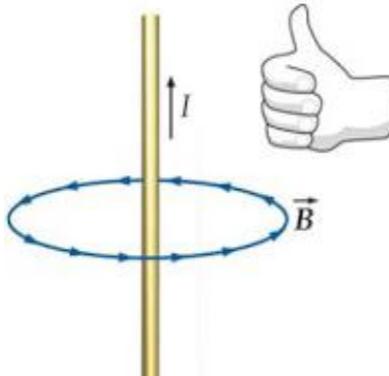


Figura 3.2: Campo magnético circula alrededor del conductor.

Cuando circula por la varilla una corriente i , el campo magnético B ejerce una fuerza y el sentido de la corriente i y el campo B son mutuamente perpendiculares.

Según la **Ley de Biot-Savart**: El campo magnético creado por un conductor en un punto P es la integral del campo creado por el elemento de corriente extendida a todo el hilo:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

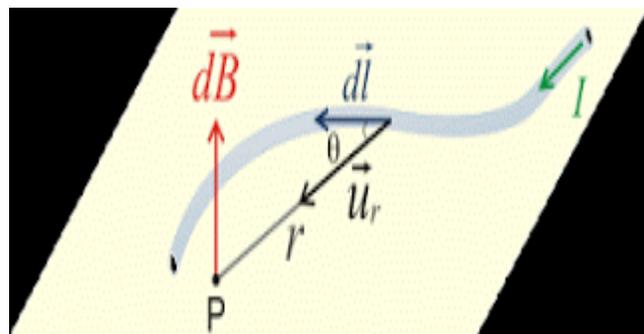


Figura 3.3: Integral de campo magnético en un conductor.

En general esta integral es complicada de calcular, salvo para situaciones sencillas en que la forma del hilo que transporta la corriente tiene cierto grado de simetría.

3.2. CAMPO MAGNÉTICO DE CONDUCTOR RUGOSO.

La diferencia del conductor uniforme al conductor rugoso esta cuando se le aplica una corriente (i) al conductor rugoso el campo magnético no es perpendicular al de la corriente, sino que su campo magnético varia, ya sea que suma o resta la magnitud del campo magnético. Podemos observar lo que realmente sucede con el campo magnético en un conductor uniforme y en un conductor rugoso.

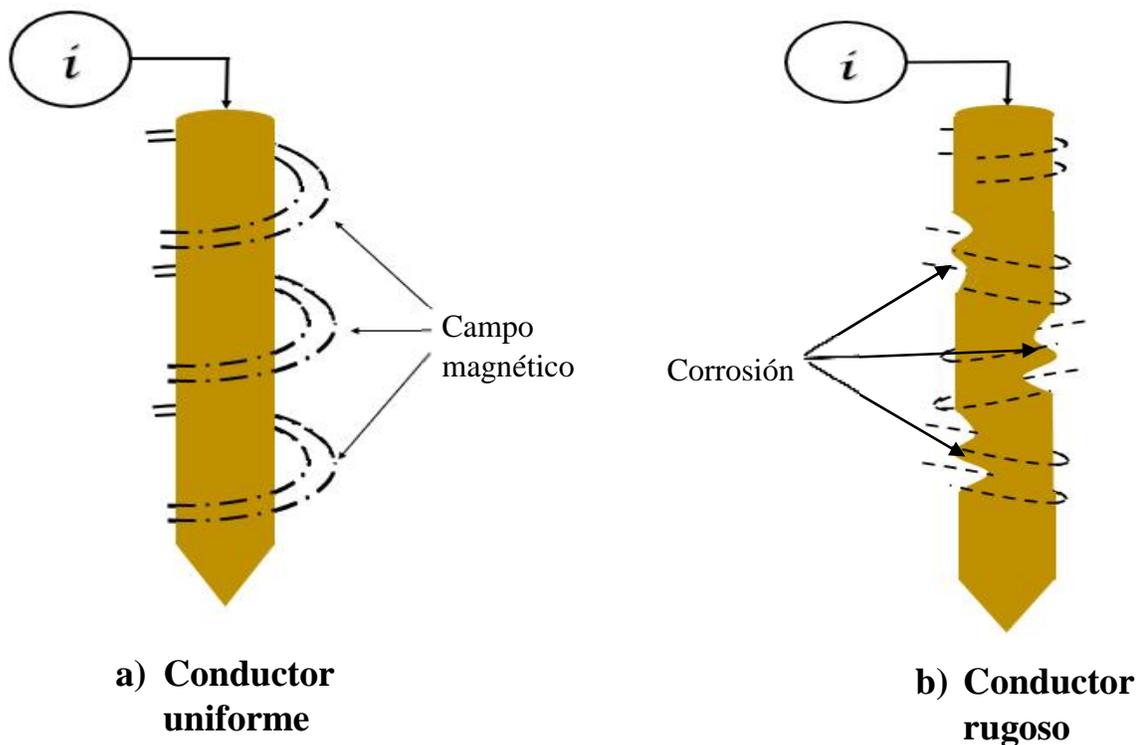


Figura 3.4: a) Campo magnético en un conductor uniforme b) Campo magnético en un conductor rugoso.

Por otro lado, cuando se le aplica corriente a un conductor uniforme y a un conductor rugoso podremos visualizar gráficas diferentes por el campo magnético.

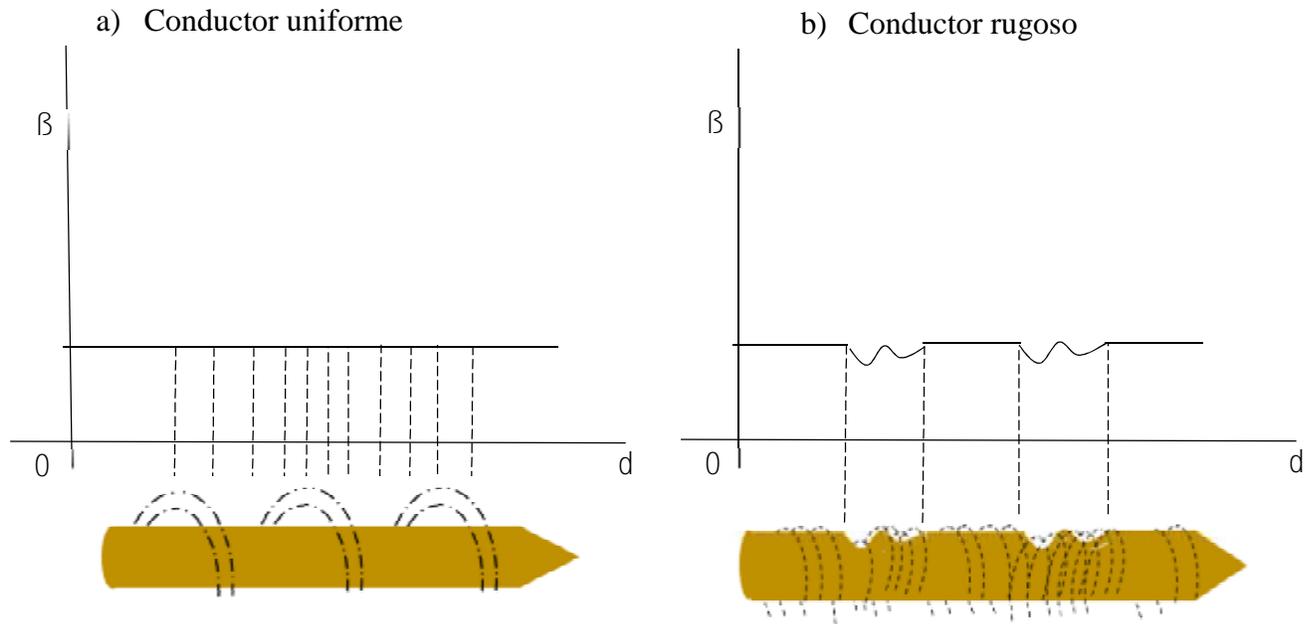


Figura 3.5: Grafica del campo magnético en el a) conductor uniforme b) conductor rugoso.

3.3. SENSORES O TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD.

3.3.1 MEDIDOR DE RUGOSIDAD PCE-RT 10.

El medidor de rugosidad en superficies PCE-RT 10 es un dispositivo pequeño, ligero con un manejo muy sencillo. A pesar de que el medidor de rugosidad en superficies funciona a un nivel muy complejo y elaborado, los resultados de medición se pueden obtener de una manera muy fácil gracias a su alta resistencia.

El medidor de rugosidad en superficie puede aplicarse en varios procesos de fabricación mecánica como equipo de control. El dispositivo indica todos los resultados de medición calculados en su pantalla LCD en cualquier momento.

Para medir la rugosidad de una superficie, el sensor debe colocarse en esa superficie. Posteriormente, el sensor toma muestras de manera uniforme en la superficie a lo largo de la guía. Posteriormente el medidor de rugosidad en superficies calculará los valores de medición. Los valores de medición se obtienen al desplazar el sensor, mientras se le induce corriente.



Figura 3.6: Medidor de rugosidad PCE-RT 10

3.3.2. RUGOSÍMETRO PCE-RT1200.

El rugosímetro sirve para determinar con rapidez la rugosidad en superficies o perforaciones. El rugosímetro muestra la profundidad de la rugosidad media Rz y el valor de rugosidad medio Ra en μm (el modelo PCE-RT1200 indica también Rq y Rt). El rugosímetro facilita la rápida determinación de la superficie de un componente.

La realización de la medición de la rugosidad es muy sencilla. El PCE-RT1200 ofrece la posibilidad de medir en perforaciones. También puede transferir los valores desde el rugosímetro a un PC.



Figura 3.7: Rugosímetro PCE-RT1200.

3.3.3. TÉCNICA DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD.

Para medir la rugosidad se realizan los siguientes pasos.

1. Medir perfil completo con una longitud de evaluación normalizada
2. Filtrar la señal para eliminar la ondulación
3. Establecer la línea media: línea que separa áreas iguales en los picos y en los valleys

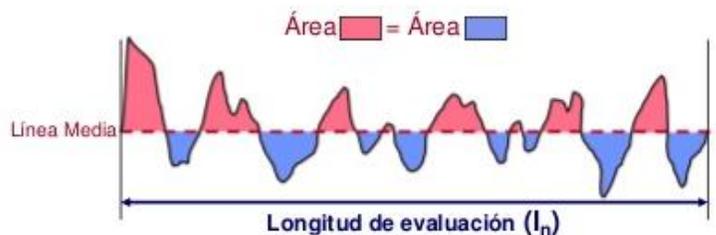


Figura 3.8: Grafica de la rugosidad superficial.

Puede darse el caso de que dos perfiles muy diferentes tengan la misma rugosidad media Ra:

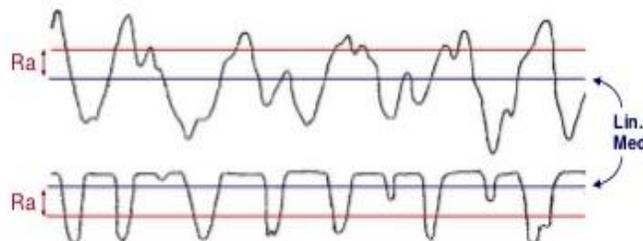


Figura 3.9: Perfiles con la mismo Ra, pero con un comportamiento al rozamiento muy diferente.

Se complementa la Ra con más parámetros:

Rp: Altura máxima de pico

Rv: Profundidad máxima de valle

Rs: Altura máxima pico – valle

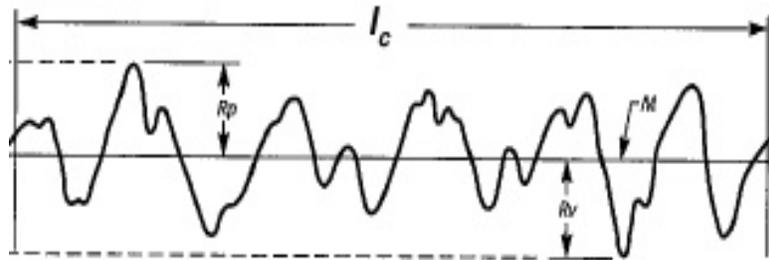


Figura 3.10: Parámetros de la rugosidad R_p , R_v Y R_s .

Como anteriormente mencionamos en el 4.3.1 y 4.3.2 la rugosidad se realiza con el rugosímetro. Este instrumento se compone de:

Aguja: se introduce entre los picos y valles. Es de diamante

Captador: registra los movimientos verticales de la aguja.

Patín: se apoya en la superficie y sirve de filtro mecánico. Son de rubí sintético

Motorización: empuja y arrastra la aguja sobre la superficie

Electrónica: registra los datos del captador, los procesa y obtiene los parámetros deseados

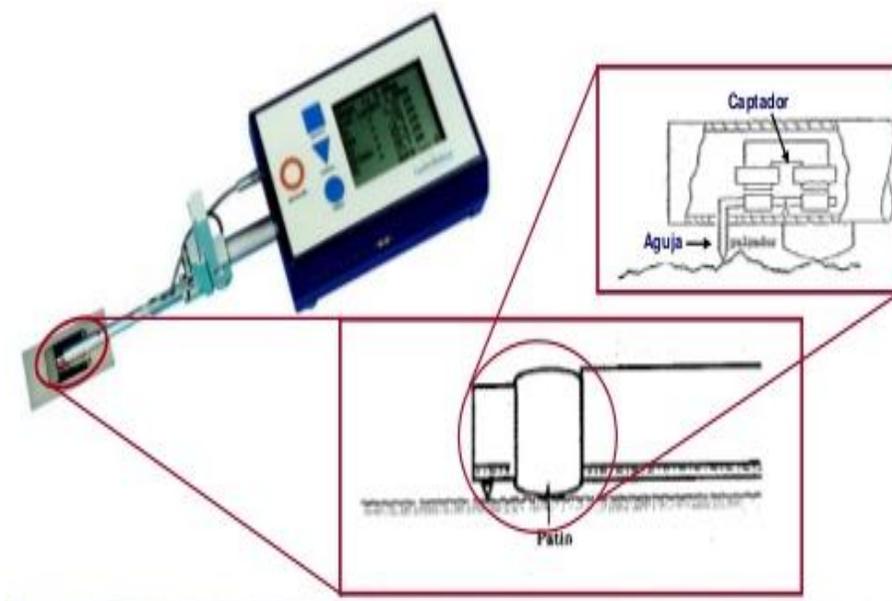


Figura 3.11: Medidor de rugosidad.

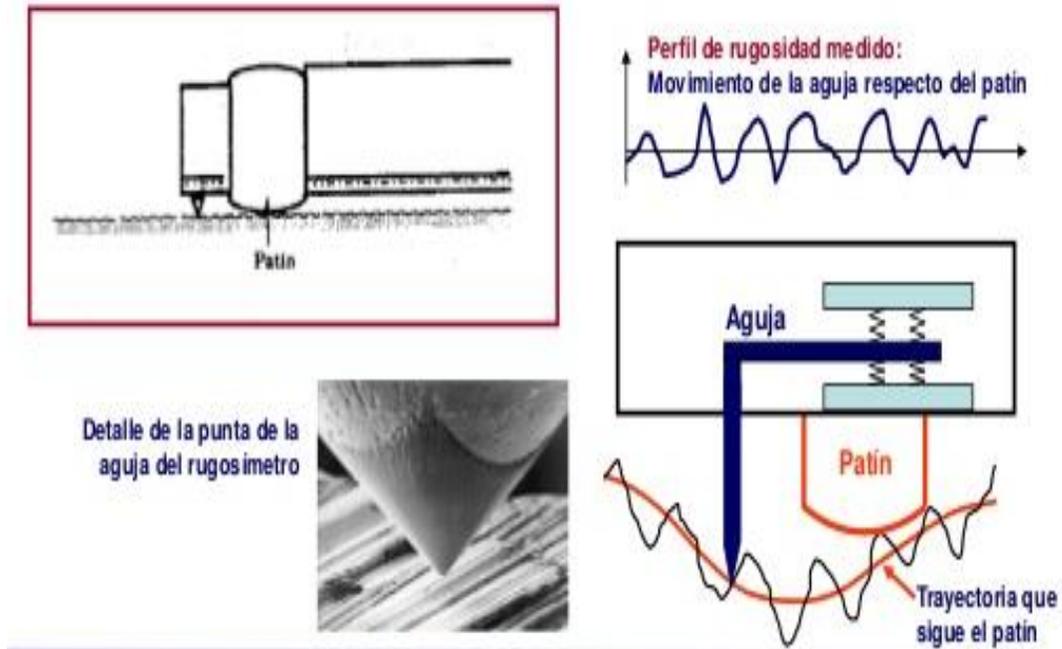


Figura 3.12 Perfil de rugosidad medido, la trayectoria que sigue el patín y detalle de la punta de la aguja del rugosímetro.

Capítulo

4

Medición electrónica de corrosión en electrodo de tierra para uso industrial

4.1. MEDICIÓN ELECTRÓNICA DE CORROSIÓN CON SENSOR MAGNETO-RESISTIVO (KMZ60), ARDUINO MEGA 2560 Y SOFTWARE ARDUINO 1.8.4.

En este capítulo se muestra el procedimiento para realizar un análisis a la medición electrónica de corrosión, ya que actualmente no se sabe el estado de la corrosión del electrodo y es importante saber el comportamiento de este.

Se llevó a cabo el estudio de la corrosión a través del sensor magneto-resistivo (kmz60) y el software Arduino 1.8.4 para obtener los resultados esperados, es seguro y confiable.

Ahora pasaremos a describir paso a paso la realización de la medición electrónica de corrosión en electrodo con dicho software y al último los resultados realizados en el mismo software.

Paso 1: Conocer el principio básico del funcionamiento, al cual se le inyecta una corriente eléctrica en dicho electrodo ya sea uniforme o rugoso, podremos visualizar el campo magnético y la corrosión como decíamos en el capítulo 4. En la (figura 4.1) vemos el principio básico del funcionamiento.

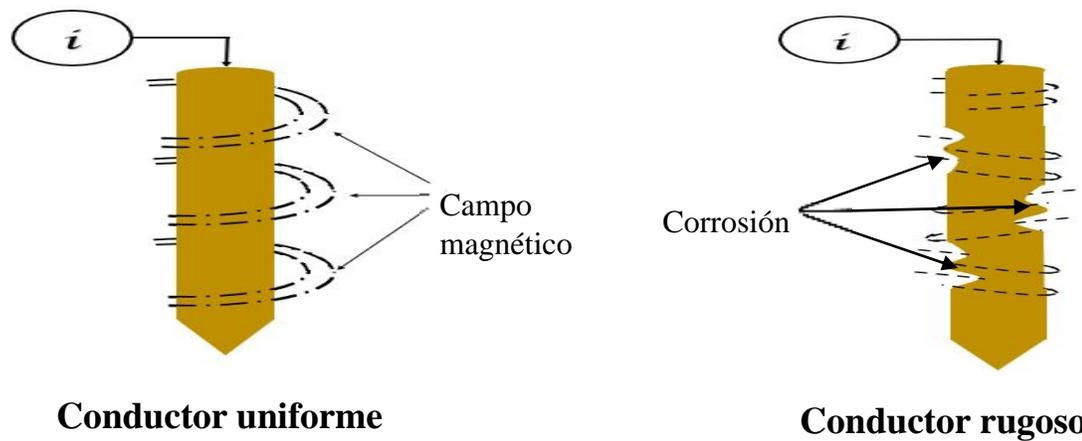


Figura 4.1: Principio del funcionamiento.

Paso 2: para poder ver que hay presencia de campo magnético en dicho electrodo, realizamos una fuente regulable de CD para inyectarle una corriente eléctrica al electrodo.

Donde primero mostramos el diseño del regulador con LM317 para la fuente de CD como se puede observar en la (figura 4.2).

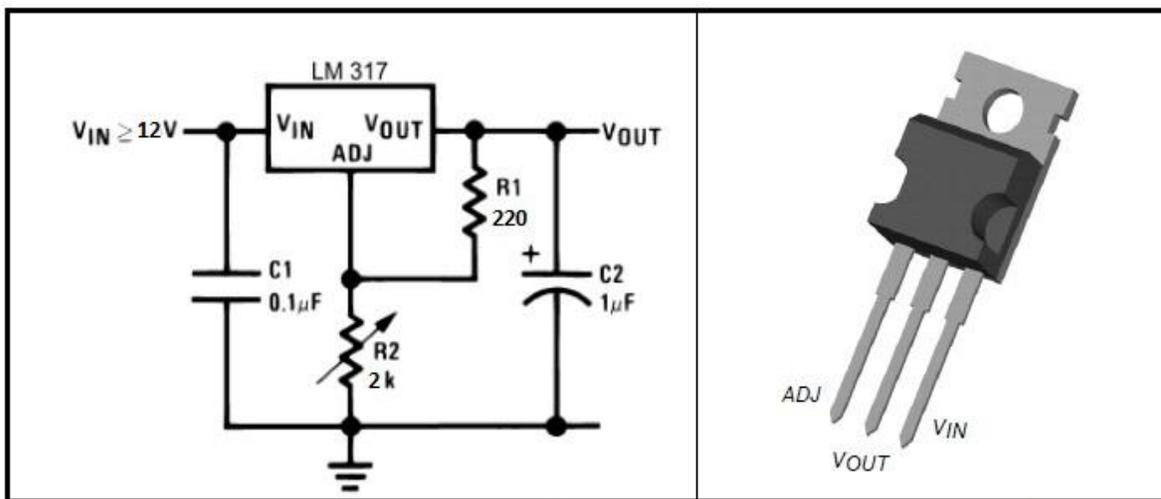


Figura 4.2: Diagrama del regulador con LM317.

Las resistencias R1 y R2 están calculadas para trabajar en el rango de tensión, de 1,25 a 37 v. Como en nuestro caso, como sólo vamos a llegar a unos 12 v, el potenciómetro R2 tendría una zona muerta en la cual, aunque giremos, no se producirá ninguna variación en la tensión de salida.

El integrado LM317 tendrá una tensión de 12 v con la cual vamos a trabajar para inyectar la corriente en electrodo, se mostrará la siguiente figura 4.3 del regulador con LM317 con sus componentes necesarios.

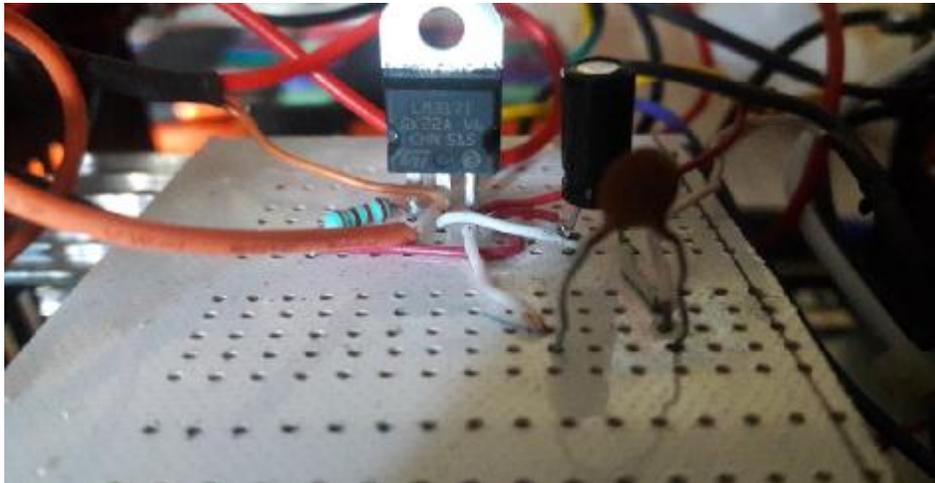


Figura 4.3: Componentes del regulador con LM317.

Una vez terminado el regulador procedimos implementarlo en una fuente ATX para hacerla regulable, se mostrará a continuación la fuente regulable terminada y lista para poderla hacer funcionar, (figura 4.4).

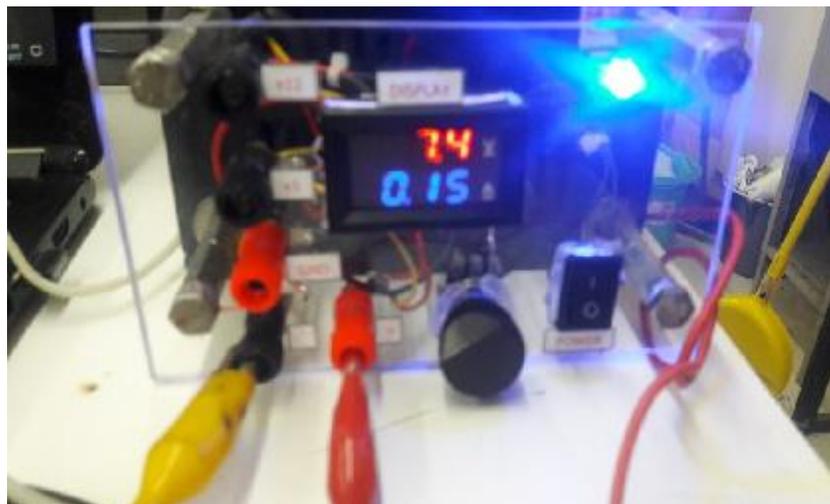


Figura 4.4: Fuente regulable de CD.

Paso 3. Sensor kmz60 (magneto-resistivo) Tenemos la fuente de CD, pero no es suficiente para poder obtener una gráfica de la corrosión del electrodo, así que analizamos y procedimos en investigación trabajar con un sensor que pueda dar la medición de campo magnético, el sensor magneto-resistivo se va a utilizar porque es ideal para detectar el campo magnético generado en el electrodo de tierra, para así mismo conocer el estado de la corrosión del electrodo. Ya que su aplicación está en medición del campo magnético terrestre nos facilitaría trabajar con él sensor.



Figura 4.5: Sensor magneto-resistivo (kmz60).

Es importante saber La Información de fijación KMZ60 y el diagrama de conexión antes de proceder a trabajar con el sensor. (figura 4.6, figura 5.7)

Pin	Symbol	Description	Simplified package outline
1	TCC_EN	Enable TC compensation	
2	VOUT1	Cosine channel output	
3	GND	Ground	
4	VOUT2	Sine channel output	
5	VTEMP	Temperature reference output	
6	GND	Ground	
7	V _{CC}	Supply voltage	
8	POWERDOWN_EN	Enable power-down mode	

Figura 4.6: Información del sensor kmz60

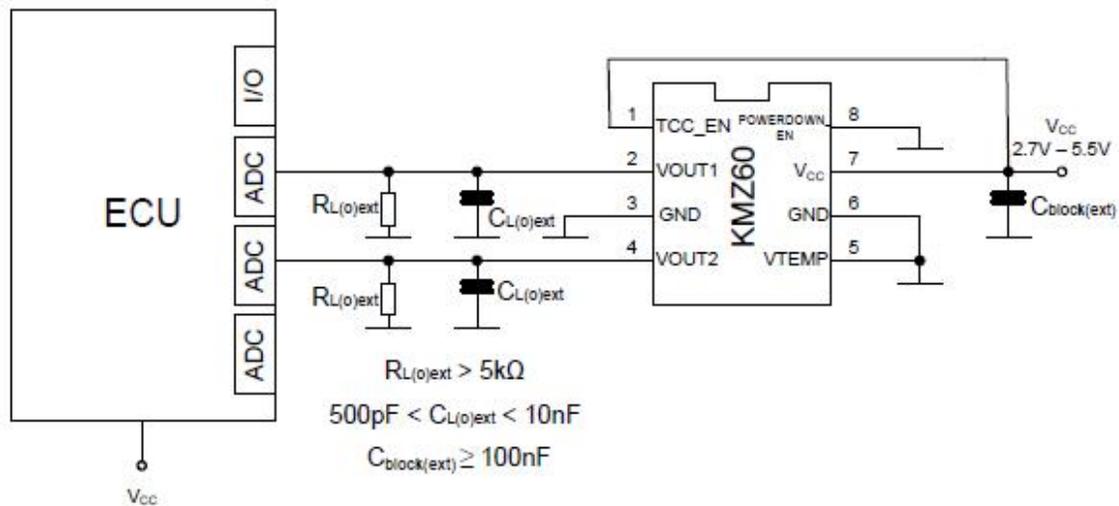


Figura 4.7: Diagrama de conexión sensor kmz60.

El diagrama de conexión lo implementamos a realizar en DIPTRACE versión 3.3.1 para armar el circuito y colocar el sensor que es muy pequeño. (figura 4.8, figura 4.9)

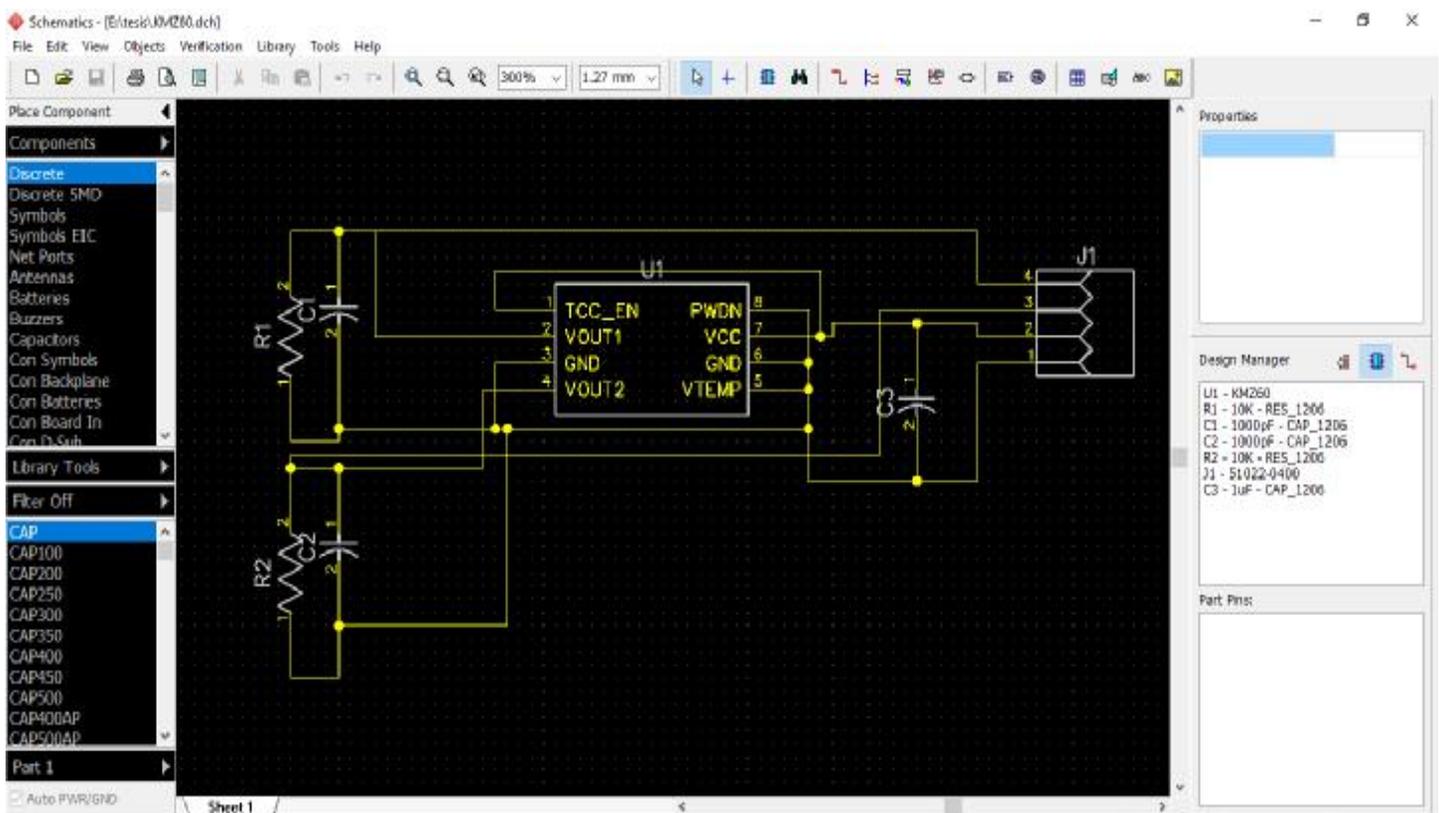


Figura 4.8 DIPTRACE elaboración del circuito kmz60.

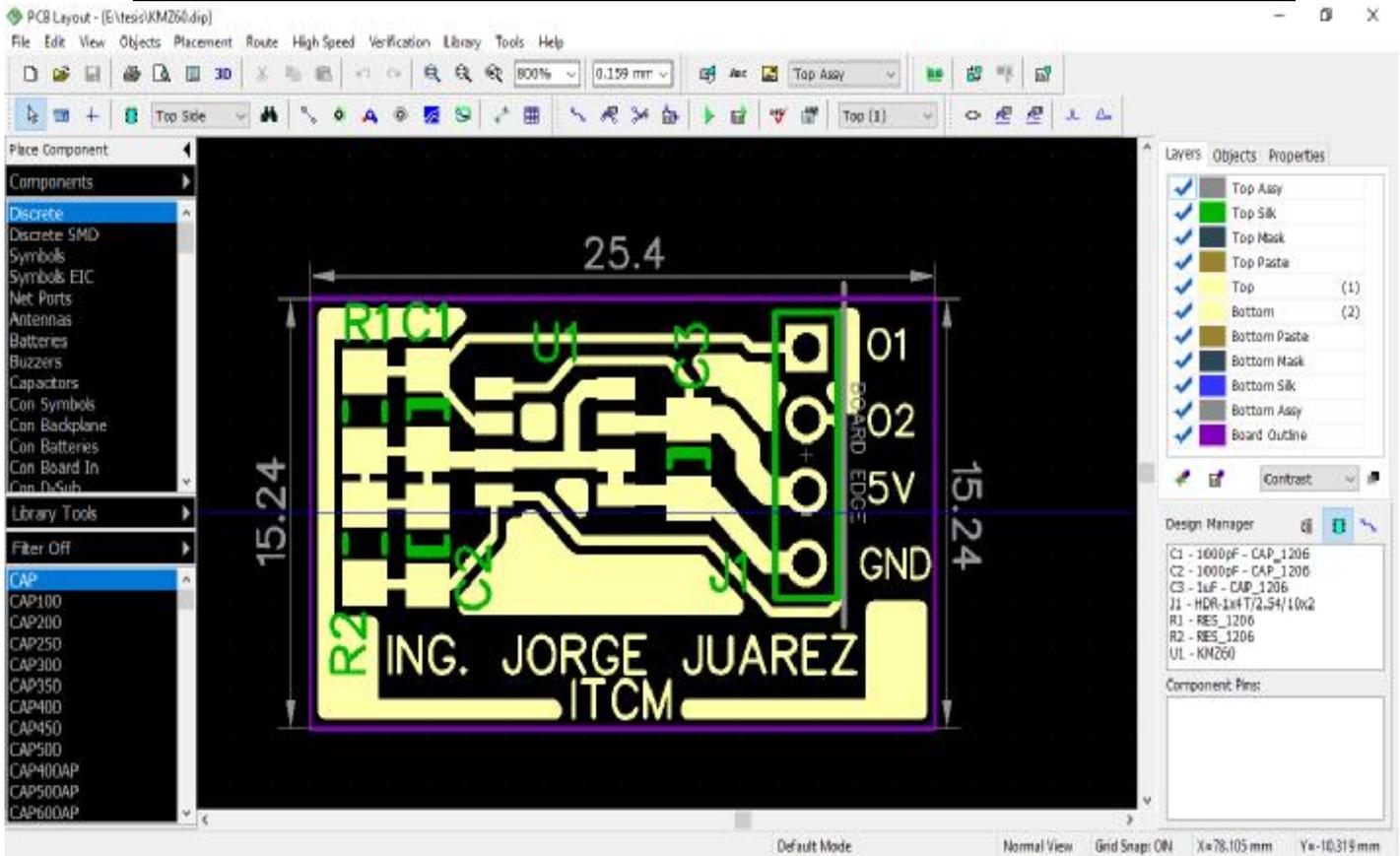


Figura 4.9: Diseño del PCB Kmz60.

Una vez que ya elaboramos el PCB del sensor procedimos a colocar el sensor y los componentes necesarios para trabajar con él (figura 4.10).



Figura 4.10: PCB KMZ60.

Paso 4. Para que funcione el sensor kmz60 trabajamos con otro elemento importante que es el Arduino MEGA 2560, Este nos ayudará a mandar señal al sensor con el software Arduino 1.8.4 (figura 4.11)

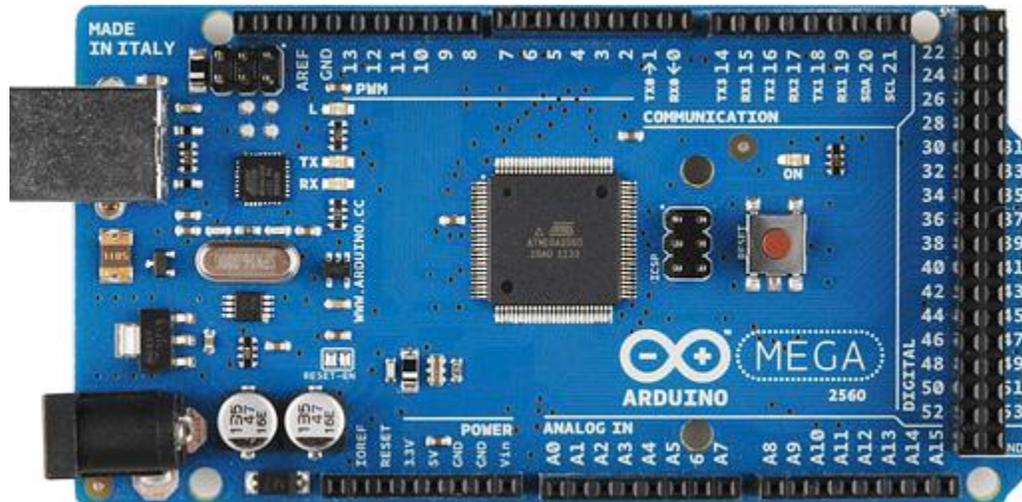


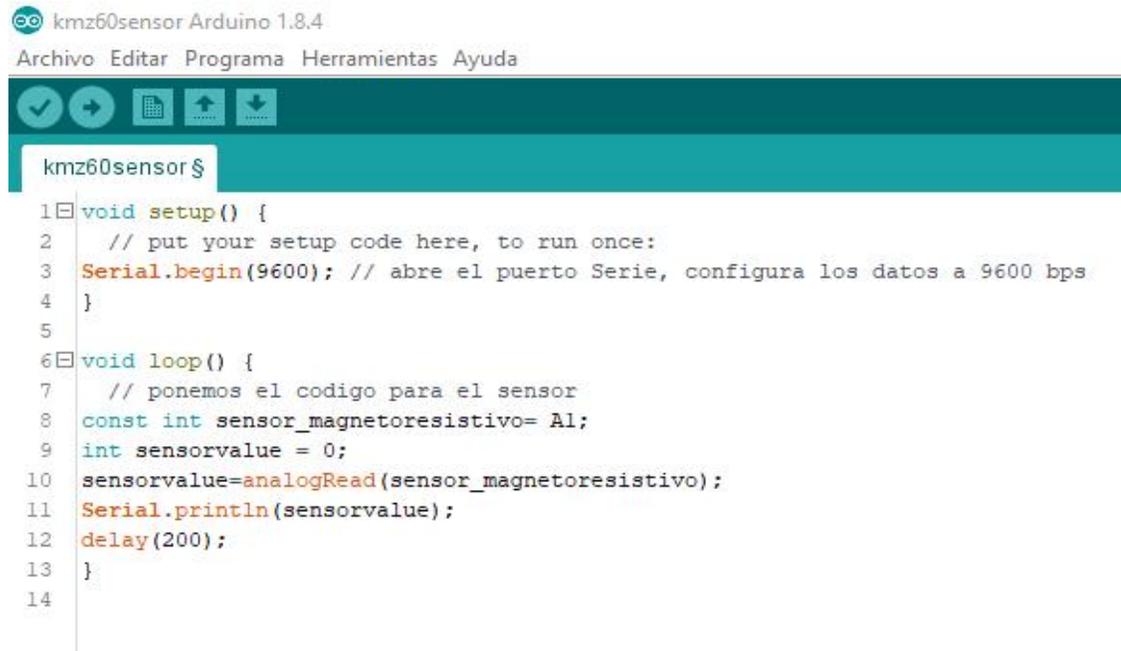
Figura 4.11: Placa Arduino MEGA 2560.

Como sabemos el Arduino es una plataforma para prototipos de electrónica basada en hardware y software libre y fácil de utilizar. Podemos construir circuitos electrónicos y programarlos con esta placa.

Realmente lo que estamos haciendo es programar un microcontrolador y las principales características que podemos encontrar en nuestra placa de Arduino MEGA 2560 son las siguientes:

- El microcontrolador es un circuito integrado programable capaz de realizar operaciones matemáticas complejas a gran velocidad.
- La alimentación de una placa de Arduino es mediante el puerto USB mientras se está programando. Una vez programado podemos desconectarlo del ordenador y que trabaje de forma autónoma y se alimenta Arduino mediante una fuente de alimentación o pila de 9V.
- Tanto las entradas como las salidas dotan al sistema de información y realizan diferentes actuaciones.

Paso 5. tenemos los elementos importantes para realizar una medición de campo magnético, PCB sensor kmz60 y la placa Arduino, por último, realizamos programación para hacer funcionar el sensor kmz60. Software Arduino 1.8.4 (figura 4.12).



```

kmz60sensor Arduino 1.8.4
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
kmz60sensor$
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3   Serial.begin(9600); // abre el puerto Serie, configura los datos a 9600 bps
4 }
5
6 void loop() {
7   // ponemos el codigo para el sensor
8   const int sensor_magnetoresistivo= A1;
9   int sensorvalue = 0;
10  sensorvalue=analogRead(sensor_magnetoresistivo);
11  Serial.println(sensorvalue);
12  delay(200);
13 }
14

```

Figura 4.12: Código Arduino para el sensor kmz60.

La declaración **Serial. Begin (9600)** Establece la velocidad de datos en bits por segundo (baudios) para la transmisión de datos en serie. Para comunicarse con el equipo.

Const int (valor entero constante) para que a la hora de graficar la medición sean valores enteros y no decimales.

Int sensorvalue (el valor del sensor es =0). Su valor en automático es 0.

Sensorvalue=analogRead (sensor_magnetoresistivo) o (A1) lo que hace el analogRead es leer el valor del pin analógico especificado en la placa Arduino MEGA 2560.

Esto significa que mapeará tensiones de entrada entre 0 y 5 voltios en valores enteros entre 0 y 1023. Esto produce una resolución entre las lecturas de: 5 voltios / 1024 unidades = 0.0049 voltios (4,9 mV) por unidad.

Serial.println (sensorvalue) Imprime datos al puerto serie

Delay (200) Hace una pausa en el programa durante el tiempo (en milisegundos) especificado como parámetro de retraso.

Para visualizar la gráfica de lo que sucede con el sensor kmz60 se puso a prueba con un imán para ver si el programa estaba correcto haciendo lo que se pide. A continuación, se muestra las figuras siguientes del programa con serial plotter el graficador Arduino nos vamos al menú herramientas después seleccionamos serial plotter.

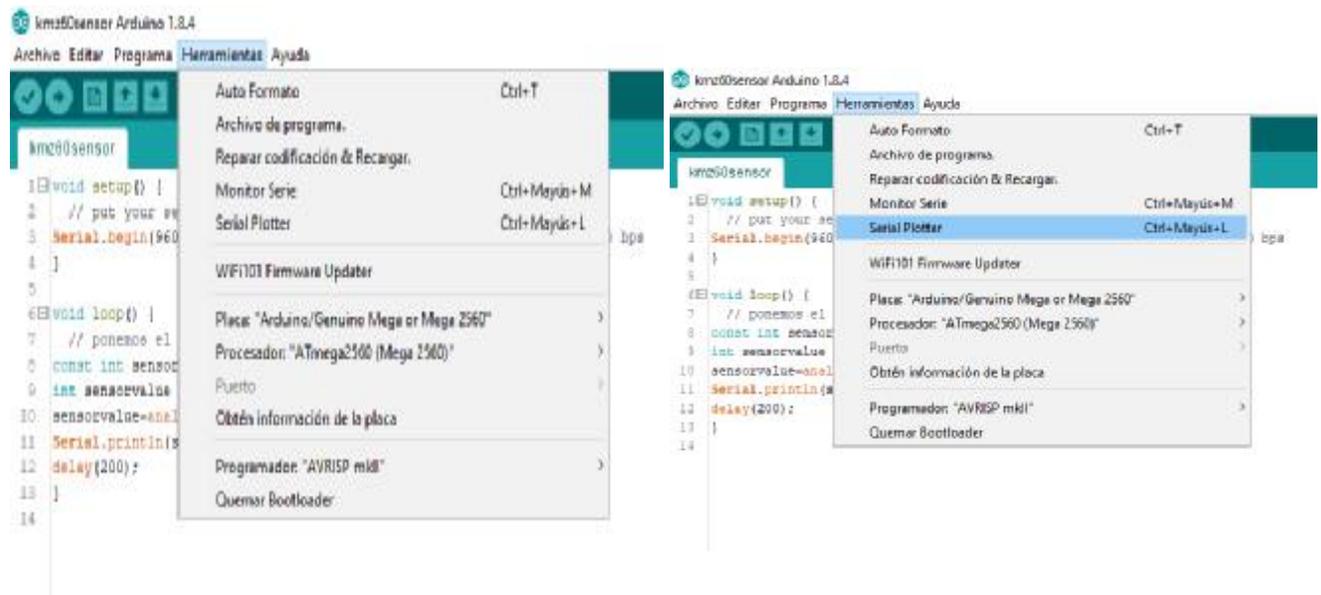


Figura 4.13: Selección serial plotter.

Una vez seleccionando el serial plotter visualizaremos lo que esta sucediendo con el sensor kmz60 (figura 4.14)



Figura 4.14: Grafica del sensor kmz60 al momento de pasar el imán varias veces.

Paso 6. tenemos todos los elementos para hacer la medición electrónica de corrosión en electrodo para uso industrial.

Antes de poner el prototipo a funcionar, procedimos al laboratorio hacer pruebas con electrodo de tierra 5/8” y con la fuente regulable de CD, posteriormente con un EMF SENSOR (sensor de campo electromagnético) visualizamos si realmente hay presencia de campo magnético. A continuación, se muestran las siguientes figuras de lo que sucedió con la fuente de CD.

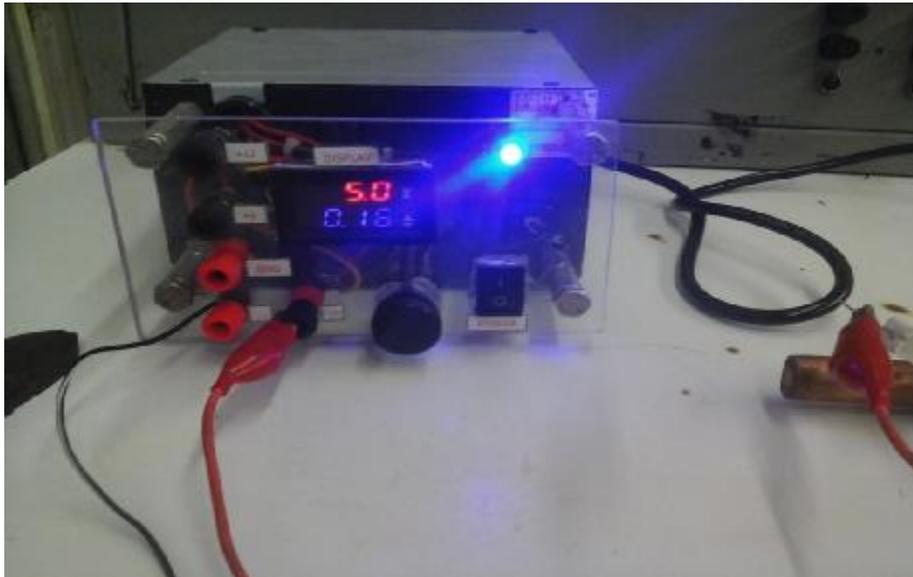


Figura 4.15: Fuente regulable inyectando voltaje de 5 volt y una corriente de 0.16 Amp.



Figura 4.16: Visualización de presencia de campo magnético con EMF SENSOR

Como vemos en las figuras anteriores nos podemos dar cuenta que con un voltaje de 5v y una corriente de 0.16 Amp, no hay presencia de campo magnético, y el EMF SENSOR nos marca 0.00 es la razón de no hay campo magnético.

Ahora se volvió a realizar otra prueba con la fuente regulable de CD, pero ahora con un voltaje de 10 v y una corriente de 0.40 v, llegando casi al límite de voltaje recordando que solo estamos manejando una fuente de 12v. pero nos da el mismo resultado no hay presencia de campo magnético.



Figura 4.17: Fuente regulable inyectando voltaje de 10 volt y una corriente de 0.40 Amp.



Figura 4.18: Observación de campo magnético con EMF SENSOR.

NOTA: con la fuente regulable de CD no logramos detectar la presencia de campo magnético por lo tanto el prototipo no funcionó.

Paso 7. Como podemos observar la fuente regulable de CD no nos funcionó, procedimos a investigar la manera de poder detectar el campo magnético en el electrodo de tierra.

De acuerdo con nuestra investigación se tomó la decisión de trabajar con la fuente variable de CA del laboratorio, a continuación, observaremos las siguientes figuras de las pruebas que se realizaron con la fuente variable de CA para detectar la presencia de campo magnético.



Figura 4.19: Fuente variable de CA.

Con la fuente de variable de CA, se puso un voltaje de 10 v y una corriente de 1.72 Amp. Para poder observar que sucedía con el electrodo, al electrodo se le colocó una pequeña bobina y realizamos la siguiente conexión, (figura 4.20)



Figura 4.20: Conexión de la fuente variable CA.

Una vez realizada la conexión de la fuente variable de CA, ya con el voltaje y la corriente inyectada podemos observar lo que realmente sucede con el electrodo de tierra, (figura 4.21)

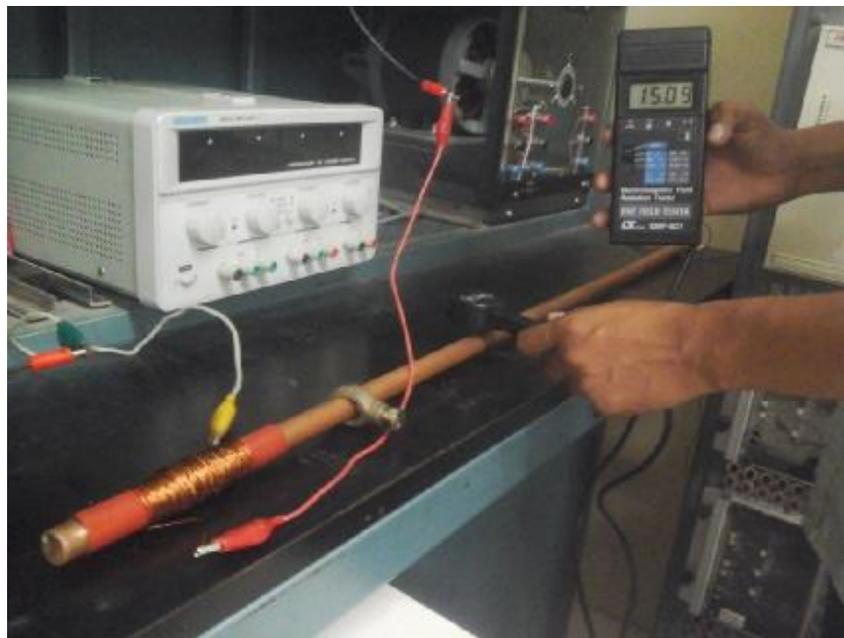


Figura 4.21: Detección de campo magnético en el electrodo de tierra.

Como podemos observar con la fuente variable de CA y una pequeña bobina si hay presencia de campo magnético y el EMF SENSOR detecta 15.09 micro tesla. Ahora requerimos conocer la distancia para saber desde que posición se puede visualizar campo magnético, se realizó poner una pluma, el valor de la pluma es de 15 cm. pusimos a prueba el EMF SENSOR distanciándolo del electrodo poco a poco para ver cuanto micro tesla detecta el sensor en las figuras observamos los resultados.

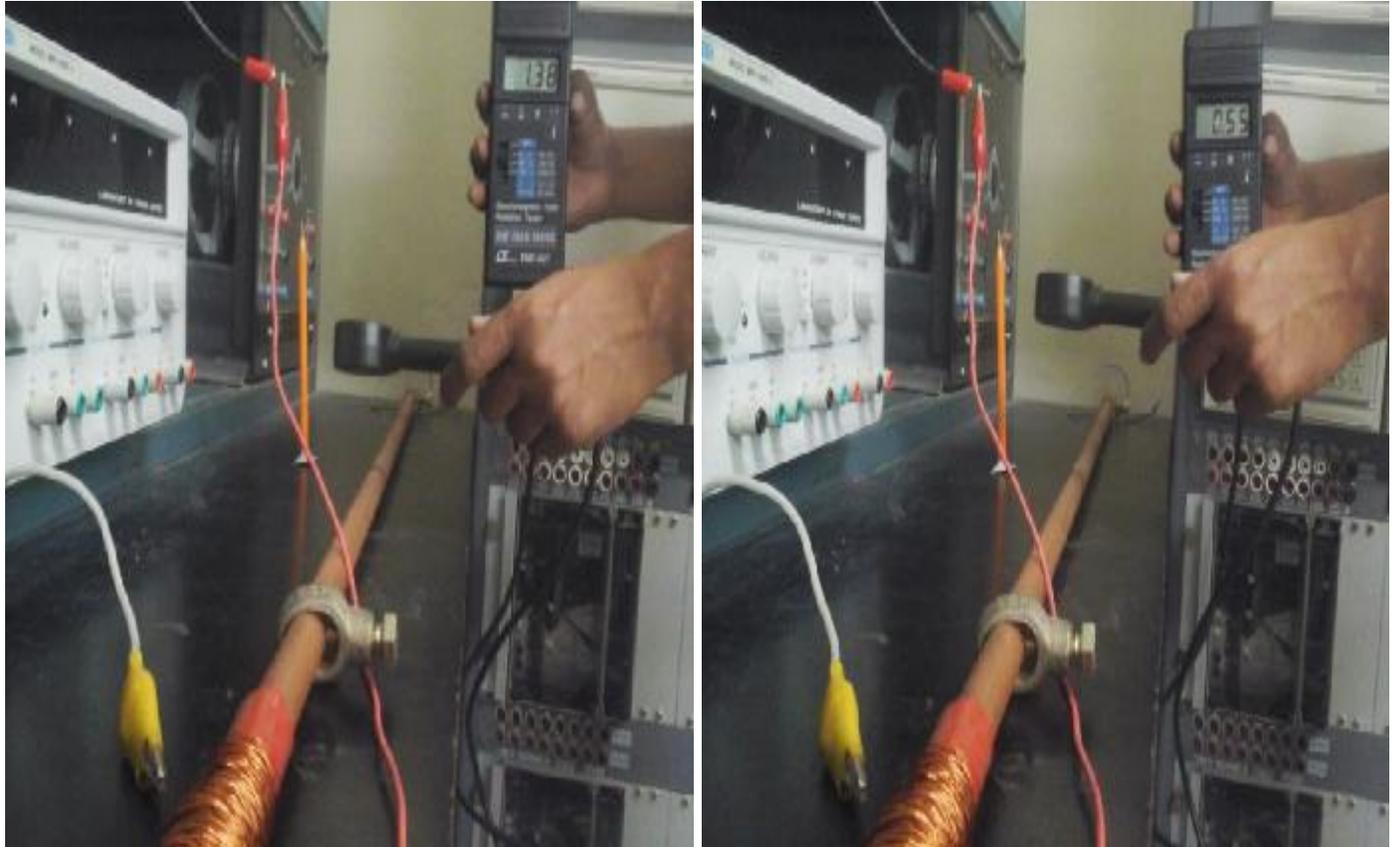


Figura 4.22: Medición de campo magnético a) lado izquierdo presencia de campo magnético 1.38 micro tesla con el EMF SENSOR a la mitad de la pluma 7.5 cm b) lado derecho presencia de campo magnético 0.55 micro tesla con EFM SENSOR a 10 cm.

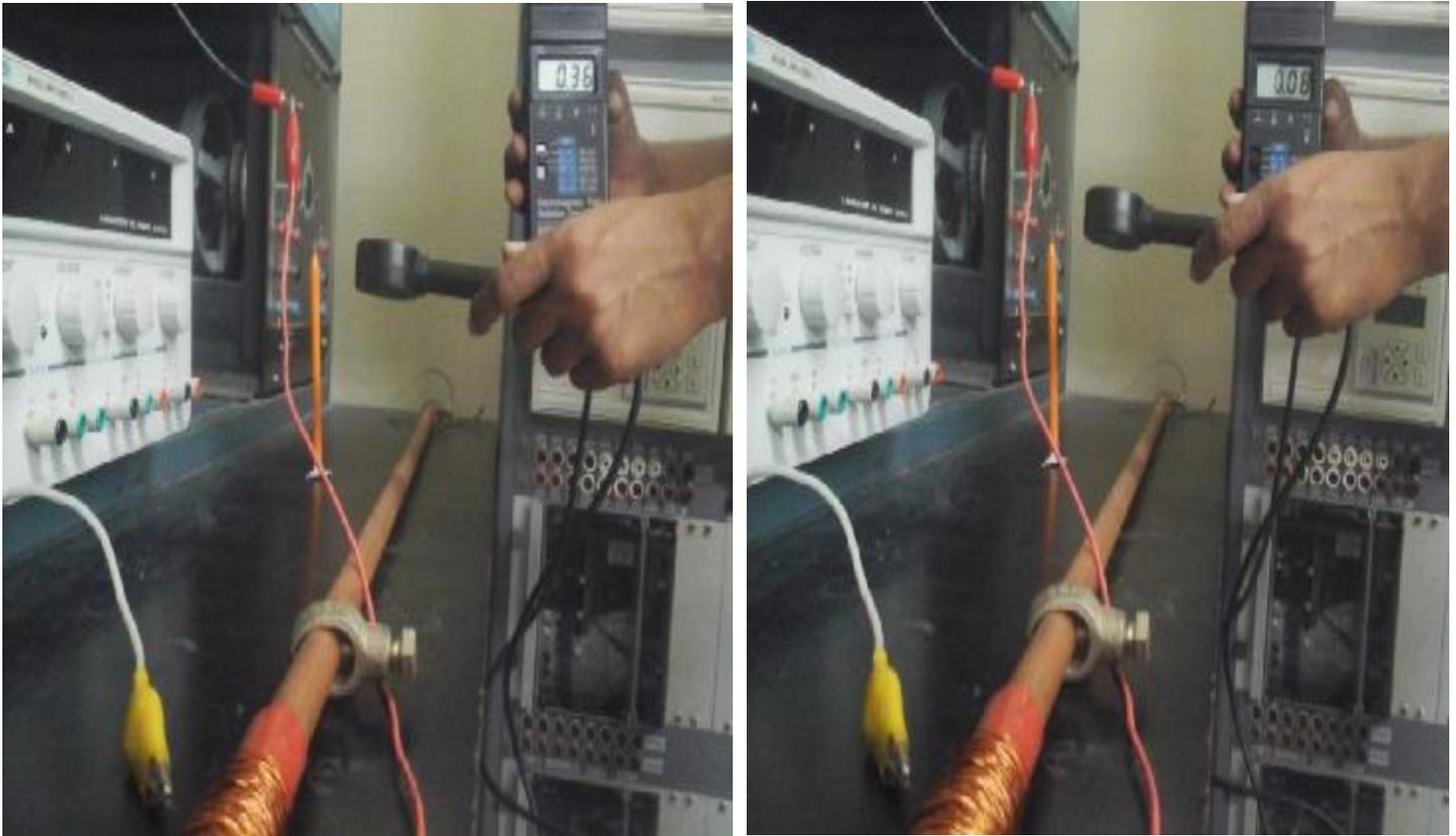


Figura 4.23 Medición de campo magnético a) lado izquierdo presencia de campo magnético 0.36 micro tesla con el EMF SENSOR 12 cm b) lado derecho presencia de campo magnético 0.08 micro tesla con EFM SENSOR a 15 cm.

Paso 8. Una vez que analizamos que funciona la medición del campo magnético con fuente variable de CA y la pequeña bobina procedemos hacer la verdadera medición electrónica de corrosión en electrodo de tierra, con los elementos antes mencionados que son el sensor magneto-resistivo (kmz60), la placa Arduino MEGA 2560 y la programación.

Conclusiones

5.1. CONCLUSIONES.

En este proyecto se llevó a cabo el diseño del sensor kmz60 y la programación en software Arduino 1.8.4 para poder realizar la medición electrónica de corrosión en electrodo de tierra, sabemos que las industrias, subestaciones, líneas de transmisión, centrales de generación, requieren de una buena protección de sistema de tierra, pero no ha asegurado el 100 % de protección, porque realmente no se sabe el comportamiento del mismo electrodo de tierra. La NOM-001-SEDE-2012 nos indica sobre todas las reglas de protección para descargas atmosféricas y fallas eléctricas.

Realizando el proyecto la Fuente regulable de CD no nos funcionó, por lo que tuvimos que buscar la manera de llevar a cabo el proyecto, decidimos trabajar con la fuente variable de CA que realmente sí nos funcionó para detectar el estudio del campo magnético en el electrodo de tierra.

Podemos observar las pruebas finales con la fuente variable de CA y los elementos importantes para realizar la medición, sensor kmz60, la placa Arduino MEGA2560 y el programa Arduino 1.8.4 en el electrodo de tierra. Se ve claramente los resultados de la medición, fue un éxito, es confiable y seguro para poder hacer mediciones en futuro.

5.2. REFERENCIAS.

- [1] IEEE STD 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [2] [http://www.maintprog.com.co/wpcontent/uploads/2014/11/Corrosion de Electrodo de _puesta_a_tierra.pdf](http://www.maintprog.com.co/wpcontent/uploads/2014/11/Corrosion_de_Electrodos_de_puesta_a_tierra.pdf)
- [3] <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>
- [4] <https://constructorelectrico.com/peligro-latente-descargas-atmosfericas/>
- [5] <https://www.erico.com/catalog/literature/E660S-LASP.pdf>
- [6] <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/28665/htm>
- [7] (IEEE) Influence of climatic conditions on corrosion of earth electrodes for lightning protection. Authors: Robert Marciniak, Marek Loboda
- [8] (IEEE) Exchange-Biased Anisotropic Magnetoresistive Field Sensor. Authors: Yue Guo; Yong Ouyang; Noriyuki Sato; Chin Chun Ooi; Shan X. Wang
- [9] (IEEE) *Cross-Field Effect in a Triaxial AMR Magnetometer With Vector and Individual Compensation of a Measured Magnetic Field.* Authors: Vojtěch Petrucha; Viktor Fúra; Antonín Platil
- [10] (IEEE) Natural materials as grounding filler for lightning protection system Authors: J. Jasni; L. K. Siow; M. Z. A Ab Kadir; W. F Wan Ahmad
- [11] (IEEE) Performance of Earthing Systems for Different Earth Electrode Configurations. Authors: Mohamed Shahrman Mohamed Yunus; Normiza Mohamad Nor; Nkwa Agbor Etobi; K. Ramar
- [12] (IEEE) Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large área. Authors: G.F. Tagg
- [13] NOM-001-SEDE-2012 Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas.
- [14] KMZ60 Application Note.pdf
- [15] Rugosidad Superficial.pdf

[16] NOM-002-STPS-2015

[17] NEC 250.56 resistencia a tierra

[18] Norma Mexicana NMX-J-549-ANCE-2005 diseño e instalación del sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas.