



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DEL NEUTRO EN EL SUMINISTRO
ELÉCTRICO EN REDES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA:

SALUD JACINTO HIPÓLITO

ASESOR:

M.C. JOSÉ ALBERTO ÁVALOS GONZÁLEZ

MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO DE 2016.



AGRADECIMIENTOS

A mi padre Gilberto+ y mi madre María Luz:

A mi madre que a pesar de las adversidades y preocupaciones ha seguido apoyándome y brindándome la oportunidad de estudiar estando siempre como madre y padre.

A mi padre que también siempre procuro no me faltara nada y que su recuerdo sigue siendo motivo de esfuerzo.

A mis hermanas Araceli, Nancy y Jenny:

Araceli que desde mi infancia cuido de mí y mis hermanas, siendo un pilar importante en mi etapa de crecimiento y que continúa aconsejándome de lo bueno y lo malo.

Nancy y Jenny con las que he compartido la mayor parte de mis travesuras, alegrías y tristezas estando siempre en las buenas y en las malas a mi lado.

A mis hermanos Alejandro y Gilberto:

Que se han preocupado y me han corregido cuando comenzaba a tropezar.

A Giovanni por sus consejos y ayuda, el cual sigue estando en las buenas y malas a mi lado.

A mis maestros por ser el árbol de mis conocimientos.

A mi memorable Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pero en especial a la Facultad de Ingeniería Eléctrica por abrir sus puertas de un nuevo saber y formación.

A mi asesor, por su tiempo, consejos, ayuda y comprensión para la realización y culminación de mi tesis.

A mis compañeros, compañeras, amigos y amigas de la Facultad que hicieron más fácil y más ameno mis años de estudio.

DEDICATORIA

A mi madre que gracias a su apoyo y esfuerzo he logrado culminar una parte esencial de mi formación académica, a mis hermanos y hermanas que me han brindado su apoyo.

A mi escuela que fue la base de unos de mis mayores saberes, a mis profesores, compañeros y amigos, en especial a mi gran compañero Giovanni.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	<i>ii</i>
DEDICATORIA	<i>iii</i>
LISTADO DE FIGURAS	<i>viii</i>
LISTADO DE TABLAS	<i>xi</i>
RESUMEN	<i>xiii</i>
ABSTRACT	<i>xiv</i>

CAPITULO 1. Introducción

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Metodología.....	4

CAPITULO 2. Conceptos y descripciones de elementos para el análisis de la falta de neutro corrido

2.1 Elementos de un sistema de distribución.....	7
2.1.1 Transformador.....	7
2.1.1.1 Transformador tipo poste.....	9
2.1.1.2 Transformador tipo pedestal.....	12
2.1.2 Conexión de transformadores.....	14
2.1.3 Conductores eléctricos.....	20
2.1.3.1 Selección del material para conductores.....	20
2.1.3.2 Serie galvánica.....	22

2.1.3.3 Materiales.....	23
2.1.3.4 Tensiones inducidas en las pantallas metálicas de cables subterráneos.....	25
2.1.3.5 Conexión a tierra de cables subterráneos.....	26
2.1.4 Sistemas de tierra.....	28
2.1.4.1 Generalidades.....	29
2.1.4.2 Mejoramiento al sistema de tierra.....	30
2.2 Clasificación de las cargas.....	34
2.2.1 Conexión de cargas trifásicas.....	35
2.3 Ferorresonancia.....	38
2.4 Definiciones.....	40

CAPITULO 3. Modelos de representación de falta de neutro corrido

3.1 Tratamiento del neutro.....	45
3.2 Puesta a tierra de los neutros de baja tensión.....	46
3.2.1 Neutro rígido a tierra.....	47
3.2.2 Neutro aislado.....	51
3.2.3 Neutro conectado a través de una impedancia.....	53

CAPITULO 4. Pruebas y resultados

4.1 Análisis matemático.....	58
4.1.1 Con neutro de la carga al neutro del transformador.....	65

4.1.2 Corriente del neutro.....	68
4.2 Pruebas del método matemático.....	70
4.2.1 Prueba con neutro aislado.....	72
4.2.2 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra.....	73
4.2.3 Prueba con neutro a través de una impedancia.....	74
4.2.4 Prueba con neutro sólidamente aterrizado a tierra con un valor alto de tierra.....	82
4.3 Simulaciones.....	84
4.3.1 Prueba con neutro aislado.....	86
4.3.2 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra.....	87
4.3.2.1 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra con falso contacto.....	89
4.3.3 Prueba con neutro a través de una impedancia.....	91
4.3.3.1 Prueba con neutro a través de una impedancia con falso contacto....	93
4.4 Pruebas de laboratorio.....	97
4.4.1 Prueba con neutro aislado.....	98
4.4.2 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra.....	99
4.4.2.1 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra con falso contacto.....	100
4.4.3 Prueba con neutro a través de una impedancia.....	101
4.4.3.1 Prueba con neutro a través de una impedancia con falso Contacto.....	107

CAPITULO 5. Conclusiones y trabajo Futuro

5.1 Conclusiones.....111

5.2 Trabajo Futuro.....114

REFERENCIAS.....115

APÉNDICES

A. Símbolos y abreviaciones correspondientes al Capítulo 4.....117

LISTADO DE FIGURAS

2.1	Diagrama elemental de un transformador.....	7
2.2	Transformador tipo poste.....	10
2.3	Acometida monofásica.....	11
2.4	Transformador de tipo pedestal.....	12
2.5	Conexión estrella-estrella.....	14
2.6	Transformador estrella-estrella con cargas conectadas en estrella y en delta y con cargas monofásicas.....	15
2.7	Transformador delta-delta con cargas conectadas en estrella y en delta.....	17
2.8	Transformación estrella-delta.....	18
2.9	Transformación delta-estrella.....	19
2.10	Ejemplo Δ -Y con transformadores monofásicos.....	20
2.11	Tensión inducida entre dos conductores paralelos.....	26
2.12	Tensión inducida en la pantalla metálica de un cable para media tensión.....	26
2.13	Pantalla aterrizada en un punto.....	27
2.14	Pantalla aterrizada en dos o más puntos.....	27
2.15	Sistema de tierra con contra antena.....	31
2.16	Sistema de tierra con bentonita.....	32
2.17	Sistema de tierra con electrodos.....	33
2.18	Sistema de tierra con contra antena, bentonita y electrodo.....	34

2.19	Sistema trifásico balanceado Y-Y con retorno por tierra.....	37
3.1	Diagrama esquemático de una bajante de tierra para equipo.....	46
3.2	Conexión de la bajante de tierra al neutro.....	47
3.3	Sistema con electrodo separado de la empresa suministradora y el usuario.....	48
3.4	Neutro rígido.....	50
3.5	Neutro Aislado.....	52
3.6	Neutro a través de una impedancia.....	54
4.1	Conexión estrella.....	58
4.2	Conexión estrella con sus magnitudes.....	59
4.3	Diagrama fasorial de conexión estrella.....	59
4.4	Línea trifásica de distribución de tres hilos.....	62
4.5	Línea trifásica de distribución de cuatro hilos.....	66
4.6	Esquema para el análisis de neutro aislado en PSpice.....	84
4.7	Esquema para el análisis de neutro sólidamente a tierra en PSpice.....	85
4.8	Esquema para el análisis de neutro a través de una impedancia en PSpice.....	85
4.9	Respuesta en PSpice con carga de 80Ω en R_c y neutro aislado.....	86
4.10	Respuesta en PSpice con carga de 21.8Ω en R_c y neutro aislado.....	86
4.11	Respuesta en PSpice con cargas balanceadas y neutro sólidamente a tierra.....	87
4.12	Respuesta en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y sólidamente a tierra.....	88

4.13	Esquema en PSpice con carga de neutro conectado sólidamente a tierra con $R_c=80\Omega$	89
4.14	Respuesta en PSpice con carga de 80Ω en R_c y sólidamente a tierra.....	89
4.15	Respuesta en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y sólidamente a tierra.....	90
4.16	Respuesta en PSpice con carga de 80Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω	92
4.17	Respuesta en PSpice con carga de 12.8Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 120Ω	92
4.18	Esquema en PSpice con carga de 80Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω	93
4.19	Respuesta en PSpice con carga de 80Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω	93
4.20	Esquema en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 21.8Ω	94
4.21	Respuesta en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 21.8Ω	94
4.22	Equipo para prueba de laboratorio.....	97
4.23	Falso contacto en laboratorio.....	100

LISTADO DE TABLAS

2.1	Conductividades eléctricas a temperatura ambiente para ocho metales y aleaciones comunes.....	21
2.2	La serie Galvánica.....	23
2.3	Conexión de fuente y carga.....	36
3.1	Comparativa de esquemas de neutro.....	56
4.1	Valores de voltaje a utilizar en su forma compleja y fasor.....	70
4.2	Valor de impedancia y admitancia.....	71
4.3	Valor de impedancia y admitancia de prueba con neutro a través de una impedancia.....	75
4.4	Resultados de simulación en PSpice con neutro aislado.....	86
4.5	Resultados de simulación en PSpice con neutro sólidamente a tierra.....	87
4.6	Resultados de simulación en PSpice con neutro sólidamente a tierra con falso contacto.....	90
4.7	Resultados de simulación en PSpice con neutro a través de una impedancia.....	91
4.8	Resultados de simulación en PSpice con neutro a través de una impedancia con falso contacto.....	95
4.9	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro aislado.....	98

4.10	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro aterrizado sólidamente a tierra.....	99
4.11	Resultados de prueba de laboratorio con neutro sólidamente a tierra con falso contacto.....	101
4.12	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=12.63\Omega$	102
4.13	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=21.8\Omega$	102
4.14	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=30\Omega$	103
4.15	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=60\Omega$	103
4.16	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=80\Omega$	104
4.17	Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=120\Omega$	104
4.18	Comparación del método matemático, prueba de laboratorio y simulación en PSpice con neutro aislado y sólidamente a tierra.....	105
4.19	Comparación del método matemático, prueba de laboratorio y simulación en PSpice con neutro a través de una impedancia.....	106
4.20	Resultados de prueba de laboratorio con neutro a través de una impedancia con falso contacto.....	107
4.21	Comparación con falso contacto en prueba de laboratorio con neutro sólidamente a tierra y a través de una impedancia.....	109

RESUMEN

En nuestro país la pérdida del neutro por hurto ha ido en aumento desde hace más de diez años, debido a esta cuestión, se presentan problemas en el sistema de distribución. Es en el suministro donde se presenta la pérdida del neutro ya que es más fácil robarlo.

En este trabajo de tesis se busca el análisis de sistemas de distribución, específicamente en la conexión del neutro. La conexión al neutro puede ser de forma aislada, aterrizado rígidamente y aterrizado mediante impedancia de bajo o alto valor.

Se ven además los elementos de sistemas de distribución, tales como: el transformador y técnicas para el mejoramiento de un sistema de tierra y conductores. Con lo anterior se pueden determinar las características que hacen aconsejable a cada uno en el sistema de distribución.

Se presentan tres formas de análisis de resultados; por medio de un método matemático, simulación en PSpice y pruebas de laboratorio. En los mismos se verá la forma más factible de implementar el neutro y lo que pasa al aplicar un falso contacto de tierra al sistema, siendo este último también de vital importancia pues, aparte del robo de cable y luminarias, también el hecho de la existencia de problemas ambientales puede provocar un falso contacto, ocasionándose así un mal funcionamiento de la red. Concluyendo, los resultados mostrarán como un sistema aterrizado y de bajo valor siempre será más confiable.

Palabras clave:

Neutro

Aterrizamiento

Desbalance

Distribución

Cargas

ABSTRACT

In our country the loss of neutral for theft has been increasing more than ten years ago, because of this issue, problems occur in the distribution system. It is in the supply where the loss of the neutral is presented because it is easier to steal.

In this thesis work the analysis of distribution systems is sought, specifically at the neutral connection. The neutral connection may be in isolation, rigidly landed and landed by low or high impedance value.

Additionally, are seen the elements of distribution systems, such as: transformer and techniques for improving a ground system and conductors. With the above can determined the characteristics that make it advisable to each in the distribution system.

Three forms of analysis results are presented; by means of a mathematical method, PSpice simulation and laboratory tests. In the same will be seen the most workable way to implement the neutral and what happens when applying a false ground contact to the system, being the latter also vitally important because, apart from cable and luminaries' theft, also the fact of existence environmental problems may cause a false contact, causing a malfunction of the network. In conclusion, the results will show as a grounded and low value system will always be more reliable.

CAPITULO 1

Introducción

1.1 Antecedentes

En nuestro país, la transmisión de energía eléctrica se realiza en niveles de tensión de 69KV, 115 KV y 400 KV por medio de líneas de transmisión trifásicas con solo tres conductores de fase, por su parte la distribución de la energía se realiza por medio de líneas de media tensión con niveles de voltaje que van de 34.5KV, 23 KV y 13.8 KV, en este caso se construyen redes con solo tres conductores de fase o bien redes con neutro corrido que involucra cuatro conductores formados por tres fases y el conductor de neutro.

La baja tensión se utiliza para la electrificación urbana y rural, los niveles de voltaje utilizados son de 220 y 127 V, este último es de voltaje monofásico y se utiliza para el suministro eléctrico de los usuarios que utilizan la energía eléctrica para fines domésticos, estos voltajes son obtenidos por medio del secundario del transformador. Para el uso industrial la tensión eléctrica utilizada es de 480 y 277V.

Las cargas monofásicas se alimentan desde los secundarios de baja tensión de los transformadores de distribución, los primarios son conectados al sistema trifásico de distribución en la red de media tensión de manera que las cargas monofásicas son distribuidas entre las fases del sistema trifásico, de esta manera se tiene una carga trifásica aproximadamente equilibrada, es decir, se distribuye la carga por igual entre las fases procurando que las intensidades de las fases se encuentren equilibradas en todo momento.

El funcionamiento desequilibrado de la red eléctrica produce principalmente desbalances en los voltajes alimentados a las cargas, con la consecuente operación

incorrecta de cargas que involucran primordialmente motores, adicionalmente se generan mayores pérdidas de potencia en los conductores de la instalación.

El devanado secundario del transformador por lo regular se conecta en estrella, por lo tanto cuando se pierde el conductor de neutro corrido o los sistemas de tierra, ya sea por condiciones de desgaste o hurto, se producen problemas colaterales, como sobretensiones que ponen en riesgo tanto a los equipos de los usuarios, como a los usuarios mismos, esto debido a los desbalances de cargas.

Este problema se acentúa en instalaciones eléctricas de redes subterráneas de media tensión, pero tiene también un gran impacto en redes aéreas de media tensión.

El hurto del conductor neutro además de reducir la confiabilidad del sistema, genera también pérdidas económicas. En Morelia Michoacán por ejemplo se ha hecho más notorio el robo a partir del 2005 donde se calcula fueron robados unos 20 kilómetros de conductor, hecho que representó una pérdida económica por el orden de los 400 mil pesos. En el 2006 se presentó el robo de más de 14 kilómetros de conductor con una pérdida económica de los 300 mil pesos. En 2012 el hurto llegó hasta un millón 300 mil pesos con el robo de luminarias y cable [17].

El análisis de los diversos modelos, normas y estándares de conexión del neutro y la falta de éste, proporciona un amplio panorama de los peligros a los usuarios, así como el identificar posibles alternativas que minimicen el efecto de esta pérdida de neutro corrido en las instalaciones eléctricas para el suministro eléctrico.

1.2 Objetivo

Analizar el problema ocasionado por la pérdida del conductor de neutro corrido en el suministro de energía eléctrica, tanto aéreo como subterráneo de la red eléctrica de distribución de media y baja tensión de la Comisión Federal de Electricidad-División Centro Occidente (CFE-DCO).

1.3 Justificación

El suministro de energía eléctrica debe ser de buena calidad, medida ésta en función de la frecuencia y la magnitud de voltaje entregada a los usuarios, además de garantizar continuidad y seguridad de servicio la mayor cantidad de tiempo posible. Sin embargo, el conductor neutro en un sistema de suministro muchas veces es robado debido a que es de cobre o aluminio, ambos materiales con alto valor de reventa en el mercado negro, provocando sobretensiones que pueden ser peligrosas para los usuarios, además de la posibilidad de un mal funcionamiento de la red eléctrica debido a la pérdida del punto de aterrizamiento de los transformadores que alimentan a los clientes.

El conductor neutro es más fácil de robar debido a que este conductor se encuentra al mismo potencial de tierra por lo que no representa un gran peligro para quien intente robarlo, sin embargo cuando el conductor de neutro conduce corrientes altas, al momento de cortarlo para su hurto, produce descargas eléctricas peligrosas para quienes realizan esta actividad. Por su parte, el robo de los conductores de fase es menos frecuente debido al peligro que la alta o media tensión representa, ya que puede provocar la electrocución de la persona debido a la corriente circularía por el cuerpo de esta, provocándole quemaduras o incluso la muerte.

Es importante entonces analizar alternativas que permitan minimizar el impacto que presenta la pérdida del neutro corrido para evitar daños a los usuarios de la red eléctrica, principalmente a los de tipo doméstico, garantizando además el buen funcionamiento de los aparatos conectados al circuito eléctrico.

1.4 Metodología

Para el desarrollo de esta tesis se ha empleado la siguiente metodología con el fin de dar cumplimiento al objetivo planteado anteriormente:

En el capítulo uno se incluyen los antecedentes, el objetivo y la justificación de la tesis.

-Se ha realizado el análisis de normas, estándares y bibliografía sobre diversos temas, como son redes subterráneas, sistemas de tierra, transformadores de tipo pedestal y tipo poste.

Con el análisis se permitió la realización y comprensión de cada uno de los capítulos, permitiendo empezar con el segundo capítulo en el cual se incluyen conceptos y descripciones de elementos necesarios para el análisis.

-Se han buscado modelos que permitan representar el problema de la falta del neutro corrido y se han encontrado modelos para el análisis.

Con el estudio de los modelos encontrados se ha desarrollado el tercer capítulo de la tesis, en el cual han quedado definidos los modelos de representación de la falta del neutro corrido, que en este caso estos métodos están referidos más al tratamiento del neutro, aquí se explican de manera clara cada uno de los modelos.

-Realización de simulaciones de los modelos más comunes para ver el comportamiento de la red de distribución ante la falta del neutro corrido.

-Pruebas de laboratorio que comprueban los problemas que se ocasionan en la red de distribución al ocurrir la pérdida del conductor de neutro corrido.

Con la realización de simulaciones y las pruebas de laboratorio se desarrolló el capítulo número cuatro de la tesis en el cual se presentan los modelos físicos y la simulación de los modelos encontrados, además de que se incluye también un apartado del análisis matemático que comprueba tanto la prueba de laboratorio como la simulación de los mismos. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada una de las pruebas.

Finalmente se desarrolló el capítulo cinco con las conclusiones obtenidas en el laboratorio, simulación y modelo matemático, además se incluye una parte de trabajo futuro.

CAPITULO 2

Conceptos y descripciones de elementos para el análisis de la falta de neutro corrido

En este capítulo se presentan los elementos requeridos de un sistema de distribución de energía eléctrica que son necesarios para una mejor comprensión de la red.

Principalmente se menciona a los transformadores porque son los responsables de transformar un voltaje a otro requerido por el usuario, y aquí influye la manera de conexión, siendo el neutro el responsable de mantener o dar un mejor balance en los voltajes del sistema, además de que es aquí donde es frecuente la pérdida del neutro y del punto de aterrizamiento del transformador.

También se incluye una parte del sistema de tierra debido a que una buena puesta a tierra también garantiza beneficios y por lo regular está conectada al neutro del sistema de distribución.

2.1 Elementos de un sistema de distribución

La distribución de la energía eléctrica en el sistema eléctrico involucra principalmente los niveles de media y baja tensión, y tiene como objetivo el suministro de la energía eléctrica a los consumidores finales. Los componentes de un sistema de distribución son los enumerados a continuación:

2.1.1 Transformador

El transformador eléctrico es un equipo que se utiliza para cambiar un nivel de voltaje de suministro eléctrico a otro voltaje requerido a potencia constante. Un transformador consiste principalmente de dos devanados conductores que ejercen inducción magnética mutua, el primario es el devanado que recibe la potencia eléctrica al voltaje de operación de la red eléctrica y el secundario es el devanado que alimentará la carga con el nivel de tensión que requiere el usuario para su servicio.

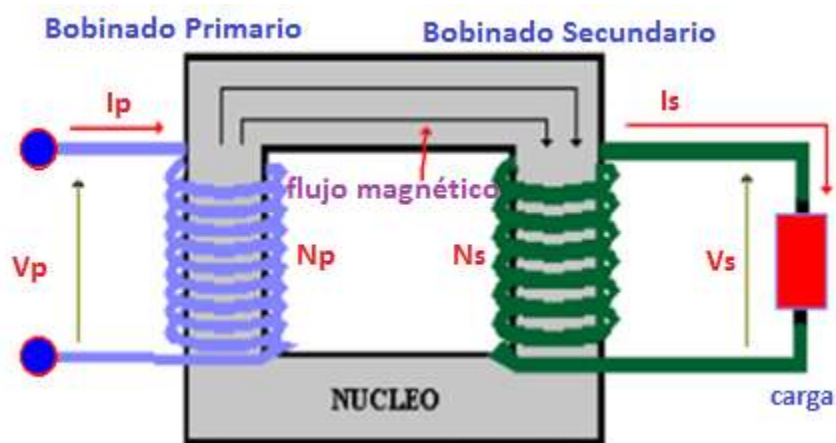


Figura 2.1 Diagrama elemental de un transformador

En la figura 2.1 se puede apreciar un transformador simple, en el cual se han arrollado varias espiras (vueltas) de alambre conductor sobre un núcleo común, a este

conjunto de espiras se les denomina bobina. La bobina primaria recibe una tensión de alterna, que hará circular por ella una corriente de alterna. Esta corriente induce un flujo magnético en el núcleo de hierro. Como el bobinado secundario está arrollado sobre el mismo núcleo de hierro, el flujo magnético circula a través de las espiras de éste. Al haber un flujo magnético que atraviesa las espiras del secundario se genera por el alambre del secundario una tensión. Al tener una carga en el secundario entonces se genera una corriente. La relación de transformación entre el bobinado secundario y primario depende del número de vueltas que tenga cada uno.

Los transformadores que se encuentran ya sea en un poste o subterráneos y que constituyen la última conversión de tensión entre el sistema de la central y el consumidor se denominan transformadores de distribución.

Entre las principales funciones de un transformador están:

- Modificar los valores de tensión y corriente con el fin de que estos tomen los niveles más adecuados para el transporte y distribución de la energía eléctrica.
- Transmitir energía a grandes distancias y distribuirla en forma segura y con pérdidas mínimas.
- Reducir los niveles de tensión a valores de utilización, por ejemplo en el hogar o la industria.
- Proporcionar aislamiento de circuitos entre sí.
- Modificar (al aumentar o disminuir) el consumo o inyección de potencia reactiva en los elementos como capacitores e inductores en los sistemas eléctricos de media o alta tensión.

Los transformadores se pueden clasificar de varias formas porque existen muchos rasgos característicos para cada tipo de transformador como pueden ser la forma o tipo de núcleo (tipo columnas, acorazado, envolvente o radial), número de fases (pueden ser monofásicos o trifásicos), número de devanados (dos o tres), medio de aislamiento (aceite,

aire, hexafloruro de azufre, etc.), tipo y medio de enfriamiento, la capacidad y alcances (AA, AFA, OA, OW, OA/FA, OA/FA/FA, FOA, OA/FA/FOA, etc.).

La clasificación más acorde al enfoque de este documento, es por su tipo de operación. Existen tres tipos básicos que son: de potencia, distribución e instrumento.

De acuerdo a lo anterior, el de mayor interés para esta tesis es el de distribución, ya que representa la última fase para la utilización de la energía eléctrica en niveles de media o baja tensión. Existen cuatro tipos de transformadores de distribución, el tipo pedestal, el tipo subestación (el más utilizado), tipo sumergible y el tipo poste, siendo este último en los últimos años el más utilizado por la compañía suministradora para utilizar la energía eléctrica a nivel residencial.

2.1.1.1 Transformadores tipo poste

Los transformadores tipo poste se utilizan en sistemas de distribución aéreos, en esta modalidad de distribución, el conductor, que por lo general está desnudo, va soportado a través de aisladores instalados en crucetas, en postes de madera o de concreto [12]. Se emplean en pequeñas industrias, en poblaciones formadas por áreas rurales y urbanas. Regularmente por su costo económico son más utilizados para la electrificación urbana y rural. En la figura 2.2 puede observarse un esquema de un transformador tipo poste.

Las partes principales de un sistema aéreo son esencialmente:

- a) Postes: Sus características de peso, longitud y resistencia a la rotura son determinadas por el tipo de construcción de los circuitos.
- b) Conductores
- c) Crucetas
- d) Aisladores
- e) Herrajes
- f) Equipo de seccionamiento

g) Transformadores y protecciones

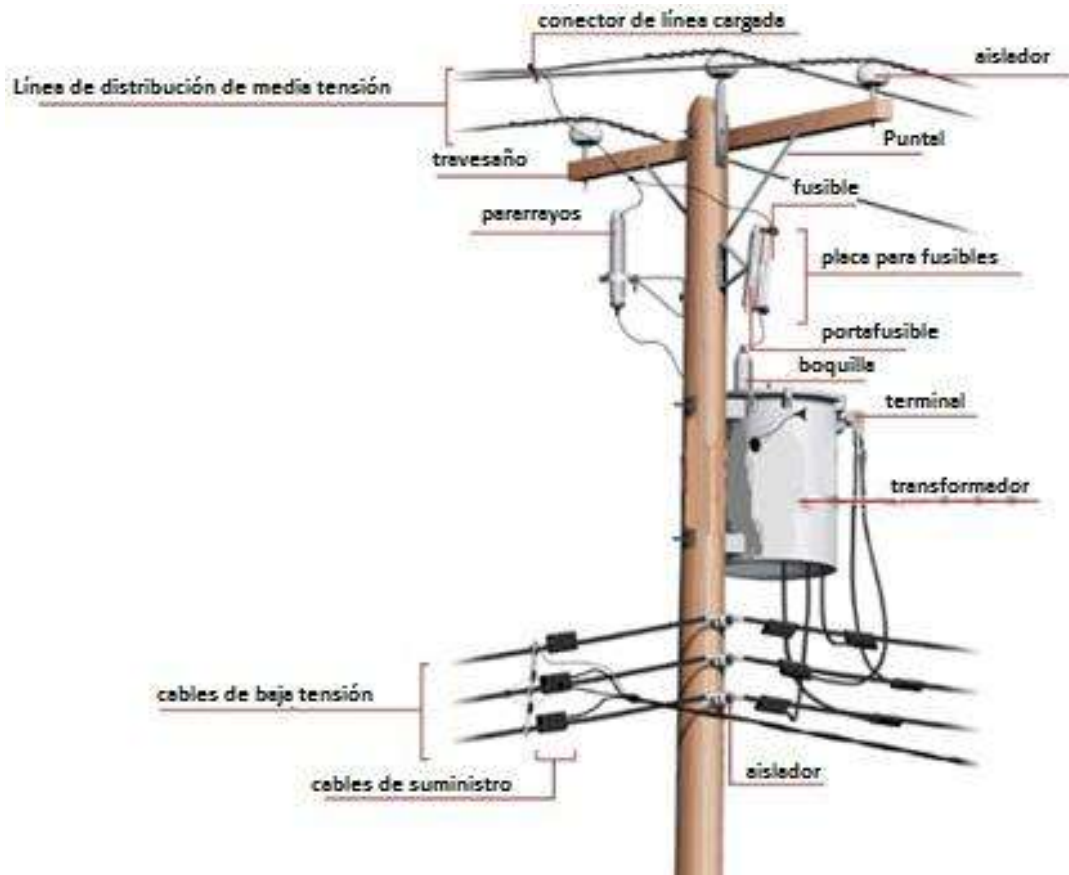


Figura 2.2 Transformador tipo poste

Estos transformadores normalmente se construyen en unidades trifásicas, con núcleo común y sus conexiones son: $\Delta - Y$.

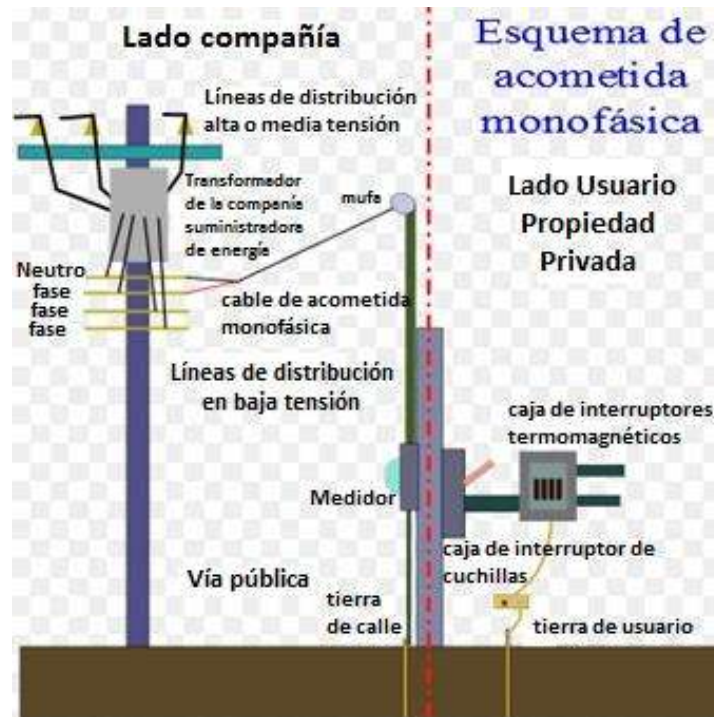


Figura 2.3 Acometida monofásica

Al comparársele con el sistema subterráneo tiene las siguientes ventajas:

1. Costo inicial más bajo.
2. Son más comunes y emplean materiales que son más fáciles de adquirir.
3. Fácil mantenimiento.
4. Fácil localización de fallas.
5. Tiempos de construcción más cortos.

Y tiene las siguientes desventajas:

1. Mal aspecto estético.
2. Menor confiabilidad
3. Menor seguridad (representa mayor peligro para quienes transitan por determinado lugar).
4. Son susceptibles de fallas y cortes de energía ya que están expuestas a: descargas atmosféricas, lluvia, granizo, polvo, temblores, gases, contaminantes, brisa, salina, vientos, contactos con cuerpos extraños, choques de vehículos y vandalismo [12].

2.1.1.2 Transformador tipo pedestal

Los transformadores de tipo pedestal son utilizados en sistemas donde la electrificación se realiza de manera subterránea, por lo regular se colocan al interior o exterior de zonas residenciales, terrazas de edificios, centros comerciales, desarrollos turísticos, fraccionamientos, hoteles, hospitales, edificios de oficinas y lugares donde la continuidad del servicio, la seguridad y la estética es un factor determinante, su uso se debe también a varias cuestiones, entre las que se encuentran: el acceso restringido, la ausencia de esquinas puntiagudas y acabado atractivo, debido a este último punto, los fabricantes en competencia han reducido el volumen de los transformadores con el propósito de hacerlo más atractivo a la vista.

Estos se construyen trifásicos con núcleo común y sus conexiones son: $Y - Y$ aterrizados por ambos extremos, esta última conexión con la finalidad de reducir posibles efectos de resonancia entre las pantallas de los conductores subterráneos por su efecto capacitivo con el propio devanado del transformador.



Figura 2.4 Transformador de tipo pedestal

Un sistema subterráneo cuenta con los siguientes componentes:

- a) Ductos. Estos pueden ser de asbesto, cemento, de PVC o conduit metálicos.
- b) Cables. Las líneas subterráneas están formadas por cables aislados.
- c) Cámaras: son de varios tipos pero las más comunes son de inspección y de empalme que sirve para realizar conexiones, pruebas y reparaciones.
- d) Empalmes uniones y terminales: que permiten dar continuidad adecuada, conexiones perfectas entre cables y equipos.

Se debe destacar que el costo de las líneas subterráneas es entre 8 y 15 veces superior al de las líneas aéreas, sin embargo estadísticamente se ha mostrado que la probabilidad de falla de estos cables es mínima por lo que debe sopesarse la inversión costo beneficio de este tipo de redes subterráneas.

De tal forma que las ventajas de sistemas subterráneos son:

- 1. Mucho más confiable ya que la mayoría de las contingencias mencionadas en las líneas aéreas no afectan a las redes subterráneas.
- 2. Son más estéticas, pues no se encuentran a la vista.
- 3. Son mucho más seguras.
- 4. No están expuestas al vandalismo.

Tienen las siguientes desventajas:

- 1. Su alto costo de inversión inicial.
- 2. Se dificulta la localización de fallas.
- 3. El mantenimiento es más complicado y las reparaciones toman mayor tiempo.
- 4. Están expuestas a la humedad y a la acción de los roedores [12].

2.1.2 Conexión de transformadores

Conexión Estrella-Estrella

Esta conexión se emplea en tensiones muy elevadas [13]. En estrella el número de espiras por fase es menor que en delta, pero la sección de las mismas es mayor que en delta, razón por la que en transformadores pequeños, así como en transformadores para tensiones muy elevadas se prefiere la conexión en estrella [18]. Tiene la desventaja de no presentar oposición a las armónicas impares; en cambio puede conectarse a hilos de retorno [13].

Los devanados de un transformador están conectados en estrella cuando se unen tres terminales de igual polaridad para formar el punto de neutro de la estrella, como se indica en la figura 2.5, donde N y n son los puntos neutros de primario y secundario del transformador, siendo también A, B, C y a, b, c las terminales de la línea en primario y secundario respectivamente.

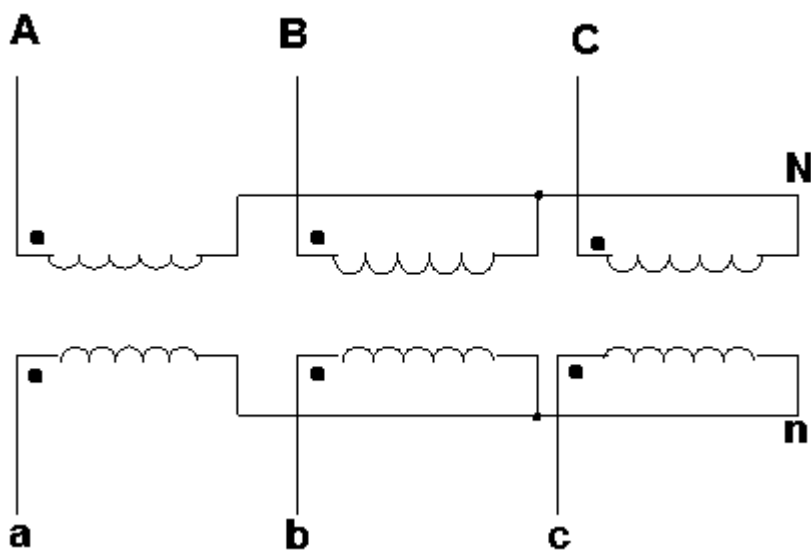


Figura 2.5 Conexión estrella-estrella

Las corrientes entre los devanados en estrella son iguales a las corrientes en la línea para un sistema en balance. Si la carga trifásica conectada en estrella está en desbalance, las

corrientes desbalanceadas producen tensiones desbalanceadas. Además, si las cargas monofásicas están en desbalance, se produce un desequilibrio de tensiones monofásicas debido a la caída en la línea de transmisión de tres conductores.

En la figura 2.6 se muestra cómo el neutro de la fuente se conecta al neutro del primario y secundario del transformador y también se conecta con las cargas. Una carga trifásica conectada en estrella se conecta con el neutro para que cualquier desbalance de corrientes de fase no desequilibre las tensiones de fase. Las cargas trifásicas en delta se conectan entre los conductores a-b, b-c y c-a. Las cargas monofásicas se conectan de una fase al neutro. Para un secundario conectado en estrella la tensión monofásica es $V_L/\sqrt{3}$, o sea $0.5777 V_L$ de acuerdo con la teoría de los circuitos trifásicos. Así, si las tensiones secundarias de línea son 220V, las tensiones secundarias de fase V_F , entre cualquier fase o línea y neutro, son 127 V. Cualquier línea de secundario conectado en estrella debe dar tensiones monofásicas al neutro.

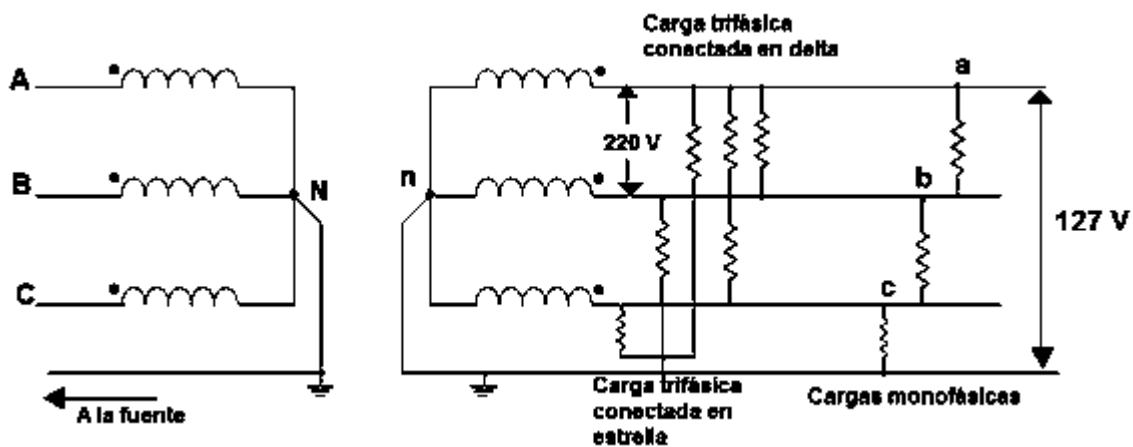


Figura 2.6 Transformador estrella-estrella con cargas conectadas en estrella y en delta y con cargas monofásicas.

Entre las ventajas que cumple el neutro están:

1. Es una trayectoria para las corrientes de desequilibrio debidas a cargas desbalanceadas.

2. Es un medio por el cual se pueden suministrar servicio eléctrico dual: tanto de tensión trifásica mayor para mayores cargas de potencia o motores, como menor de una fase para cargas de alumbrado y de aplicaciones domésticas.
3. Es un medio por el que las tensiones de fase, a través de cargas o transformadores conectados en estrella, se balancean con respecto a las tensiones de línea.

Hay que agregar que esta conexión se tiene como aplicación principal en distribución para los transformadores tipo pedestal y sumergibles para la distribución subterránea. La razón por la que se utiliza es porque a diferencia de la conexión delta en el devanado primario, la conexión en estrella no presenta la posibilidad de que exista el fenómeno de ferorresonancia, que en situaciones anormales de operación, puede presentarse en los sistemas con instalaciones de media tensión subterráneas [16] y que es donde por lo regular se utilizan estos transformadores.

Conexión Delta-Delta

La conexión delta-delta en transformadores trifásicos se emplea normalmente en lugares donde existen tensiones relativamente bajas; en sistemas de distribución se utiliza para alimentar cargas trifásicas a 3 hilos [13].

Este tipo de conexión no es utilizada por transformadores de distribución, solo se utiliza en pocas líneas que operan como sistemas de subtransmisión, presenta ventajas y desventajas en su operación, en cuanto a sobre voltajes y sobre corrientes cuando existe una falla de fase a tierra, donde se presenta la siguiente situación:

Corriente de falla: No existe corriente de falla por no existir trayectoria de retorno para la corriente, ya que la conexión delta forma un sistema aislado de tierra.

Sobre voltaje: El sobrevoltaje que se presenta en las fases no falladas es de 1.73 o $\sqrt{3}$ veces el voltaje de fase a tierra, esto se debe al desplazamiento que ocurre en el neutro de la delta, cuando este presenta la falla.

Lo que ocurre en condiciones de una falla de fase a tierra en una conexión delta-delta, es muy diferente a la conexión delta estrella o estrella-estrella sólidamente aterrizada, en donde la corriente de falla es muy alta y el sobre voltaje en las fases no falladas no rebasa 10%.

En la conexión delta-delta los lados primario y secundario del transformador se unen a las terminales de polaridad opuesta para formar un triángulo. La figura siguiente muestra una trayectoria delta-delta.

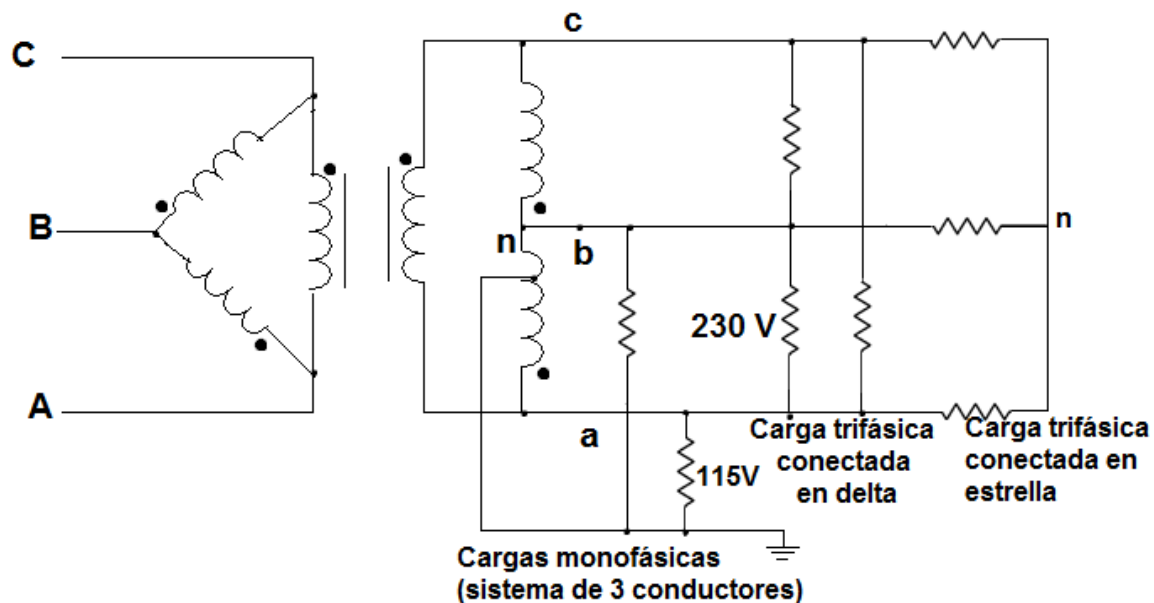


Figura 2.7 Transformador delta-delta con cargas conectadas en estrella y en delta

Como puede observarse el primario nunca se aterriza ya que se pondría en corto el transformador con la fuente, solo un secundario puede ser conectado a tierra desde su centro.

Además esta conexión presenta la desventaja de no tener hilo de retorno y la conexión neutra “flotante” de una transmisión delta-delta con cargas conectadas en estrella con neutro común, no evita el desequilibrio de tensión trifásica o monofásica. Como ventaja, se pueden conectar los devanados primario y secundario sin defasamiento.

Conexión Estrella-Delta

Esta conexión se utiliza en los sistemas de transmisión de las subestaciones receptoras cuya función es reducir voltajes [13]. En sistemas de distribución es poco usual y se emplea en algunas ocasiones para distribución rural a 20 KV. Los transformadores primarios sólo necesitan estar aislados para la tensión de fase y no el de línea.

El neutro del primario en la figura 2.8 está conectado a tierra con la fuente para suprimir armónicas de éste. Se tiene un sistema monofásico de tres conductores por medio de un neutro sacado al centro entre las líneas b y c. Las líneas a, b y c pueden abastecer cargas conectadas en estrella y en delta.

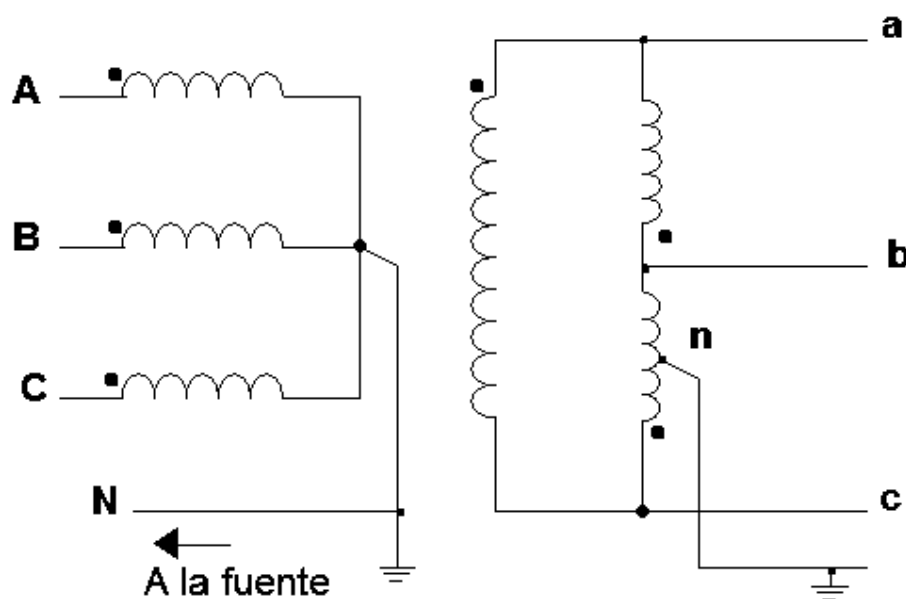


Figura 2.8 Transformación estrella-delta

Es importante hacer notar que los sistemas estrella-delta y delta-delta, solo permiten que una de fase de sus secundarios conectados en delta se conecte al centro con la tierra, la salida central y conexión a tierra de cualquier otro secundario conectado en delta pondría en corto al transformador.

Conexión Delta-Estrella

Esta conexión se emplea en aquellos sistemas de transmisión en que es necesario elevar voltajes de generación. En sistemas de distribución es conveniente su uso debido a que pueden tener dos voltajes diferentes (entre fase y neutro) [13].

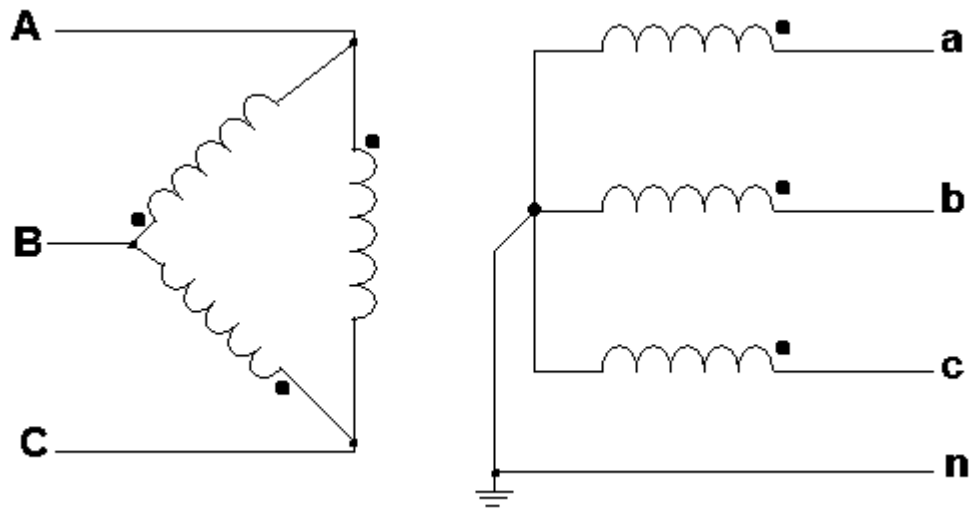


Figura 2.9 Transformación delta-estrella

Conexión de transformadores monofásicos en bancos trifásicos

Los transformadores monofásicos se conectan en bancos trifásicos, principalmente en dos tipos de circuitos, en circuitos de muy alto voltaje y en circuitos en que se requiera continuidad en el servicio, en este último se dispone de cuatro transformadores monofásicos (tres en operación y uno de reserva). Las conexiones que se pueden realizar con transformadores monofásicos para formar bancos trifásicos son en general las mismas que se llevan a cabo en los transformadores trifásicos [13].

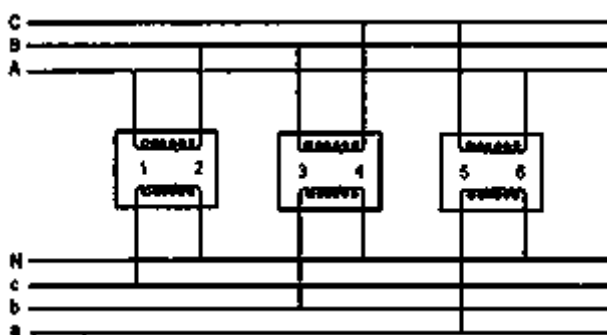


Figura 2.10 Ejemplo Δ-Y con transformadores monofásicos

2.1.3 Conductores eléctricos

El conductor utilizado es de vital importancia, ya que su función básica es la de transportar energía eléctrica en forma segura y confiable desde la fuente de potencia a las diferentes cargas.

2.1.3.1 Selección del material para conductores

Cada elemento del sistema de tierra, incluyendo conductores de la rejilla, conexiones, cables de conexión y todos los electrodos primarios, deben tener los siguientes requisitos:

1. Tener suficiente conductividad, de modo que no contribuya sustancialmente a las diferencias locales de tensión.
2. Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo la combinación más adversa de una magnitud de falla y la duración de la misma.
3. Ser mecánicamente fiable y resistente en alto grado.
4. Ser capaz de mantener su función incluso cuando se exponen a la corrosión o el abuso físico.

Algunas veces se utiliza la conductividad eléctrica, σ , para especificar el carácter eléctrico de un material. Es simplemente el recíproco de la resistividad, es decir:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

e indica la facilidad con que un material es capaz de conducir una corriente eléctrica. Las unidades de σ son las inversas de $\Omega \cdot m$, o sea $(\Omega \cdot m)^{-1}$. Los metales son buenos conductores. La tabla siguiente presenta algunos metales con su respectiva conductividad eléctrica.

Tabla 2.1 Conductividades eléctricas a temperatura ambiente para ocho metales y aleaciones comunes

Metal	Conductividad eléctrica [($\Omega \cdot m$) ⁻¹]	Metal	Conductividad eléctrica [($\Omega \cdot m$) ⁻¹]
Plata	6.8×10^7	Hierro	1.0×10^7
Cobre	6.0×10^7	Latón (70 Cu-30 Zn)	1.6×10^7
Oro	4.3×10^7	Acero al carbono	0.6×10^7
Aluminio	3.8×10^7	Acero inoxidable	0.2×10^7

2.1.3.2 Serie galvánica

La serie galvánica constituye una clasificación de las actividades relativas de los diferentes metales y aleaciones comerciales en un medio dado, habitualmente agua de mar. En la serie galvánica no se indican voltajes por tratarse de una ordenación comparativa de actividades en un determinado medio, su serie galvánica permite predecir cuál de ellos tendrá una actuación anódica y, por tanto, sufrirá corrosión y aquí existe una disminución de la energía libre al pasar del estado metálico al estado oxidado. El oro y el platino resisten la mayoría de los ambientes y por este motivo existen en la naturaleza en estado metálico, de los metales más comúnmente utilizados como conductores se encuentra la plata que tiene una alta conductividad, pero debido a su costo no es práctico su uso. Sin embargo es utilizada en equipos especializados tales como satélites [8].

En la tabla 2.2 se muestra la serie galvánica en agua de mar de algunos metales y aleaciones de uso frecuente.

Tabla 2.2 La serie galvánica

 Inactividad Creciente (catódicos)	Platino Oro Grafito Titanio Plata Acero Inoxidable 316 (pasivo) Acero Inoxidable 304 (pasivo) Inconel (80Ni-13Cr-7Fe)(pasivo) Níquel (pasivo) Monel (70Ni-30Cu) Aleaciones cobre-níquel Bronce (Cu-Sn) Cobre Latón (Cu-Zn) Inconel (activo) Níquel (activo) Estaño Plomo
Actividad Creciente (anódicos) 	Acero inoxidable 316 (activo) Acero inoxidable 304 (activo) Fundición Hierro y acero Aleaciones de Aluminio Cadmio Aluminio comercialmente puro Zinc Magnesio y aleaciones de Magnesio

2.1.3.3 Materiales

Los materiales que se utilizan para los conductores de la energía eléctrica son fabricados con la utilización de los siguientes metales.

Cobre

El cobre es un material común usado para la conexión a tierra. Los conductores de cobre, además de su alta conductividad, tienen la ventaja de ser resistente a la corrosión subterránea porque el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que son propensos a ser enterrados en la zona [7].

Además para el transporte de la energía eléctrica, así como para cualquier instalación de uso doméstico o industrial, se utiliza el cobre pues su precio es menor al de la plata por lo que es utilizado universalmente en forma de cables de uno o varios hilos.

De acero con revestimiento de cobre

Se utiliza generalmente para las barras subterráneas y de vez en cuando para poner a tierra las rejillas, sobre todo donde el robo es un problema. El uso de cobre o de acero revestido de cobre en menor medida, por lo tanto, asegura que la integridad de una red subterránea se mantendrá durante años, siempre y cuando los conductores sean de un tamaño adecuado, no dañadas y las condiciones del suelo no sean corrosivas para el material utilizado.

Aluminio

Se utiliza para las redes de tierra con menos frecuencia. Se encuentran las siguientes desventajas a considerar:

1. De aluminio en sí se puede corroer en ciertos suelos. La capa de material de aluminio corroído es no conductor de puesta a tierra para todos los fines prácticos.
2. La corrosión gradual causada por corrientes alternas también puede ser un problema bajo ciertas condiciones.

Por lo tanto, debe utilizarse solamente después de una investigación completa de todas las circunstancias, a pesar de que, como el acero, sería aliviar el problema de contribuir a la corrosión de otros objetos enterrados. Sin embargo, el aluminio es anódico a

muchos otros metales, incluyendo el acero y, si interconectados a uno de estos metales en la presencia de un electrolito, el aluminio se sacrificará para proteger el otro metal. Si se utiliza aluminio, se recomiendan los grados conductor eléctrico de alta pureza por ser más adecuado que la mayoría de las aleaciones. También el Aluminio es un material mucho más ligero, lo que favorece su empleo en líneas de transmisión de energía eléctrica en las redes de alta tensión.

Acero

Se puede utilizar para conductores y barras de rejilla de tierra. Por supuesto, un diseño de este tipo requiere que se preste atención a la corrosión del acero. El uso de un acero resistente a la corrosión galvanizado o, en combinación con la protección catódica, es típico para los sistemas de puesta a tierra de acero.

2.1.3.4 Tensiones inducidas en las pantallas metálicas de cables subterráneos

El problema de cuantificar y minimizar las tensiones inducidas en las pantallas de los cables de energía, se refiere fundamentalmente a los cables unipolares, ya que las variaciones del campo magnético en los cables tripolares o en formación triplex se anulan a una distancia relativamente corta del centro geométrico de los conductores y, consecuentemente, las tensiones que se inducen en sus pantallas son tan pequeñas que pueden despreciarse.

Si se tienen dos conductores paralelos colocados uno cerca del otro, y uno de ellos lleva una corriente alterna, se tiene un campo magnético alrededor del conductor que lleva la corriente. Dada la cercanía de los conductores, las líneas del flujo del campo magnético del conductor energizado cortarán al otro conductor y se inducirá una tensión en este último como se muestra en la figura 2.11.

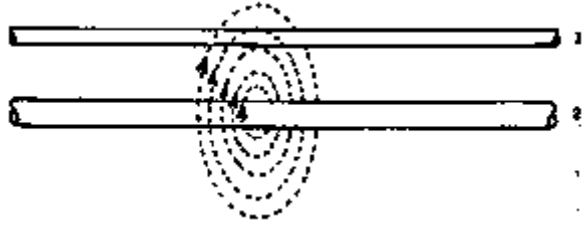


Figura 2.11 Tensión inducida entre dos conductores paralelos

Las variaciones del campo magnético en el conductor 2 harán que la tensión inducida en 1 varíe en función del tiempo y de la magnitud de la corriente en el conductor 2.

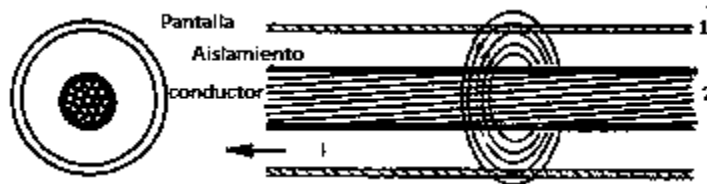


Figura 2.12 Tensión inducida en la pantalla metálica de un cable para media tensión.

De esta forma la corriente alterna que circula por el conductor central crea un campo magnético alterno cuyas líneas de flujo enlazan a la pantalla metálica, y se induce en ella una tensión a tierra como se observa en la figura 2.12.

2.1.3.5 Conexión a tierra de cables subterráneos

La conexión de las pantallas a tierra es de gran importancia. Si los extremos no se conectan, se inducirá en la pantalla una tensión muy cercana al potencial del conductor, de manera similar al secundario de un transformador, por lo que se procura aterrizar la

pantalla, evitando peligros de choque eléctrico al personal y posible daño al cable, por efecto de sobretensiones inducidas en las pantallas que pudieran perforar las cubiertas.

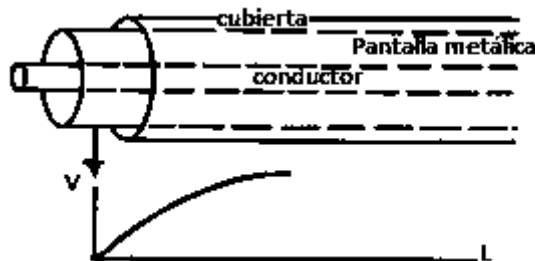


Figura 2.13 Pantalla aterrizada en un punto

Usualmente, las conexiones se realizan en un punto, figura 2.13, o en dos o más puntos, figura 2.14. El tipo de conexión a tierra debe analizarse con particular cuidado, en función de la tensión máxima que pudiera alcanzar.

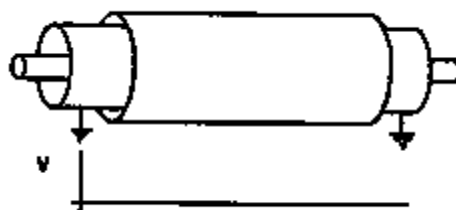


Figura 2.14 Pantalla aterrizada en dos o más puntos.

Cuando la pantalla del cable está aterrizada en ambos extremos, como sucede en la mayoría de los casos encontrados en la práctica, la tensión inducida producirá la circulación de corriente a través de la pantalla.

Esta corriente produce a su vez una caída de tensión que punto a punto, es igual a la tensión inducida y el efecto neto de ambos fenómenos es igual a cero.

Por lo tanto el potencial a tierra de las conexiones de los extremos se mantiene a lo largo de la pantalla del cable. Sin embargo, es conveniente aterrizar la pantalla en el mayor número de puntos posibles, por si llegara a abrirse alguna de las conexiones.

Si se conectan a tierra las pantallas metálicas de los cables en todos aquellos puntos accesibles al personal de mantenimiento (principalmente en los empalmes y los terminales), se garantizará una diferencia de potencial nula entre pantalla y tierra entre esos puntos; sin embargo, el hecho de conectarlas entre sí y a tierra entre dos o más puntos del circuito permite la circulación de corriente, cuya magnitud es función de la impedancia de la pantalla. Esta corriente produce tres efectos desfavorables sobre el cable.

- a) Produce pérdidas.
- b) Puede reducir notablemente la capacidad de corriente de los cables, sobre todo en calibres grandes.
- c) Produce calentamientos que pueden llegar a dañar los materiales que lo rodean (aislamiento y cubierta).

A pesar de las desventajas mencionadas, se recomienda conectarse entre sí y a tierra las pantallas metálicas de los cables de energía, en todos aquellos puntos accesibles al personal de operación y mantenimiento.

2.1.4 Sistemas de tierra

Un sistema de tierra es la red donde los conductores eléctricos están unidos a una o más tomas de tierra, también tiene una o varias terminales que pueden ir conectadas a puntos de una instalación. El sistema de tierras puede ser construido desde una simple varilla de acero forrada con cobre hasta una malla formada por un grupo de varillas interconectadas entre sí, esto con la finalidad de mantener en el neutro de la instalación eléctrica un voltaje cero o lo más próximo posible a cero.

Las plantas y subestaciones deben contar con un sistema de tierra el cual se conecta a todos y cada uno de los elementos de la instalación que requieran ser puestos a tierra para:

- a) Proveer un medio seguro para proteger al personal que se encuentra dentro o en la proximidad del sistema de tierra o de los equipos conectados a tierra, de los riesgos de una descarga eléctrica debida a condiciones de falla o por descarga atmosférica.
- b) Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes a tierra, ya sean debidas a una falla a tierra del sistema o a la propia operación de algunos equipos.
- c) Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas indeseables a tierra, sin que se excedan los límites de operación de los equipos.
- d) Facilitar la operación de los dispositivos de protección, para la eliminación de fallas a tierra.
- e) Proveer un medio de descarga y desenergización de equipos, antes de proceder a las tareas de mantenimiento.
- f) Dar mayor confiabilidad y seguridad al servicio eléctrico.

Además de que el sistema de tierra es importante debido a que el neutro es conectado a tierra durante la distribución en todo momento para minimizar las consecuencias de algún accidente producido por algún choque eléctrico, causado por defectos o sobretensiones ocasionadas dentro de la red eléctrica, a su vez, tiene como segunda función balancear los voltajes de fase ante la presencia de cargas desbalanceadas.

2.1.4.1 Generalidades

La seguridad del personal y equipo es de primordial importancia, en los sistemas de distribución por lo que el neutro y la conexión a tierra tienen la misma importancia que las fases energizadas.

1. Normalmente los sistemas de tierra deben construirse con alambre de cobre semiduro desnudo de 5.19mm de diámetro (calibre N° 4 AWG) mínimo.

2. Nunca se deben utilizar conductores de ACSR o AAC (cable de aluminio con refuerzo central de acero, todo el conductor de aluminio respectivamente).
3. La bajante para tierra en nuevas instalaciones se debe de instalar en el interior del poste, para el caso de instalaciones existentes se podrá instalar para el exterior utilizando protector TS (protector de tensión).
4. La resistencia de tierra debe tener un valor máximo de 25Ω en tiempos de secas, cuando el terreno este húmedo debe tener un máximo de 10Ω
5. Todos los neutros contiguos y bajantes de tierra deben estar interconectados, independientemente que no correspondan al mismo circuito o área en baja tensión [9].

2.1.4.2 Mejoramiento al sistema de tierras

Como ya se mencionó, la resistencia máxima del sistema de tierra debe ser como se indica en el punto 4 de generalidades, de lo contrario se pueden tomar las siguientes recomendaciones.

a) Mejora a sistemas de tierra con contra antena

La mejora de la resistencia de tierra con contra-antena de conductor se efectúa cuando el valor de la resistencia de tierra con un electrodo rebasa el valor máximo de 25Ω y cuando la adición de electrodos se dificulta por las características del subsuelo, por lo que se puede optar por instalar líneas radiales con conductor de cobre desnudo de desperdicio partiendo desde el electrodo ya instalado.

Estas líneas radiales van enterradas en una zanja con profundidad mínima de 40cm. En el área urbana la ranura se hara entre el cordón y la banquetta.

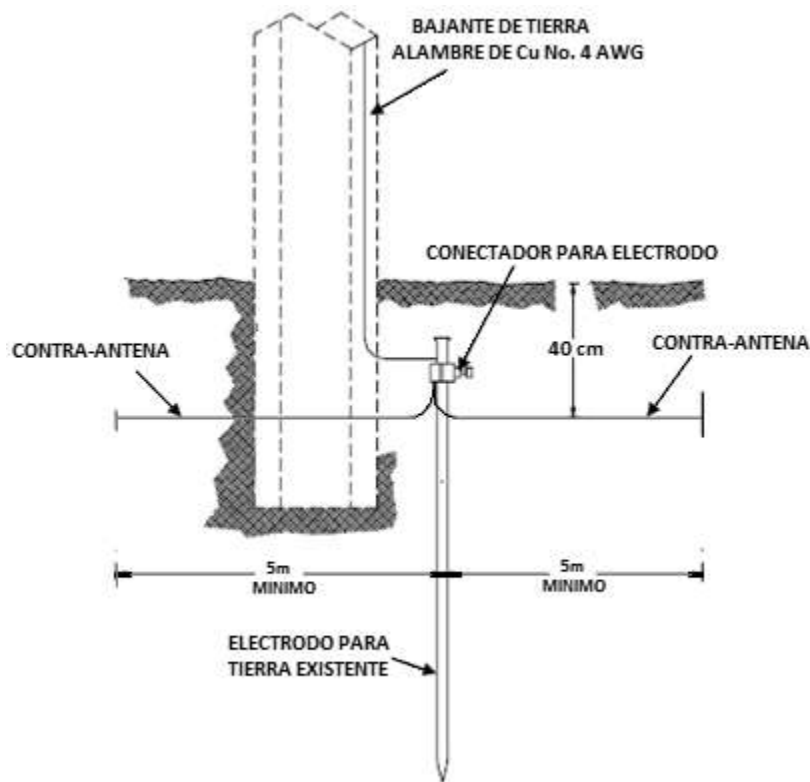


Figura 2.15 Sistema de tierra con contra antena

En primera instancia se abrirán dos zanjas en sentido longitudinal de la línea con una distancia de 5m cada una (o la distancia que indique la experiencia de pruebas en terrenos similares). Se hace una nueva prueba de resistencia y en función de los valores obtenidos se reducirá el número de zanjas y su longitud para llegar al valor deseado. En áreas urbanas las siguientes zanjas se continuarán a las anteriores. En áreas rurales las zanjas deben ser perpendiculares a la línea.

El calibre mínimo de conductores será N° 4 AWG de cobre y debe conectarse al electrodo para tierra [9].

b) Mejora a Sistema de tierra con bentonita

1. Debido a que la resistividad del terreno depende de la composición del mismo, se hace necesario en algunos casos mejorar las condiciones de resistividad. Uno

de los sistemas económicos y de la mayor efectividad para abatir la resistividad es mediante la aplicación de bentonita sódica.

2. El tratamiento a tierras con bentonita se puede utilizar con electrodos o mediante el uso de contra-antenas de conductores de cobre desnudo.
3. Para todos los casos donde se utilice bentonita la mezcla debe ser de 1.5 litros de agua por cada kilogramo de bentonita. Esta mezcla se debe batir hasta obtener una masa uniforme y gelatinosa, una vez terminado el trabajo se debe permitir el acceso al agua para mantener la humedad de la mezcla.
4. En terreno rocoso, se efectúan perforaciones con equipo neumático o moto-vibrador con una broca de 5.08 cm de diámetro y de 150cm de longitud. El número de perforaciones depende de las características del terreno para obtener un valor máximo de 25Ω inmediatamente después de haber efectuado la instalación, se elabora una parrilla con alambre de cobre semiduro desnudo, calibre N° 4 AWG de una pieza (sin empalmes) para insertarse en las perforaciones. Ambos extremos del alambre se unen con conector, finalmente las zanjas y las perforaciones se llenan con una pasta fluida de bentonita con agua, como se muestra en la siguiente figura:

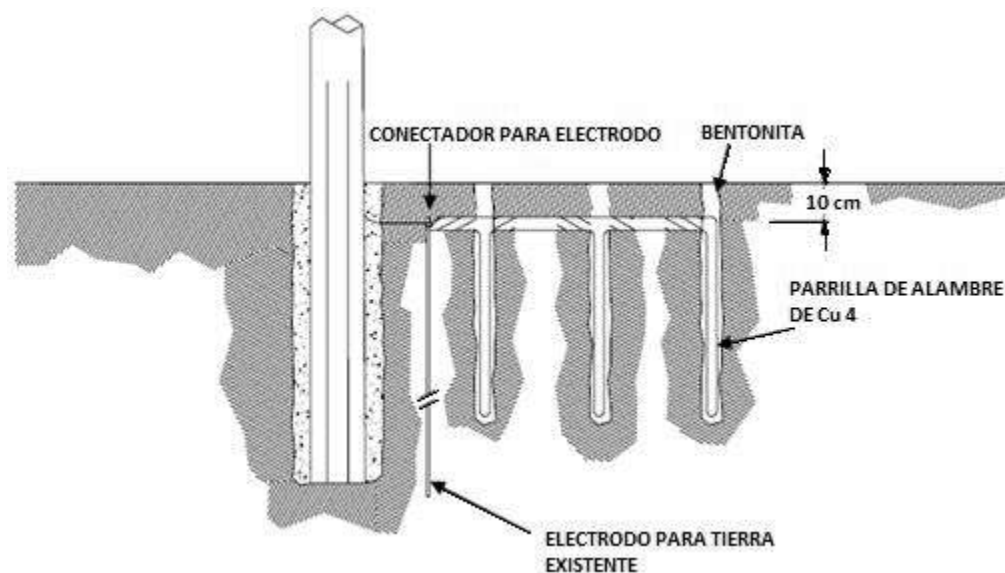


Figura 2.16 Sistema de tierra con bentonita

La parte superior de la zanja (10cm) se recubre con el material de la excavación.

La perforación que se realice en banquetas y arroyo de calles para realizar los trabajos descritos en los puntos anteriores, se deben reponer con material y acabados similares a los existentes [9].

c) Mejora a sistema de tierra con electrodos

En este caso, se hace una cepa de 45cm de diámetro por 1.50m de profundidad en la que se clava un electrodo de tierra adicional al centro de la misma. Posteriormente se llena la cepa con la mezcla de bentonita y agua. Se agrega agua más para que el terreno se impregne bien con la mezcla [9].

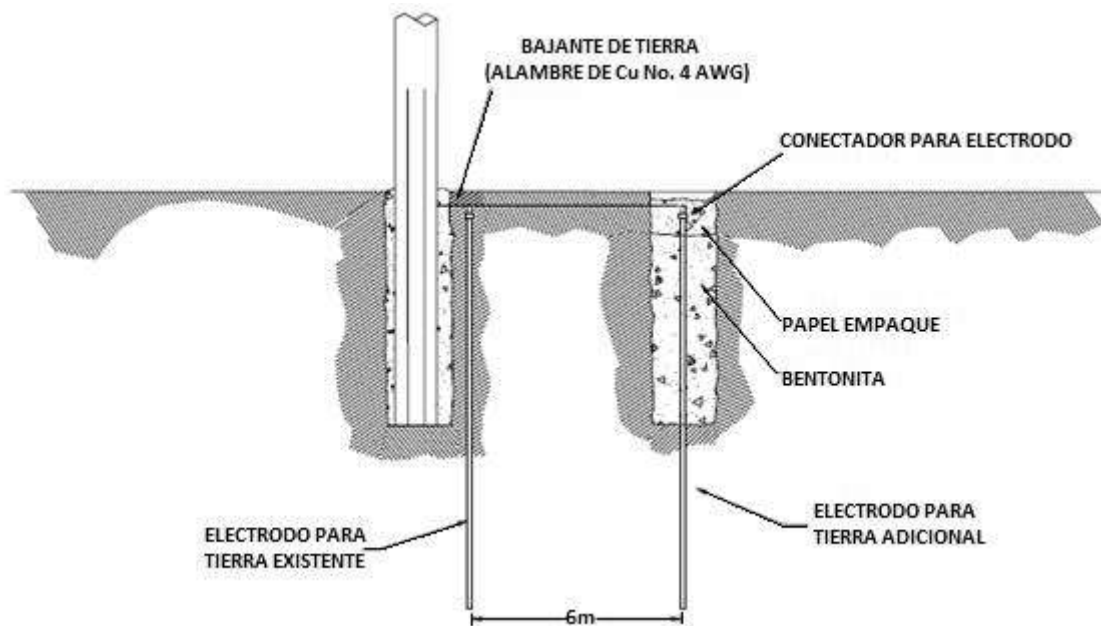


Figura 2.17 Sistema de tierra con electrodos

d) Mejora a sistema de tierra con contra-antena bentonita y electrodo

Se instala la red de contra-antenas en la forma indicada, se llena la zanja con una mezcla de bentonita y agua a lo largo de las contra-antenas del electrodo. Posteriormente se tapa la zanja con la tierra extraída. Este sistema es apropiado para terreno rocoso, como se muestra en la figura siguiente [9]:

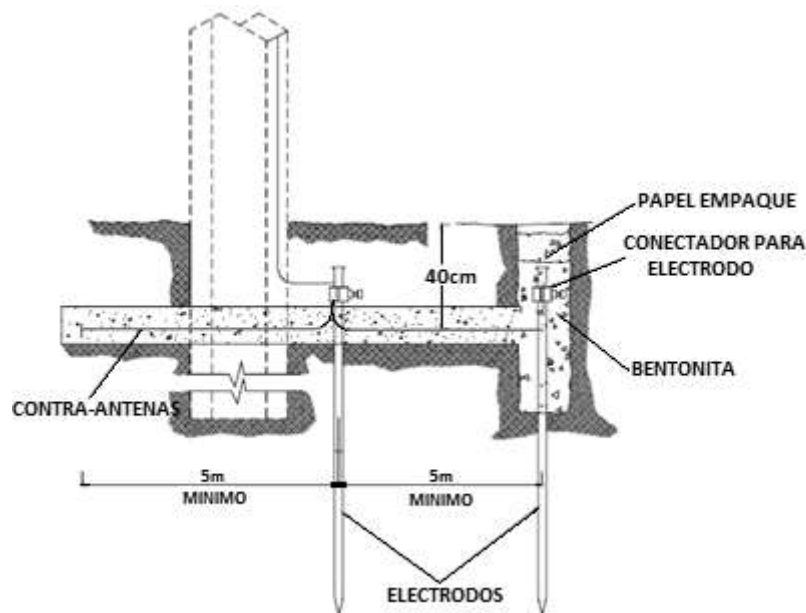


Figura 2.18 Sistema de tierra con contra antena, bentonita y electrodo

2.2 Clasificación de las cargas

Para clasificar las cargas eléctricas existen varios criterios a realizar. El más empleado Pero de acuerdo al de mayor conocimiento según el uso de la energía: residencial, comercial, industrial, institucional.

Esta última podría subdividirse en un gran número de subclases, entre ellas hospitales, aeropuertos, hoteles, etc., pero todas tienen una constante: son cargas concentradas, lo cual es otra clave para clasificar las cargas.

En efecto, en cuanto a su distribución espacial, las cargas del sistema de distribución se clasifican en:

1. Uniformemente distribuidas (porción de terreno residencial-alumbrado público)
2. No uniformemente distribuidas (porción de terreno de media y alta densidad)
3. Concentradas

Otra clasificación donde interviene la variable del tiempo es la de:

- a. Continuas
- b. Intermitentes
- c. Provisionales

Es importante mencionar que, en cuanto a su composición, en el sistema de distribución se encuentran cargas balanceadas o equilibradas y desbalanceadas, una industria por ejemplo, puede tener 300KV_a en cargas de motores y 200KV_a en cargas monofásicas diversas. Estas diferencias son inherentes solo a las cargas servidas en baja tensión. En el análisis del sistema de potencia con tensiones superiores a 15KV, las cargas se suponen siempre balanceadas, pero en la distribución primaria y secundaria las cargas balanceadas son curiosamente la excepción [11].

2.2.1 Conexión de cargas trifásicas

De acuerdo a lo anterior, dependiendo del tipo de elemento que tiene la carga se habla de cargas balanceadas o desbalanceadas, de acuerdo a si las ramas que forman la carga trifásica contiene elementos iguales o diferentes.

La unión de fuentes y cargas trifásicas pueden tener cuatro tipos de conexión diferentes según si las cargas puedan conectarse en delta o en estrella y si la fuente pueda configurarse como delta o estrella según el tipo de conexión de que se trate en cada caso.

Tabla 2.3 Conexión de fuente y carga

Conexión	Fuente	Carga	Retorno por neutros
Δ - Δ	Triángulo	Triángulo	No tiene
Y- Δ	Estrella	Triángulo	No tiene
Δ -Y	Triángulo	Estrella	No tiene
Y-Y	Estrella	Estrella	Si tiene

Sólo en la conexión Y-Y es posible encontrar un retorno por tierra que consiste en la unión física de los puntos comunes de la fuente y de la carga, a través de la tierra física puede derivar una corriente no despreciable entre los puntos de tierra por la existencia de una resistencia entre los dos neutros.

Esta situación crea una diferencia de potencial entre las tierras que puede ser dañino para los equipos que se conectan al sistema. La impedancia de tierra, en particular su resistencia, puede variar desde valores como $Z_{on}=0$ (corto circuito), hasta $Z_{on} \Rightarrow \infty$ (circuito abierto), o bien puede tomar un valor intermedio $Z_{on} \neq 0$ ($Z_{on} = Z_n$).

Desde el punto de vista del tipo de elementos que configuran la carga se habla de cargas balanceas, $Z_1 = Z_2 = Z_3$ si todas las ramas tienen los mismos valores de elementos, y desbalanceados si los elementos presentan características diferentes en cada rama $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$

Sistema trifásico con cargas balanceadas

Se dice que las impedancias de un sistema trifásico que forman una delta o una estrella, son balanceadas cuando sus magnitudes y ángulo son iguales, y que al ser excitadas por fuentes trifásicas de tensiones simétricas, iguales en magnitud y desfasadas en

120° harán que las corrientes en cada línea de conexión del sistema sean simétricas entre sí, lo que también se cumple para las corrientes en las impedancias de carga.

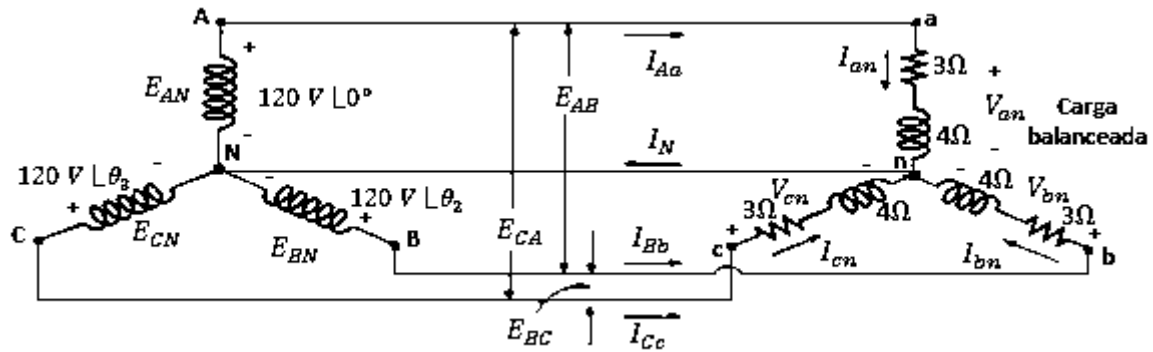


Figura 2.19 Sistema trifásico balanceado Y-Y con retorno por tierra

Sistema trifásico con cargas desbalanceadas

La diferencia con las cargas desbalanceadas radica en que la conexión fuente estrella y carga estrella permite la conexión de las dos tierras a través de la tierra física creando por ella una vía de circulación de corriente por tierra. En general en un sistema desbalanceado las corrientes de línea son diferentes entre sí de la misma forma como lo son las corrientes en las cargas.

En el caso de una conexión Y-Y con carga desbalanceada la corriente entre la tierra puede llegar a ser diferente de cero, $I_n \neq 0$, lo cual depende también de la impedancia existente en la tierra física entre los puntos comunes de fuente y la carga, por lo que la diferencia de potencial puede llegar a ser diferente de cero, $V_{on} \neq 0$.

La razón por la que únicamente se menciona la conexión de Y-Y es debido a que en la rama de carga del suministro eléctrico ésta es la conexión más utilizada y es la parte donde se realiza el análisis.

2.3 Ferrorresonancia

Se menciona este fenómeno porque los transformadores de distribución pueden presentar una reactancia inductiva que combinada con la capacitancia de los cables subterráneos de media tensión, y con la apertura de una o dos fases de media tensión, pueden presentar la ferrorresonancia ocasionando altas corrientes y sobre voltajes. De esta forma la ferrorresonancia es una resonancia, en donde uno o más elementos que intervienen tienen un comportamiento no lineal.

Los transformadores instalados en el circuito donde se presenta la ferrorresonancia, emiten un ruido especial muy diferente al ruido normal de operación del transformador, siendo el sobrevoltaje que se presenta de 3 veces el nominal o aún mayor.

La ferrorresonancia requiere de las siguientes condiciones para que pueda ocurrir:

- a) La existencia de uno o dos conductores abiertos, por fusibles fundidos o por la apertura de un dispositivo de protección monofásico.
- b) Conexión del devanado primario de los transformadores de distribución en delta, delta abierta, estrella con neutro flotante o conexión de devanados en el lado primario sin conexión a tierra.
- c) Existencia de la suficiente capacitancia entre el conductor abierto, y el devanado primario del transformador, de tal manera que se igualen los valores de las reactancias $X_L = \omega L$ y $X_C = 1/\omega C$.
- d) Interviene la capacidad del transformador de distribución, el nivel de voltaje usado en la media tensión, la cantidad de carga alimentada por el devanado secundario en el momento del problema. Es mayor la probabilidad de que se presente la ferrorresonancia en voltajes de 23 kV y mayores, y cuando los transformadores son de pequeña capacidad y se encuentran sin carga o con poca carga.

En otras palabras en el inciso c, la probabilidad de ferrorresonancia y su sobre corriente y su sobre voltaje asociado es alta, si el circuito existente entre el conductor

abierto y el transformador es de cable aislado, y tiene suficiente reactancia capacitiva, para llegar a tener el mismo valor que la reactancia inductiva del devanado del transformador.

La ferorrresonancia se evita en las redes de distribución si no se tienen instalaciones subterráneas de media tensión, o cuando se tienen, si utilizamos una conexión del devanado primario de los transformadores de distribución, que tenga conexión a tierra (tierra aterrizada).

Otros aspectos que ayudan a evitar ferorrresonancia, es no instalar equipos de protección y seccionamiento monofásicos en la red de media tensión, evitando que los transformadores de distribución estén en vacío o con muy poca carga cuando se presente la apertura de una o dos fases de la línea de media tensión.

Cuando los transformadores tipo pedestal entran en el efecto de resonancia, los mismos experimentan sobretensiones, como consecuencia de la interacción de reactancias inductivas y capacitivas. De tal forma que cuando los equipos se encuentran en resonancia y estas son muy frecuentes o de tiempos prolongados se pueden tener problemas, ya que desgastan las componentes internos del equipo, teniendo en cuenta un efecto acumulativo lo cual conlleva a reducir la vida útil no solo del transformador sino también en el dieléctrico o aislante de los conductores respecto a tierra.

2.4 Definiciones

Toma de tierra

Una toma de tierra es un conductor eléctrico que conduce o deriva una corriente, es decir un electrodo enterrado en el suelo.

Aterrizamiento

El aterrizamiento es un conector de sistemas, es decir conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor que sirva en lugar de ella que permite tener un retorno por el suelo y mantener así el potencial al mismo nivel del suelo.

Tierra eléctrica

Una conexión conductora, intencional o accidental entre un circuito o equipo eléctrico y la tierra o un cuerpo conductor que sirve en lugar de ella y que es el punto de referencia cuyo potencial eléctrico es igual a cero.

Conductor de puesta a tierra de equipo

Conductor que conecta las partes metálicas no destinadas a transportar corriente (carcazas gabinetes, charolas y tuberías) con el conductor de puesta a tierra, con el conductor del electrodo de aterrizaje o con ambos en el equipo de desconexión principal o en la fuente de un sistema derivado separadamente.

Corriente a tierra

Corriente que fluye hacia o fuera de la tierra o sus equivalentes que sirven como tierra.

Línea de Media tensión

Línea cuya tensión eléctrica de operación está entre 1000 y 34 500 V.

Línea de Baja tensión

Línea cuya tensión eléctrica es menor de 1000 V.

Neutro

Punto de referencia eléctrico cuyo potencial con respecto a tierra es igual a cero en sistemas trifásicos balanceados.

Alambre

Es una barra o filamento de material laminado o extruido cuya longitud es muy grande en comparación con el eje mayor de su sección transversal.

Conductor

Un alambre o combinación de alambres no aislados entre sí, adecuados para transmitir corriente eléctrica.

Conductor trenzado

Es un conductor compuesto de un grupo de alambres, usualmente retorcidos o cualquier combinación de grupos de alambres.

Cable

Es un conductor trenzado (cable conductor sencillo) o una combinación de conductores aislados entre sí (cable conductor múltiple).

Hilo

Uno de los alambres de cualquier conductor trenzado.

Empalme

Conexión eléctrica y mecánica entre dos conductores

Empotrar

Fijar un poste en el terreno

Equipo

Termino general que incluye dispositivos, aparatos y productos similares utilizados como partes de ó en conexión con una instalación eléctrica.

Tensión eléctrica a tierra

Es la tensión eléctrica entre un conductor y tierra

Tensión eléctrica nominal

Valor nominal asignado a un circuito o sistema para la designación de su clase de tensión eléctrica.

Acometida

Tramo de línea que conecta la instalación del usuario a la línea suministradora.

CAPITULO 3

Modelos de representación de falta de neutro corrido

En este capítulo se presentan métodos de conexión de transformadores de distribución trifásicos donde se incluye el conductor neutro, se analiza además el funcionamiento de cada conexión, observándose tanto beneficios como desventajas de cada método. También se muestran algunos métodos de conexión de sistemas de tierra debido a que estos se conectan para la protección del sistema al neutro de la red.

La representación del conductor de neutro en un sistema de suministro eléctrico es de vital importancia, ya que garantiza un análisis profundo de los problemas de la red, peligros a los usuarios, así como los beneficios que se obtienen al conectar el neutro al sistema, de tal forma que se pueden realizar diseños que pueden ser utilizados con mayor seguridad, además de que el análisis auxilia en la obtención de maneras más rápidas de solución de algún problema ocasionado por la falta del neutro corrido o dar por hecho la falta de este, ya sea por robo o por el deterioro del conductor.

3.1 Tratamiento del neutro

El tratamiento del neutro en un sistema eléctrico es un aspecto que debe tenerse siempre presente para una adecuada protección del mismo. En los primeros desarrollos de las redes eléctricas, el neutro se aplicaba aislado, esto es, no conectado a tierra. Este tratamiento se justificaba argumentando que en caso de contacto fase a tierra, permitía seguir explotando el sistema o la instalación eléctrica durante un aceptable período de tiempo. A medida que las redes se fueron mallando y creciendo en extensión comenzaron a surgir limitaciones en esta filosofía, al aumentar las corrientes capacitivas a tierra. Estas razones llevaron a que en la segunda década del siglo XX se cambiara la tendencia hacia la conexión del neutro a tierra. Los posibles tratamientos del neutro son entonces:

- 1.- Aislado
- 2.- Rígidamente conectado a tierra
- 3.- Conectado a tierra por reactancia
- 4.- Conectado a tierra por resistencia
- 5.- Conectado a tierra en forma resonante

La conexión a tierra de forma resonante se realiza mediante reactancias ajustables por tomas. Cuando una fase del sistema toma contacto con tierra, fluye desde el contacto una corriente capacitiva hacia los condensadores parásitos y una corriente inductiva hacia la toma a tierra del transformador. Ambas corrientes están desfasadas 180° por lo que si se adapta la reactancia del neutro a la reactancia capacitiva de la red, la suma de ambas será nula y en el punto de contacto a tierra la corriente de falla será cero. Esta configuración es por tanto difícilmente aplicable en redes cuya topología cambia frecuentemente. Los aspectos generales de cada una de las configuraciones se resumen en la tabla 3.

El neutro resonante además de las limitaciones en la topología de la red presenta un costo elevado, no siendo por tanto aconsejable. Además de que es un sistema que no se aplica en México por lo que se deja fuera del análisis.

3.2 Puesta a tierra de los neutros de baja tensión

La finalidad de implementar los esquemas de conexión a tierra o “regímenes del neutro” es controlar los efectos de una falla de aislamiento y proteger a las personas, bienes y disponibilidad del servicio de energía eléctrica.

De acuerdo a la norma de distribución-Construcción-Instalaciones Aéreas en media y baja Tensión-Sistemas de Tierra de CFE el neutro y el sistema de tierra tienen la misma importancia que las fases energizadas y todos los neutros contiguos y bajantes de tierra deben estar interconectados independientemente que no correspondan al mismo circuito o área en baja tensión [10], razón por la que se menciona la forma de conexión de tierra y neutro para el análisis.

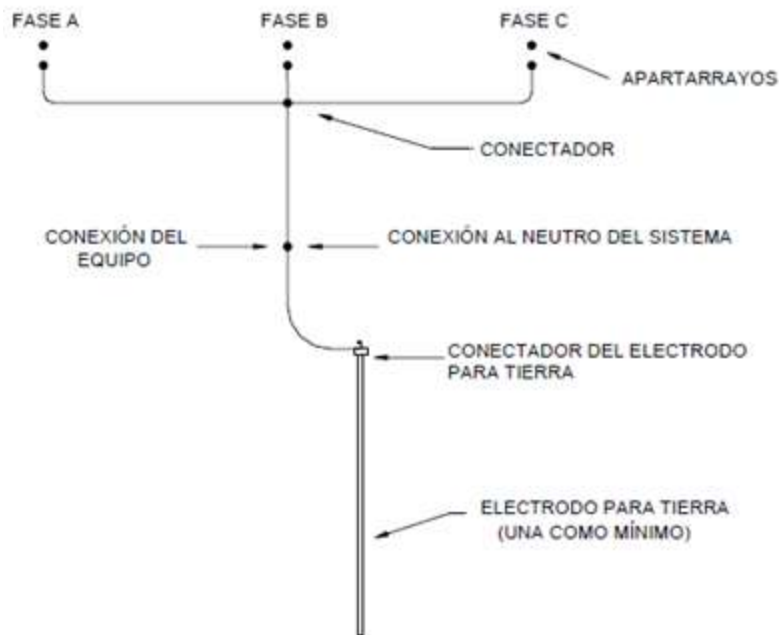


Figura 3.1 Diagrama esquemático de una bajante de tierra para equipo

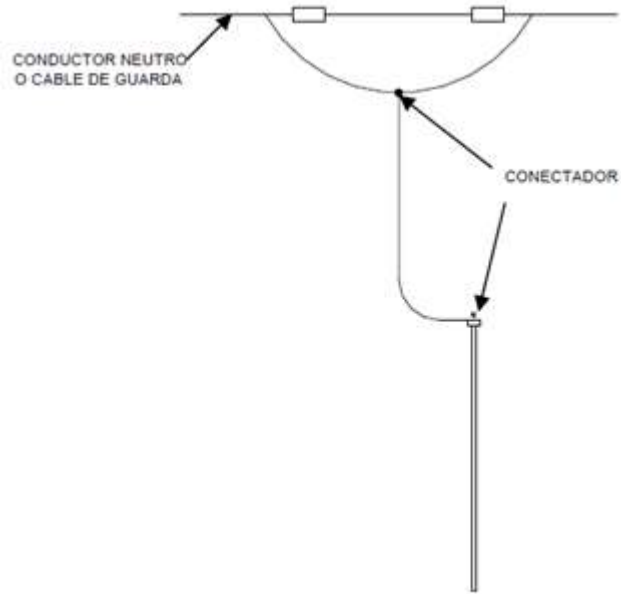


Figura 3.2 Conexión de la bajante de tierra al neutro

3.2.1 Neutro rígido a tierra

Es el sistema de puesta a tierra más utilizado en las redes públicas y privadas de baja tensión. El sistema con neutro rígido a tierra es donde se opera con una conexión directa del neutro a tierra y es recomendable en redes de tensión igual o superior a 110 KV así como en redes de baja tensión.

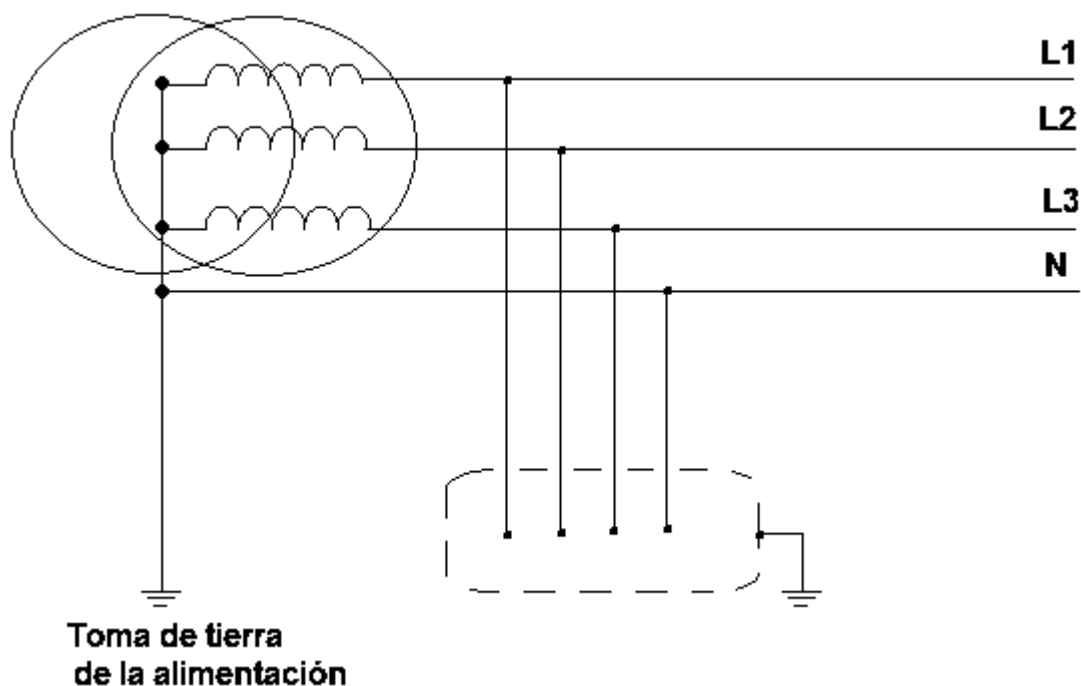


Figura 3.3 Sistema con electrodo separado de la empresa suministradora y el usuario

Este es un sistema donde la alimentación se pone a tierra en un único punto, pero la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas de la instalación del cliente están conectadas a tierra vía un electrodo separado que es independiente del electrodo de alimentación. El arreglo se ilustra en las Figuras 3.3.

En caso de fallo de aislamiento, se desconectan automáticamente toda o una parte de la alimentación del conjunto de los receptores. La desconexión es obligatoria al primer fallo. El conjunto de utilizaciones debe estar equipado con una protección diferencial instantánea.

La protección diferencial puede ser general o bien subdividida en función de los tipos y de la importancia de la instalación, la razón por la que se menciona la protección por medio de interruptores diferenciales es porque es el único método que protege contra contactos directos, es independiente de la longitud de los cables y permite varias tomas de tierra de la resistencia de difusión a tierra de las partes metálicas (del usuario), aunque esta

última disposición no es deseable, porque el conductor de protección ya no es una referencia de potencial única para todo el conjunto de la instalación.

Las principales aplicaciones de este esquema de conexión consiste en sistemas donde se quiera garantizar la seguridad para las personas sin que acarree un costo demasiado elevado, por esta razón este esquema es el empleado de forma exclusiva en todas las instalaciones domésticas, así como en las instalaciones industriales en las que no exista alguna prescripción especial que desaconseje su uso. Se trata de una opción bastante económica y razonablemente segura ya que además protege, como se mencionó antes, de contactos directos.

Una conexión sólida a tierra facilita de manera importante la operación de los dispositivos de protección contra sobretensiones, ya que estos equipos como pararrayos, apartarrayos, hilos de guarda, etc. necesitan una conexión a tierra para su correcta ejecución.

Hay que recordar también que la puesta a tierra es una conexión de seguridad humana que se diseña en los equipos eléctricos, electrónicos y otros sistemas para protegerlos de disturbios o transitorios por los cuales pudieran resultar dañados y en cuestiones de falla existe una corriente de fuga que busca un medio de conducción a tierra, y al no encontrar tierra, entonces el medio sería la persona, la cual correría aún más peligro si se encuentra en un espacio húmedo, por lo que la conexión a tierra es de suma importancia para la protección ante este suceso.

Un esquema simple es el que se muestra en la figura 3.4

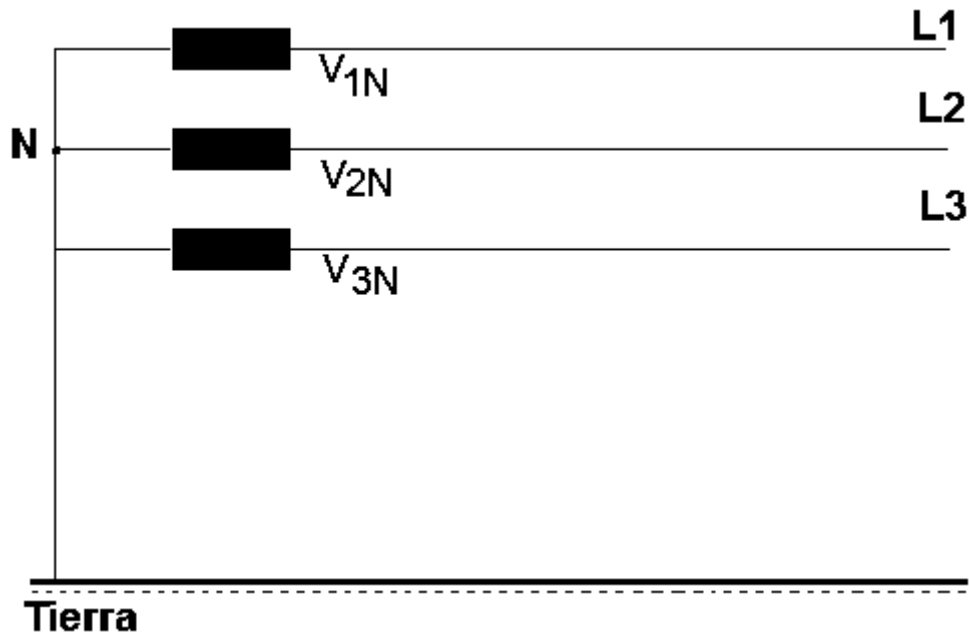


Figura 3.4 Neutro rígido

Entre las ventajas de este tipo de sistema de conexión se encuentran:

1. Facilidad de detección y localización de las fallas a tierra. Una puesta de tierra del sistema genera una corriente de falla que puede ser detectada con facilidad y que forma la base para localizar el punto de falla.
2. Limitación de las sobretensiones por fallas a tierra y transitorias por maniobras y rayos.

Entre las desventajas se encuentran las siguientes:

3. Fallas a tierras más energéticas. Se requieren protecciones de alta velocidad para limitar los efectos térmicos y mecánicos sobre los equipos.

3.2.2 Neutro aislado

En este sistema con neutro aislado es aquel que se opera sin una conexión intencional del neutro a tierra. El neutro puede estar aislado o unido por medio de una impedancia de alto valor (neutro impedante), algunas veces se proporciona una conexión a tierra de alta impedancia para simplificar el esquema de protección requerido para detectar la primera falla a tierra.

Aunque se puede decir que los sistemas aislados están puestos a través de sus capacitancias a tierra de los elementos del sistema.

Este esquema se encuentra en algunas instalaciones industriales y hospitales (quirófanos), circuitos de seguridad (iluminación) y en las industrias que disponen de transformadores de aislamiento, donde una interrupción de la alimentación puede tener consecuencias graves, debiéndose garantizar la continuidad del servicio o cuando la baja tensión de fallo reduce considerablemente los riesgos de incendio o de explosión.

La corriente de la primera falla adquiere valores despreciables, por lo tanto la tensión de contacto adquiere valores no peligrosos para las personas.

La corriente de una segunda falla (estando la primera) puede adquirir valores de corriente elevados según se la puesta a tierra de las partes metálicas estén interconectadas (tanto las partes metálicas como la de la parte suministradora uno solo) o separadas (condición donde el usuario tiene su propia tierra).

Debe darse alarma cuando ocurre la primera falla, la cual debe ser localizada y reparada. Debe monitorizarse continuamente la instalación por controlador Permanente de Aislamiento.

El disparo debe ocurrir a la segunda falla por los dispositivos de Protección contra sobrecorriente o diferenciales. Se requiere de personal especializado para la monitorización y mantenimiento de la red y para la localización y reparación de la falla.

Se necesita un elevado nivel de aislamiento de la red, debido a la sobretensión a la que están sometidos los aparatos al ponerse una fase a tierra, ya que las fases sanas adquieren el valor de la tensión de línea.

El disparo de una segunda falla debe ser considerado durante el proyecto de la instalación y verificarse indefectiblemente su actuación durante la puesta en servicio. Si la puesta a tierra de la subestación está separada de la instalación de las partes metálicas de los dispositivos del usuario, debe instalarse un dispositivo diferencial en la cabeza de la instalación.

Este tipo de conexión de **Neutro Aislado** se recomienda en redes de media tensión y en aquellas redes en las que la continuidad del suministro sea vital, una representación simple de este tipo de conexión se muestra en la figura 3.5

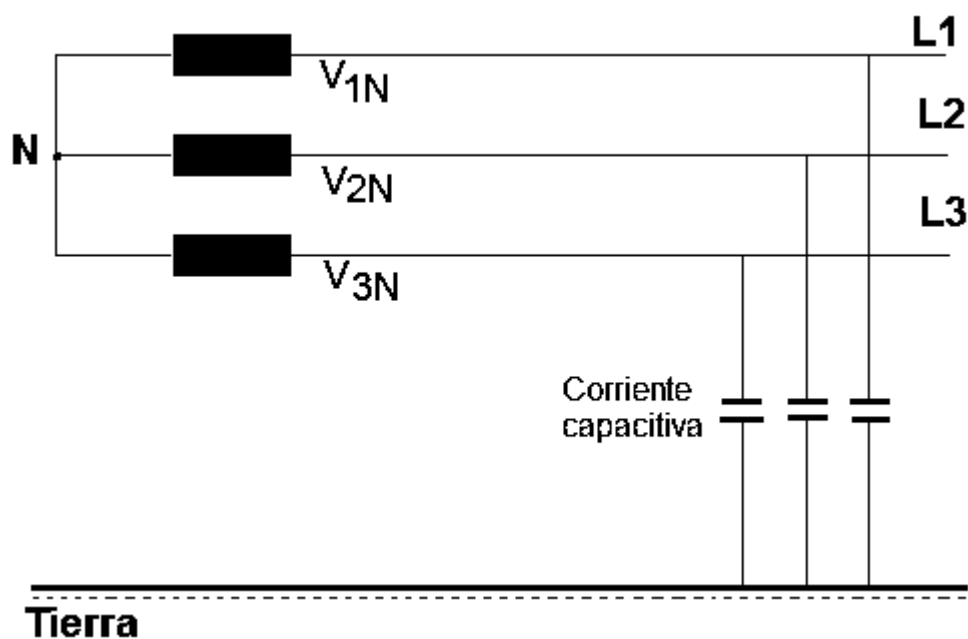


Figura 3.5 Neutro aislado

Algunas de las ventajas de tener este tipo de conexión son:

1. La primera falla a tierra solo causa una pequeña circulación de corriente capacitiva, por lo que se puede operar el sistema sin afectar a la continuidad del suministro.
2. No es necesario invertir en equipamiento para la puesta a tierra, pero si para el sistema de protección.

También se presentan desventajas como las mencionadas a continuación:

1. Mayor costo de aislamiento de los equipos a tierra.
2. Mayores posibilidades de sobretensiones transitorias por fallas con arco, resonancia, ferro resonancia, etc.
3. Su uso está restringido a sistemas de distribución de media tensión y requiere de esquemas de detección de falla a tierra.

3.2.3 Neutro conectado a través de una impedancia

El neutro conectado a través de una reactancia o resistencia se recomienda en redes de media tensión en caso de que la red este suficientemente mallada y en general en aquellos servicios donde la continuidad de suministro se garantice por distintas alimentaciones.

Este tipo de conexión puede ser de alta resistencia o de baja resistencia.

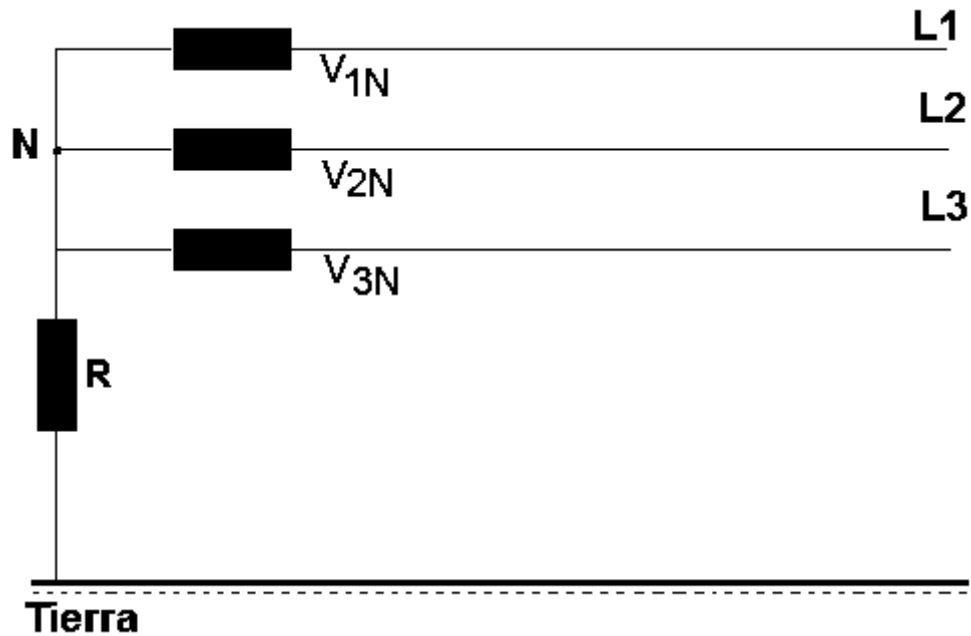


Figura 3.6 Neutro a través de una impedancia

Las ventajas y desventajas para baja resistencia son similares al sistema de neutro rígido a tierra, pero con efectos menos dañinos durante la falla al haberse reducido la corriente a tierra.

Cuando se tiene alta resistencia, se tienen las siguientes ventajas

1. No es necesario dar disparo instantáneo ante una primera falla a tierra.
2. Reducción a los daños por efecto térmico y electrodinámicos.
3. Reducción de las sobretensiones transitorias por maniobras y rayos.

Las desventajas de este tipo de conexión:

1. Comportamiento para fallas a tierra similar a neutro aislado. Fases sanas a tensión compuesta.

Después de haber mencionado cada uno de los esquemas de conexión del neutro, se consideraran algunos parámetros de los esquemas estos mismos, siendo los más comunes

los nombrados en la tabla 3.1, donde se muestran los beneficios o desventajas o inconvenientes de utilizar cada uno de los esquemas del neutro.

Tabla 3.1 Comparativa de esquemas de neutro

PARÁMETROS	A	B	C1	C2	D
	AISLADO	RIGIDAMENTE CONECTADO A TIERRA	CONECTADO A TIERRA POR REACTANCIA	CONECTADO A TIERRA POR RESISTENCIA	CONEXIÓN RESONANTE
Aislamiento	Completo	Reducido	Parcialmente reducido	Parcialmente reducido	Parcialmente reducido
Valor del contacto a tierra	Reducido	Inferior al trifásico	No inferior a 1/2 ó 1/3 del caso B	Reducido	Despreciable
Seguridad para el gradiente de tensión a tierra	Bueno excepto en faltas bifásicas	Bajo excepto si se utilizan conductores a tierra	Mejor que en B	Mejor que en B y C	Produce el menor gradiente
Protecciones	Difícil aplicación	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno con equipos especiales
Arcos a tierra	Buen comportamiento	No deseable	Aceptable con reactancia elevada	No deseable	No deseable
Efectos de fallas o averías	Exceso de tensión en las fases sanas en toda la red	Exceso de tensión en el punto de fallo	Igual que B salvo que la reactancia sea muy elevada	Igual que A	Igual que A
Fallas dobles	Aceptable	Aceptable	No deseable		
Influencia en equipos de radio	Elevada durante la avería	Mínima	Mayor que en B	Mayor que en B	Elevada durante la avería
Factor de disponibilidad	Si la red es corta la avería puede autoeliminarse. Sino la avería debe ser aislada	En cada avería debe ser aislada la parte afectada	Idem que B	Idem que B	Idem que B en la mayoría de los casos
Posibilidad de interconexión	Solamente con redes aisladas. Si no se necesita trafo de aislamiento	Buena	Buena	Buena	Idem que A
Interruptores automáticos	Capacidad de ruptura definida por la falla trifásica	Idem	Idem	Idem	Idem
Coste total	Alto	Bajo	Intermedio	Intermedio	Alto

CAPITULO 4

Pruebas y resultados

En este capítulo se presentan pruebas y resultados, basados en los esquemas del capítulo 3. También se incluye un apartado del análisis matemático que sirve para la comprobación de los resultados de los modelos desarrollados en el simulador PSpice.

Se presenta un sistema con cargas desbalanceadas para analizar el comportamiento del sistema con neutro y sin neutro.

Se realizara comparaciones de ambos métodos para verificar la certeza de ambos análisis.

El análisis se basa en la conexión estrella del transformador, debido a que tanto el suministro aéreo y subterráneo utilizan esta conexión para el suministro eléctrico.

4.1 Análisis matemático

El primario es conectado en delta con un voltaje de 13.8 KV, mientras que el secundario se conecta en estrella con neutro conectado a tierra con un voltaje de 220/127 V, por lo tanto el análisis realizado está enfocado a la forma en que se encuentra conectado el neutro, es decir, neutro aislado, neutro aterrizado sólidamente a tierra y cuando este permanece conectado a tierra por medio de una impedancia de alto o bajo valor, es decir neutro a través de una impedancia.

Se analiza el diagrama fasorial de la conexión en estrella, debido a que es aquí donde se utiliza el punto neutro, siendo la salida de los transformadores de secundario la última etapa de la distribución y que además el secundario está conectado en estrella, de esta forma la figura 4.1 muestra la línea trifásica de tres hilos y de cuatro hilos al agregarle el neutro.

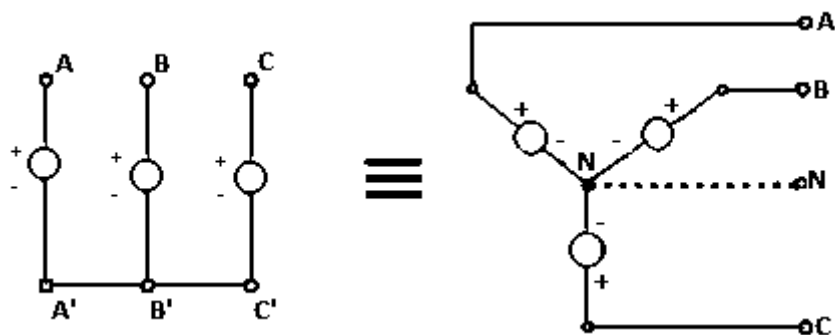


Figura 4.1. Conexión estrella

Colocando las magnitudes de la estrella como se observa en la figura 4.2, al aplicar la ley de corrientes de Kirchhoff (LCK) en el punto neutro de la estrella se observa que coinciden las corrientes de línea (I_A , I_B e I_C) y de fase (I_{AB} , I_{BC} e I_{CA}) mientras que las

tensiones de fase a fase (E_{AB} , E_{BC} y E_{CA}) y de fase a neutro (E_{AN} , E_{BN} y E_{CN}) son distintas, por lo tanto:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = \bar{I}_N \quad (1)$$

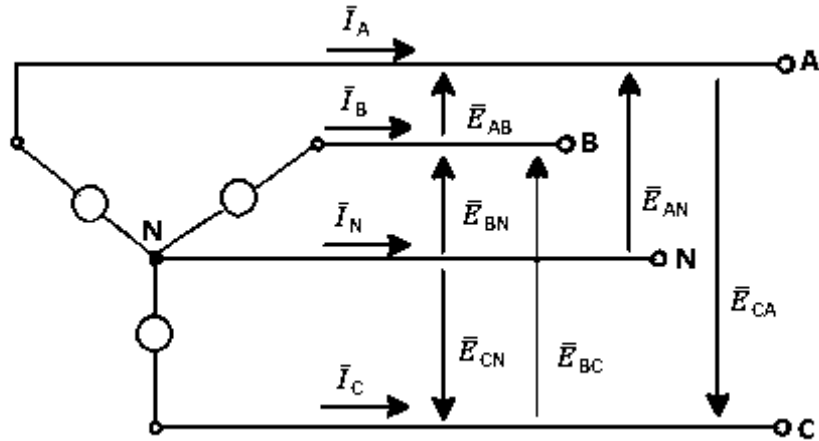


Figura 4.2. Conexión estrella con sus magnitudes.

De esta forma se obtiene de acuerdo a la figura 4.2, el diagrama fasorial mostrado en la figura 4.3, del cual se puede deducir la relación entre las tensiones de fase y de línea.

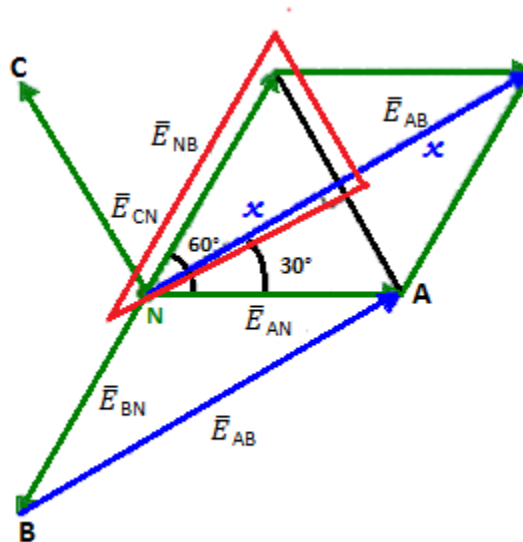


Figura 4.3. Diagrama fasorial de conexión estrella

Siguiendo con el análisis del triángulo rojo de la figura 4.3, puede observarse el valor de E_{AN} que es igual al valor de E_{NB} , de acuerdo al Teorema de Pitágoras se obtiene así lo siguiente:

$$\cos 30^\circ = \frac{x}{E_{AN}}$$

Despejando a x

$$x = E_{AN} \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E_{AN}$$

Obteniéndose ahora el valor de E_{AB} de acuerdo a la figura 4.3

$$E_{AB} = 2x$$

Sustituyendo valor de x

$$E_{AB} = 2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} E_{AN} \right)$$

$$E_{AB} = \sqrt{3} E_{AN}$$

Por lo tanto tomado en cuenta el desfaseamiento del diagrama fasorial de la figura 4.3:

$$\bar{E}_{AB} = \sqrt{3} E_{AN} \angle 30^\circ \quad (2)$$

Análogamente

$$\bar{E}_{BC} = \sqrt{3} E_{BN} \angle 270^\circ \quad (3)$$

$$\bar{E}_{CA} = \sqrt{3} E_{CN} \angle 150^\circ \quad (4)$$

Como puede verse, los sistemas de tensiones de línea y de fase difieren en módulo por un factor de raíz de tres y están desfasados 30° .

Tomando como origen de fases la tensión entre la fase A y el neutro del transformador, las tensiones de fase son:

$$\bar{V}_A = V \angle 0^\circ \quad (5)$$

$$\bar{V}_B = V \angle -120^\circ \quad (6)$$

$$\bar{V}_C = V \angle 120^\circ; \quad (7)$$

De esta forma para obtener el desplazamiento del neutro se tomaran solo las impedancias resultantes de las cargas conectadas en cada fase de la línea ya que la impedancia equivalente de cada devanado del secundario del transformador son muy pequeños en comparación de la resultante de los receptores.

La figura 4.4 ilustra la conexión del punto neutro de la estrella, n , en este caso representa el neutro de los receptores de la estrella, en ella, como se mencionó anteriormente puede observarse una línea trifásica de tres hilos que alimenta tres receptores pasivos en estrella, la situación de esta figura es la que se crea cuando se interrumpe la conexión con el punto neutro del transformador y n es la porción del conductor neutro al que quedan conectados todos los receptores cuando se interrumpe el conductor de neutro común, por lo tanto n y N no están unidos directamente por ningún conductor.

Para el análisis se indican las admitancias resultantes de los receptores conectados a las fases porque son más simples las fórmulas que utilizar las impedancias de cada una de las líneas, de esta forma $\bar{Y}_A$ representa la suma de las admitancias de todos los receptores conectados entre la fase A y el neutro n de la carga, $\bar{Y}_B$ representa la suma de las admitancias de todos los receptores conectados entre la fase B y el neutro n de la carga, de la misma forma $\bar{Y}_C$ pero entre la fase C y el neutro n de la carga.

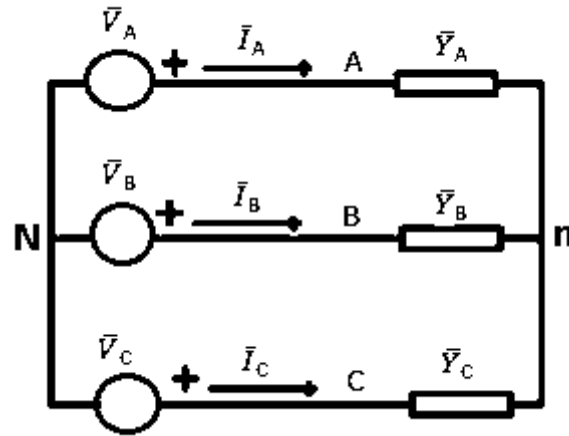


Figura 4.4. Línea trifásica de distribución de tres hilos

El equilibrio de las cargas tiene la ventaja de eliminar las sobretensiones que se puedan provocar por un eventual corte del conductor neutro. Materialmente n es la porción de conductor neutro al que quedan conectados todos los receptores cuando se interrumpe el conductor neutro común. Entonces n y N no están unidos directamente por ningún conductor.

De esta forma si se conoce el desplazamiento del neutro, los fasores de las tensiones de los receptores de las fases son respectivamente:

$$\bar{V}_{An} = \bar{V}_A - \bar{V}_{nN} \quad (8)$$

$$\bar{V}_{Bn} = \bar{V}_B - \bar{V}_{nN} \quad (9)$$

$$\bar{V}_{Cn} = \bar{V}_C - \bar{V}_{nN} \quad (10)$$

Dónde:

$\bar{V}_{nN}$ Representa el desplazamiento del neutro, es decir el fasor de la tensión entre el punto neutro de la carga y el neutro del transformador.

Como puede observarse en las ecuaciones de (8), (9) y (10), si $\bar{V}_{nN}$ es igual a cero entonces las tensiones de los receptores permanecerán equilibrados al igual que si lo están también en el secundario del transformador, por lo cual para estudiar los desequilibrios de las tensiones lo mejor es encontrar el desplazamiento del neutro.

De la figura 4.4 se deducen las corrientes de línea en función de las tensiones en las cargas y las admitancias de carga de la siguiente manera:

$$I_A = V_{An} Y_A \quad (11)$$

$$I_B = V_{Bn} Y_B \quad (12)$$

$$I_C = V_{Cn} Y_C \quad (13)$$

Con las corrientes anteriores se obtienen las tensiones de los receptores, de esta manera aplicando la Ley de corrientes de Kirchhoff en el neutro de la estrella:

$$\bar{V}_{An} \bar{Y}_A + \bar{V}_{Bn} \bar{Y}_B + \bar{V}_{Cn} \bar{Y}_C = 0 \quad (14)$$

Lo cual puede expresarse como:

$$\begin{aligned} (\bar{V}_A - \bar{V}_{nN}) \bar{Y}_A + (\bar{V}_B - \bar{V}_{nN}) \bar{Y}_B + (\bar{V}_C - \bar{V}_{nN}) \bar{Y}_C &= 0 \\ \bar{V}_A \bar{Y}_A - \bar{V}_{nN} \bar{Y}_A + \bar{V}_B \bar{Y}_B - \bar{V}_{nN} \bar{Y}_B + \bar{V}_C \bar{Y}_C - \bar{V}_{nN} \bar{Y}_C &= 0 \end{aligned}$$

De esta forma:

$$(\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) \bar{V}_{nN} = \bar{V}_A \bar{Y}_A + \bar{V}_B \bar{Y}_B + \bar{V}_C \bar{Y}_C$$

Despejando $\bar{V}_{nN}$:

$$\bar{V}_{nN} = \frac{\bar{V}_A \bar{Y}_A + \bar{V}_B \bar{Y}_B + \bar{V}_C \bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C} \quad (15)$$

Con las ecuaciones (8), (9), (10) y (15) puede encontrarse las tensiones de los receptores. Además de que dependiendo del valor de las admitancias, o sea, de la distribución de los receptores en las fases, estas tensiones pueden resultar muy alejadas de las tensiones nominales. De modo que si las cargas están totalmente equilibradas, entonces las admitancias complejas serán iguales, de esta forma:

$$\bar{Y}_A = \bar{Y}_B = \bar{Y}_C \quad (16)$$

Por lo tanto $\bar{V}_{nN}$ seria:

$$\bar{V}_{nN} = \frac{\bar{V}_{AN}\bar{Y}_A + \bar{V}_{BN}\bar{Y}_A + \bar{V}_{CN}\bar{Y}_A}{3\bar{Y}_A} \quad (17)$$

Agrupando términos:

$$\bar{V}_{nN} = \frac{\bar{Y}_A(\bar{V}_{AN} + \bar{V}_{BN} + \bar{V}_{CN})}{3\bar{Y}_A} \quad (18)$$

Si las tensiones en el transformador están equilibradas, entonces la suma vectorial de sus fasores vale cero y $\bar{V}_{nN}$ valdría también cero, de esta forma las tensiones receptoras siguen equilibradas aunque el neutro no exista.

$$\bar{V}_A + \bar{V}_B + \bar{V}_C = 0$$

Por lo tanto si la carga está realmente equilibrada aunque el neutro se interrumpa no se producirá ninguna sobretensión.

Por otro lado en el alumbrado público las luminarias suelen ser idénticas, teniéndose en sí que todos los receptores son iguales, por lo que el cálculo del desplazamiento del neutro y, por lo tanto, de las sobretensiones que pueden producirse por la interrupción del

conductor neutro se calcularía de una forma fácil con solo contar o colocar el número de luminarias de cada fase, es decir:

$$\bar{V}_{nN} = V \frac{n_A \angle 0^\circ + n_B \angle -120^\circ + n_C \angle -240^\circ}{n_A + n_B + n_C} \quad (19)$$

Donde n_A, n_B y n_C representan el número de luminarias en su respectiva fase.

Debe tenerse en cuenta que la tensión más alta que puede alcanzarse en los receptores de una fase por corte del neutro es la tensión entre fases es decir, la tensión compuesta. De acuerdo a la figura 4.4 si se anula la impedancia de alguna de las fases, por ejemplo la A, lo que equivale a cortocircuitar la carga de esa fase, las tensiones de los receptores de las otras dos son las compuestas.

$$\begin{aligned} \bar{V}_{Bn} &= \bar{V}_B - \bar{V}_{nN} = \bar{V}_B - \bar{V}_A = \bar{V}_{BA} \\ \bar{V}_{Cn} &= \bar{V}_C - \bar{V}_{nN} = \bar{V}_C - \bar{V}_A = \bar{V}_{CA} \end{aligned}$$

4.1.1 Con neutro de la carga al neutro del transformador

Ahora si se tiene conectado el punto neutro de la carga n al punto neutro N del transformador como se muestra en la figura 4.5.

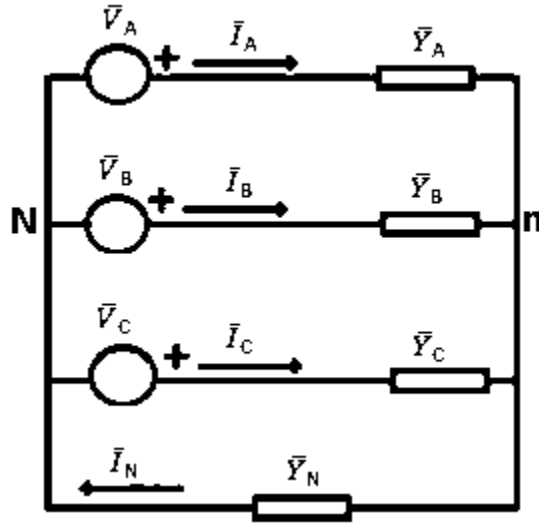


Figura 4.5. Línea trifásica de distribución de cuatro hilos

Para encontrar el desplazamiento del neutro se toma N como referencia y considerando ahora una admitancia $\bar{Y}_N$ que representa la admitancia del conductor neutro, se aplica el método de nodos para obtener el nuevo $\bar{V}_{nN}$ y de esta forma se tiene:

$$(\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \bar{Y}_N)\bar{V}_{nN} = \bar{V}_A\bar{Y}_A + \bar{V}_B\bar{Y}_B + \bar{V}_C\bar{Y}_C \quad (20)$$

Por lo tanto:

$$\bar{V}_{nN} = \frac{\bar{V}_A\bar{Y}_A + \bar{V}_B\bar{Y}_B + \bar{V}_C\bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \bar{Y}_N} \quad (21)$$

Como puede observarse ahora se tiene una admitancia más en comparación del análisis anterior, esta admitancia $\bar{Y}_N$ del conductor neutro es muy alta en comparación con las admitancias de los receptores debido a que la admitancia es el inverso de la impedancia y la impedancia en el neutro es más pequeña que en los receptores, por lo que el solo hecho de agregar este conductor garantiza un desplazamiento de neutro mucho menor, razón por la cual las tensiones de los receptores son más próximas a las de equilibrio.

Si se ponen a tierra los puntos del neutro n y N , entonces lo que se obtiene es un sistema más equilibrado, debido a que el módulo de la impedancia del neutro será aún más pequeña, lo que equivale a obtener así un valor mucho más alto en la admitancia $\bar{Y}_N$, disminuyendo aún más el desplazamiento del neutro y por lo tanto se tiene un sistema muy cerca o en equilibrio de los receptores.

Cuando se conecta a tierra los dos puntos neutros, de acuerdo a la ecuación (21) la admitancia $\bar{Y}_N$ siempre es mayor que si solo se conectara el neutro, favoreciéndose así el equilibrio de las tensiones de los receptores. De hecho si solo se cortara el conductor neutro entre los puntos n y N de forma que ambos permanezcan bien conectados a tierra, $\bar{Y}_N$ no se anularía, pues se encontraría la admitancia de la tierra, lo que limitaría así el desplazamiento del neutro, y por lo tanto de las sobretensiones. Sin embargo esto depende mucho de la cualidad conductora del terreno y de la calidad de las puestas a tierra, por otro lado el hecho de solo conectar N o n a tierra no influye en el desplazamiento del neutro.

Otro dato importante es cuando se cortan las fases, si por ejemplo se cortara la fase A, entonces el desplazamiento del neutro se encuentra de la misma forma con el método de nodos y para este ejemplo sería:

$$(\bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \bar{Y}_N)\bar{V}_{nN} = \bar{Y}_B + \bar{V}_C\bar{Y}_C$$

$$\bar{V}_{nN} = \frac{\bar{V}_B\bar{Y}_B + \bar{V}_C\bar{Y}_C}{\bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \bar{Y}_N}$$

Y para encontrar los valores de las tensiones en los receptores solo bastaría con las ecuaciones (9) y (10). De nuevo con el conductor neutro se asegura un escaso desplazamiento del neutro que como ya se mencionó antes debido al alto valor del modulo $\bar{Y}_N$, por lo que se mantiene un alto grado de equilibrio de las tensiones de las fases, y por lo tanto, los receptores de B y C siguen funcionando con normalidad. De la misma forma si se cortaran dos fases, la tensión de los receptores de la que queda sería la simple de esa fase. Y si faltara el neutro que une a n y N solo habría que quitar $\bar{Y}_N$ de la ecuación.

Es más recomendable que el módulo de la impedancia sea pequeño para aumentar el valor de la admitancia $\bar{Y}_N$, el método del análisis matemático puede servir para sistemas de neutro conectado por medio de una impedancia, solo basta con agregar un valor más en $\bar{Y}_N$, sin embargo si se conecta el neutro a tierra pero por medio de una impedancia de alto valor se tendrá una admitancia pequeña y se obtendrá un desequilibrio más elevado debido a que el desplazamiento del neutro será más grande, como en el caso del neutro aislado.

4.1.2 Corriente del neutro

Al presentarse un desbalance importante en las cargas, además del voltaje observado en el neutro también se presentara una corriente I_n , esta corriente es igual a cero cuando el sistema se encuentra balanceado con respecto a las cargas. Por lo general en los circuitos de corriente alterna el voltaje y la forma de onda de la corriente se encuentran en condiciones senoidales con amplitud y frecuencia constantes, sin embargo en menor o mayor medida las centrales eléctricas introducen distorsión en los circuitos de corriente alterna por lo que se genera distorsión de la forma de onda fundamental del voltaje y la corriente.

Los armónicos son generados por cargas no lineales que actúan como fuentes de corrientes que inyectan armónicos a la red.

Los armónicos son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la fundamental, estas componentes armónicas presentan problemas al sistema eléctrico como son el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro y deterioro en la calidad del suministro de la energía eléctrica, además de un mal funcionamiento de muchos equipos que fueron diseñados para una mínima distorsión armónica.

Por lo anterior es importante ver el comportamiento armónico de la corriente ya que al estar conectadas cargas no lineales a la red eléctrica estas cargas absorberán corrientes con un alto contenido armónico.

De acuerdo a la figura 4.2 la corriente en la fase A se describe mediante la expresión:

$$I_A = I_{A1} + \sum_{h=2k+1}^{\infty} I_{Ah} \quad (23)$$

o de la siguiente forma

$$I_A = \sqrt{2}I_{s1}\text{sen}(w_1t - \emptyset_1) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh}\text{sen}(w_h t - \emptyset_h) \quad (24)$$

donde $k=1,2,3,\dots,\infty$

Al suponer que la fuente trifásica es balanceada, entonces las corrientes B y C desplazadas respectivamente 120° y 240° son:

$$I_B = \sqrt{2}I_{s1}\text{sen}(w_1t - \emptyset_1 - 120^\circ) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh}\text{sen}(w_h t - \emptyset_h - 120^\circ h) \quad (25)$$

$$I_C = \sqrt{2}I_{s1}\text{sen}(w_1t - \emptyset_1 - 240^\circ) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh}\text{sen}(w_h t - \emptyset_h - 240^\circ h) \quad (26)$$

Sustituyendo las ecuaciones (24), (25) y (26) en (1)

$$I_N = 3 \sum_{h=3(2k-1)}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh}\text{sen}(w_h t - \emptyset_h) \quad (27)$$

En donde puede observarse la presencia de armónicos múltiplos de la tercera armónica, dominando así el tercer armónico todos los componentes armónicos, por lo tanto:

$$I_n \approx 3I_{s3} \quad (28)$$

Este resultado ha llevado a cambios en los códigos de las instalaciones eléctricas, que ahora estipulan que el conductor neutro debe ser capaz por lo menos soportar tanta corriente como los conductores de línea. De hecho si la corriente de línea es altamente discontinua la corriente en el neutro puede ser tan grande como [15],

$$I_n = \sqrt{3}I_{linea} \quad (29)$$

4.2 Pruebas del método matemático

Se presentan ejemplos del método del análisis matemático, donde como voltaje nominal se toma el valor de 120 volts con su respectivo desfaseamiento y en su forma compleja con su valor real e imaginario por ser más fácil el cálculo, de la misma forma para las cargas se mostrara su valor como impedancia (Z) y admitancia (Y) que para los cálculos se utilizara la admitancia. Por lo tanto los valores son:

Tabla 4.1 valores de voltaje a utilizar en su forma compleja y fasor

Valor de voltaje con fasor en volts	Valor de voltaje en forma compleja en volts
En A 120 $\angle 0^\circ$	120
En B 120 $\angle -120^\circ$	-60-103.92i
En C 120 $\angle 120^\circ$	-60+103.92i

Tabla 4.2. Valor de impedancia y admitancia

Valor de Z en ohm	Valor en forma de Y
240	0.0042
120	0.0083
80	0.0125
60	0.0167
34.3	0.0292
30	0.00333
21.8	0.0459
20	0.05
15	0.0667
12.63	0.0792
0.04	25

El valor de 0.04ohms se tomó del valor de un cable del laboratorio donde se midió su resistencia para la obtención del valor de tierra.

Para agilizar la obtención de los resultados se utilizó el MATLAB y de acuerdo a la ecuación (15) y (21), el archivo a utilizar es el siguiente:

```
%neutro a tierra por una impedancia
%valores de R
function Vn=neutro(a,Ya,Yb,Yc,Yn,Va,Vb,Vc)
Ya=1/240;
Yb=1/240;
Yc=1/240;
Yn=1/12.63;
a=cos(120*pi/180)+1i*sin(120*pi/180);%forma polar de un número complejo
abs(a);
angle(a)*180/pi;
Va=120;
Vb=120*a';
abs(Vb);
angle(Vb)*180/pi;
Vc=120*a;

Vn=( (Va*Ya+Vb*Yb+Vc*Yc) / (Ya+Yb+Yc+Yn) );
abs(Vn)%magnitud de Vn
angle(Vn)*180/pi %fase de Vn
```

Del archivo anterior solo hay que cambiar por los valores requeridos. Puede observarse también que es para la prueba con neutro a través de una impedancia, y el valor que estará cambiando será el de Y_n . Para realizar los cálculos para neutro sólidamente a tierra basta con poner el valor de 0.04 en Y_n , y finalmente para neutro aislado solo hay que quitar este valor.

4.2.1 Prueba con neutro aislado

De acuerdo a la ecuación (15):

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125}$$

$$\bar{V}_{nN} = 48 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292}$$

$$\bar{V}_{nN} = 79.99 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459}$$

$$\bar{V}_{nN} = 92.33 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792}$$

$$\bar{V}_{nN} = 102.86 \angle 120^\circ$$

4.2.2 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra

De acuerdo a la ecuación (21) y agregando el valor de tierra

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 25}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 25}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0.04 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 25}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0.1198 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459 + 25}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0.1998 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792 + 25}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0.3588 \angle 120^\circ$$

4.2.3 Prueba con neutro a través de una impedancia

Los valores de impedancia de neutro por los cuales se conectara son los siguientes, donde se muestra también su valor en admitancia.

Tabla 4.3. Valor de impedancia y admitancia de prueba con neutro a través de una impedancia

Valor de Z en ohm	Valor en forma de Y
120	0.0083
80	0.0125
60	0.0167
30	0.0333
21.8	0.0459
12.63	0.0792

Se utiliza la ecuación (21)

Con $Z = 12.63\Omega$

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.0792}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.0792}$$

$$\bar{V}_{nN} = 9.99 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 0.0792}$$

$$\bar{V}_{nN} = 25.7 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459 + 0.0792}$$

$$\bar{V}_{nN} = 37.52 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792 + 0.0792}$$

$$\bar{V}_{nN} = 54 \angle 120^\circ$$

Con $Z = 21.8\Omega$

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.0459}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.0459}$$

$$\bar{V}_{nN} = 14.99 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 0.0459}$$

$$\bar{V}_{nN} = 35.97 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459 + 0.0459}$$

$$\bar{V}_{nN} = 50 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792 + 0.0459}$$

$$\bar{V}_{nN} = 67.48 \angle 120^\circ$$

Con $Z = 30\Omega$

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.05 + 0.0333}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0^\circ$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.0333}$$

$$\bar{V}_{nN} = 18.46 \angle 12^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 0.0333}$$

$$\bar{V}_{nN} = 42.34 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459 + 0.0333}$$

$$\bar{V}_{nN} = 57.17 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792 + 0.0333}$$

$$\bar{V}_{nN} = 74.49 \angle 120^\circ$$

Con $Z = 60\Omega$

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.0167}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.0167}$$

$$\bar{V}_{nN} = 26.67 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 0.0167}$$

$$\bar{V}_{nN} = 55.37 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459 + 0.0167}$$

$$\bar{V}_{nN} = 70.61 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792 + 0.0167}$$

$$\bar{V}_{nN} = 86.4 \angle 120^\circ$$

Con $Z = 80\Omega$

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.0125}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.0125}$$

$$\bar{V}_{nN} = 30 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 0.0125}$$

$$\bar{V}_{nN} = 59.99 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459 + 0.0125}$$

$$\bar{V}_{nN} = 75.03 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792 + 0.0125}$$

$$\bar{V}_{nN} = 90 \angle 120^\circ$$

Con $Z = 120\Omega$

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.0083}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.0083}$$

$$\bar{V}_{nN} = 34.29 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 0.0083}$$

$$\bar{V}_{nN} = 65.44 \angle 120^\circ$$

4.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 21.8Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0459))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0459 + 0.0083}$$

$$\bar{V}_{nN} = 80.02 \angle 120^\circ$$

5.- Con cargas de 240Ω en A y B con C de 12.63Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0792))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0792 + 0.0083}$$

$$\bar{V}_{nN} = 93.92 \angle 120^\circ$$

En cada uno de los ejemplos con neutro sólidamente aterrizado a tierra y neutro conectado por medio de una impedancia se observa claramente la diferencia del desplazamiento del neutro.

4.2.4 Prueba con neutro sólidamente aterrizado a tierra con un valor alto de tierra.

En CFE la resistencia de tierra debe ser máximo de 25Ω en tiempo de secas y cuando el terreno este húmedo este debe tener un valor de 10Ω como máximo y de acuerdo a IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding para un buen sistema de tierra y en subestaciones de distribución pequeñas el rango aceptable es de 1Ω a 5Ω dependiendo de las condiciones locales. Razón por la cual se tomara de ejemplo un valor de 5Ω por ser un valor intermedio a los mencionados.

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.2}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.2}$$

$$\bar{V}_{nN} = 4.53 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0292 + 0.2}$$

$$\bar{V}_{nN} = 12.63 \angle 120^\circ$$

Si se aumenta el valor de tierra a 25Ω , siendo este un valor superior al sugerido, se obtiene lo siguiente:

1.- Con cargas balanceadas de 240Ω en A, B y C

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0042))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0042 + 0.04}$$

$$\bar{V}_{nN} = 0$$

2.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 80Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0125))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.04}$$

$$\bar{V}_{nN} = 16.46 \angle 120^\circ$$

3.- Con cargas de 240Ω en A, B y C de 34.3Ω

$$\bar{V}_{nN} = \frac{120(0.0042) + ((-60 - 103.92i)(0.0042)) + ((-60 + 103.92i)(0.0292))}{0.0042 + 0.0042 + 0.0125 + 0.04}$$

$$\bar{V}_{nN} = 38.7 \angle 120^\circ$$

Puede observarse como el valor de tierra influye mucho para evitar desbalances más grandes. Con lo que se comprueba como un adecuado sistemas de tierra es de gran ayuda para evitar en menor grado la diferencia de potencial en el neutro, ya que si existe un gran desbalance en alguna de las líneas de suministro entonces este mismo se verá reflejado en el voltaje hacia al neutro y la corriente que circula por el mismo.

4.3 Simulaciones

Para la realización del análisis por medio de la simulación se utilizó PSpice. Para observar el valor de desplazamiento del neutro se agregó un medidor de voltaje, el cual se representa al correr el programa mostrándose la señal en una ventana donde el valor mostrado será en su valor pico, por lo que para obtener su valor rms se dividirá el resultado entre $\sqrt{2}$, los circuitos desarrollados son los siguientes:

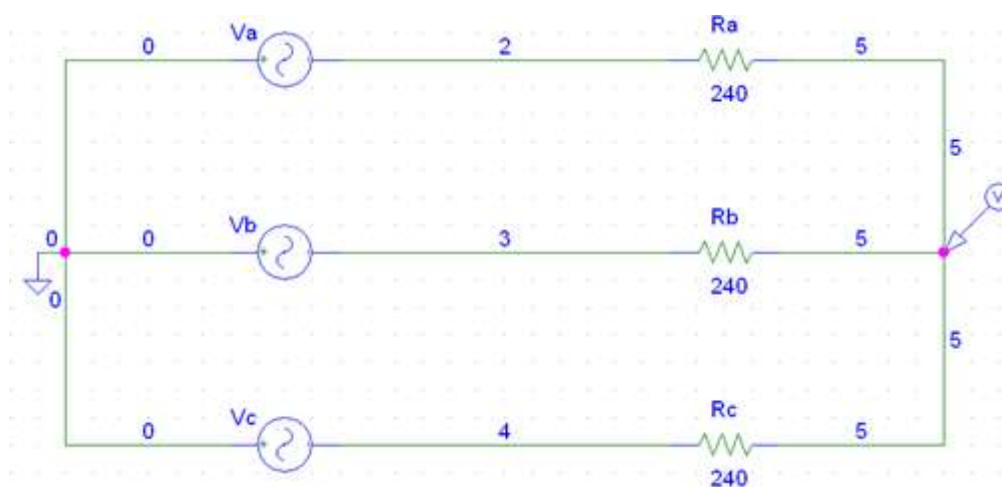


Figura 4.6. Esquema para el análisis de neutro aislado en PSpice

El esquema de la Figura 4.6 se utilizara para obtener el análisis de neutro aislado, de acuerdo a lo desarrollado en el método matemático el valor que se estará variando será únicamente el de R_c .

Para el análisis del neutro conectado sólidamente a tierra se utiliza el esquema de la figura 4.7, de la misma forma que en el esquema de la figura 4.6 solo se modifica el valor de R_c .

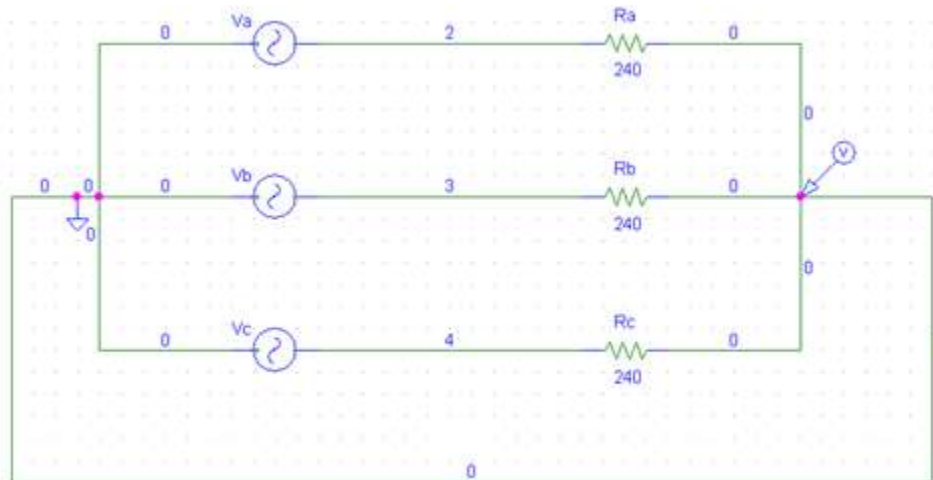


Figura 4.7. Esquema para el análisis de neutro sólidamente a tierra en PSpice

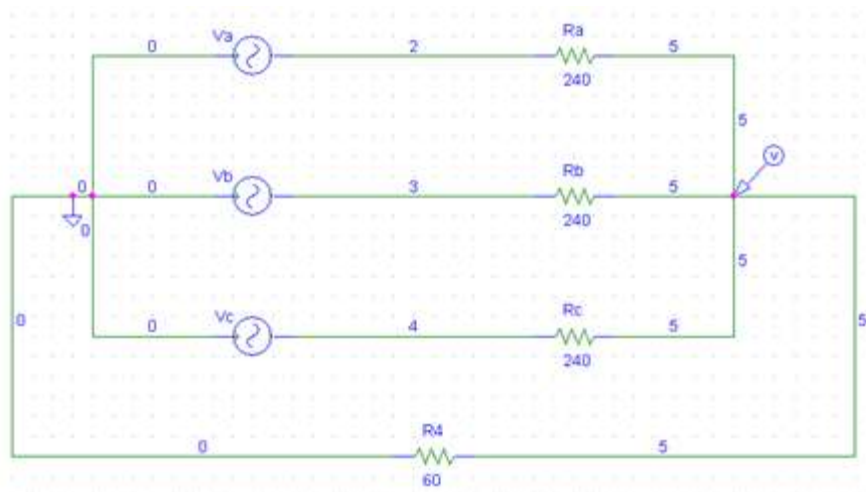


Figura 4.8. Esquema para el análisis de neutro a través de una impedancia en PSpice

El esquema de la Figura 4.8 se utiliza para obtener el análisis de neutro a través de una impedancia y el valor que se estará variando será únicamente el de Rc y de R4.

4.3.1 Prueba con neutro aislado

Solo se muestran los resultados en grafica de algunos ejemplos pero los resultados totales se muestran en la tabla 4.4

Tabla 4.4. Resultados de simulación en PSpice con neutro aislado

Neutro aislado	
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice
Carga balanceada (240 Ω en a, b y c)	Vn=0V
Carga en a y b de 240 Ω y 80 Ω en c	Vn=48V
Carga en a y b de 240 Ω y 34.3 Ω en c	Vn=79.99V
Carga en a y b de 240 Ω y 21.8 Ω en c	Vn=92.33V
Carga en a y b de 240 Ω y 12.63 Ω en c	Vn=102.86V

De manera balanceada se obtiene la siguiente respuesta de acuerdo al esquema de la de la figura 4.6:

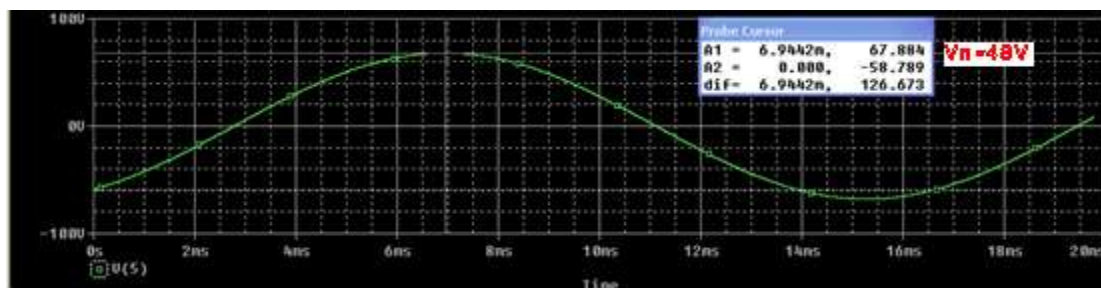


Figura 4.9. Respuesta en PSpice con carga de 80 Ω en Rc y Neutro aislado

Ahora aplicando el desbalance en Rc de 21.8 Ω se obtiene:

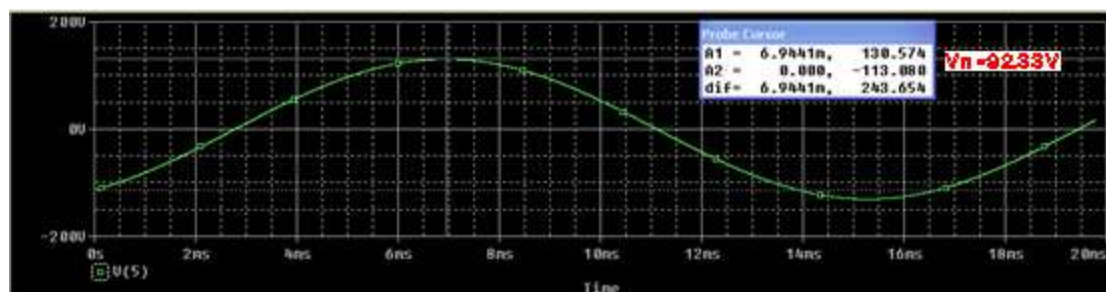


Figura 4.10. Respuesta en PSpice con carga de 21.8 Ω en Rc y Neutro aislado

De acuerdo a los valores obtenidos se observa el desplazamiento del neutro que se va haciendo más grande conforme se aumenta el desbalance en alguna de las fases, por lo que un desbalance tan grande no es seguro para este tipo de sistema

4.3.2 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra

Tabla 4.5. Resultados de simulación en PSpice con neutro sólidamente a tierra

Neutro sólidamente a tierra	
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_n=0V$

De manera balanceada se obtiene la siguiente respuesta de acuerdo al esquema de la de la figura 4.7:

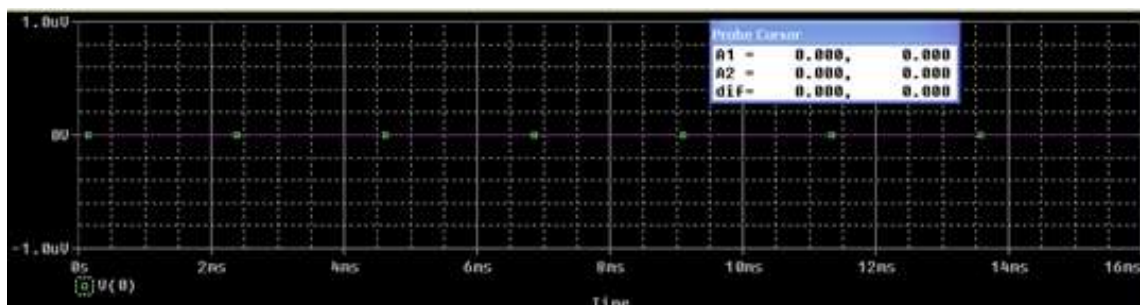


Figura 4.11. Respuesta en PSpice con cargas balanceadas y Neutro sólidamente a tierra

Ahora aplicando el desbalance en R_c de 12.63Ω se obtiene:

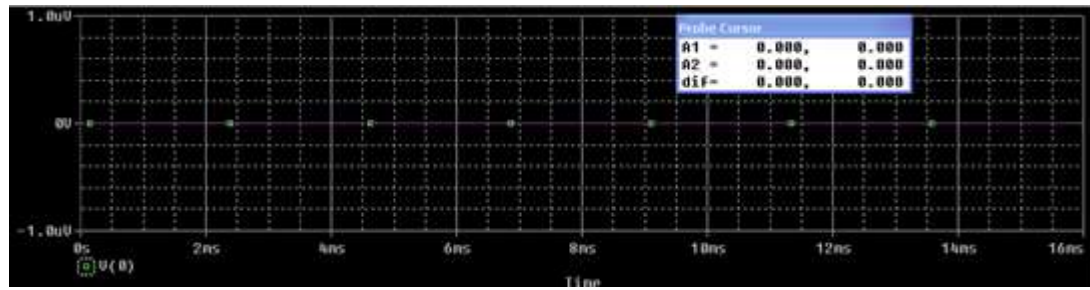


Figura 4.12. Respuesta en PSpice con carga de 12.63Ω en RC y sólidamente a tierra

Como puede observarse en los resultados, mientras esté conectado un sistema de tierra al neutro y a pesar de que haya desbalance esta garantiza estabilidad a la red.

4.3.2.1 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra con falso contacto

Ahora bien para simular un falso contacto en PSpice se procedió a realizar el esquema de la figura 4.13 donde se utilizaron dos contactos en paralelo, donde el primero abre en un tiempo de 15ms y el segundo cierra en un tiempo de 16ms.

El primer ejemplo a resolver fue el de desbalance de carga en $R_c=80\Omega$, la respuesta obtenida se muestra en la figura 4.14.

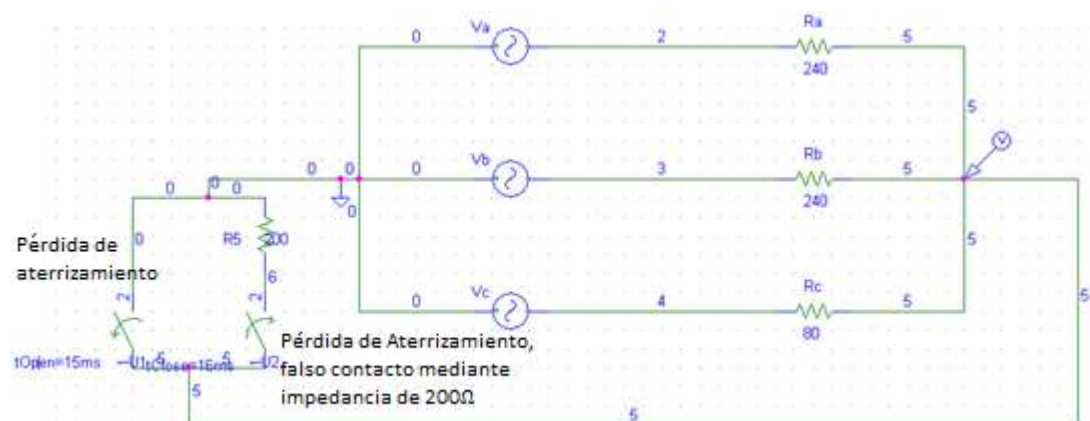


Figura 4.13. Esquema en PSpice con carga de neutro conectado sólidamente a tierra con $R_c=80\Omega$



Figura 4.14. Respuesta en PSpice con carga de 80Ω en R_c y sólidamente a tierra

Como puede observarse en la figura 4.14 para el primer ciclo no se tiene el falso contacto, una vez abierto el interruptor el voltaje cae considerablemente, al abrir el segundo

interruptor se eleva el voltaje de manera no tan severa. La razón por la que se utilizó una resistencia de valor de 200Ω después del segundo interruptor fue escogido como valor intermedio, puesto que un valor aun mas pequeño de resistencia al abrirse el interruptor incrementaría de manera muy rápida el valor de V_n y al llegar a su valor pico no se observaría diferencia entre un ciclo y otro. Al poner un valor muy alto en el orden de mega-ohm, y kilo-ohm se alcanzarían valores pico mucho mayores y el pequeño transitorio no se vería.

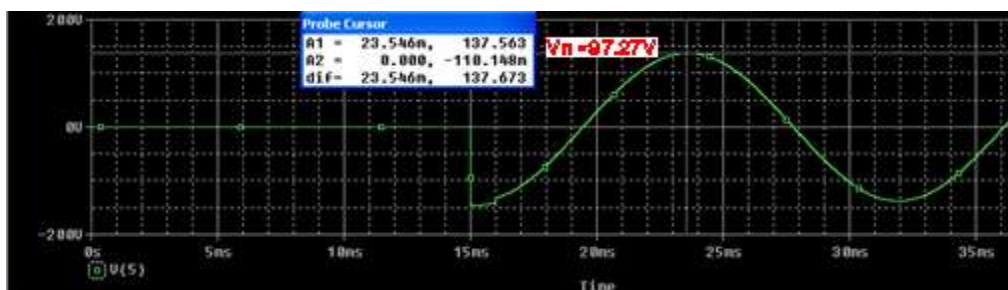


Figura 4.15. Respuesta en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y sólidamente a tierra

A continuación se muestran los valores totales obtenidos en todas las pruebas realizadas en PSpice, mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 4.6. Resultados de simulación en PSpice con neutro sólidamente a tierra con falso contacto

Neutro sólidamente a tierra	
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_n=38.7V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_n=70.57V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_n=84.5V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_n=97.27V$

4.3.3 Prueba con neutro a través de una impedancia

De acuerdo al diagrama de la figura 4.8 se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4.7. Resultados de simulación en PSpice con neutro a través de una impedancia

Neutro a través de una impedancia de 12.63Ω	
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=9.99V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=25.7V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=37.52V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=54V
Neutro a través de una impedancia de 21.8Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=14.99V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=35.97V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=50V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=67.48V
Neutro a través de una impedancia de 30Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=18.46V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=42.34V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=57.17V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=74.49V
Neutro a través de una impedancia de 60Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=26.67V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=55.51V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=70.62V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=86.41V
Neutro a través de una impedancia de 80Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=29.99V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=59.99V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=75.03V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=90V
Neutro a través de una impedancia de 120Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=0V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=34.28V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=65.44V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=80.03V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	Vn=93.92V

De acuerdo al diagrama de la figura 4.8 y utilizando un valor de $R_4=60\Omega$ y con $R_c=80\Omega$ se obtuvo la siguiente respuesta:

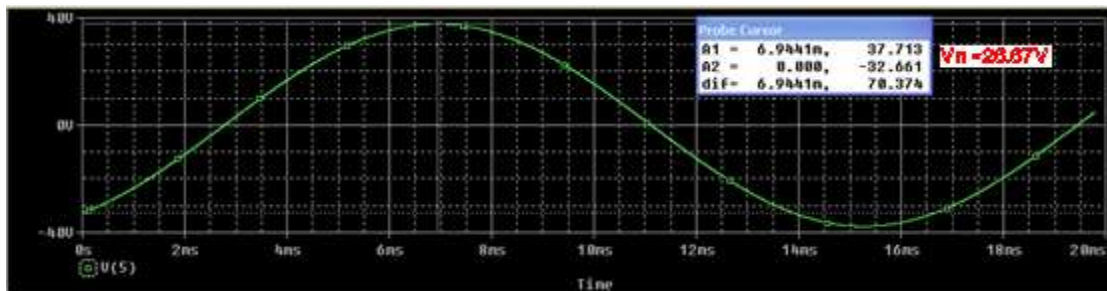


Figura 4.16. Respuesta en PSpice con carga de 80Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω

Ahora con una valor para R_4 de 120Ω y R_c de 12.63Ω

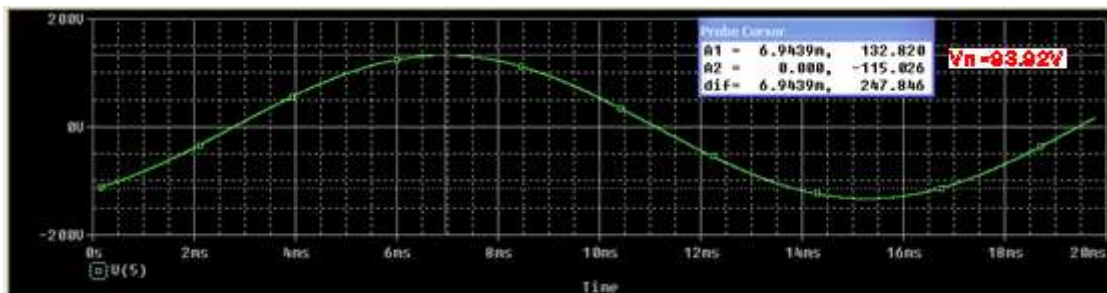


Figura 4.17. Respuesta en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 120Ω

De acuerdo a los resultados obtenidos y que se observan en la tabla 4.7 puede verse cómo mientras más grande es el valor de impedancia por medio del cual está el neutro a tierra, hay un valor de desplazamiento de neutro mayor conforme el desbalance es mayor. Por lo que es más aconsejable tener un valor de tierra o impedancia conectado a este muy pequeño para evitar caídas de voltaje en el neutro muy grandes.

4.3.3.1 Prueba con neutro a través de una impedancia con falso contacto

El esquema que se utilizó para la representación de la conexión de neutro a través de una impedancia con falso contacto a tierra es el mostrado en la figura 4.18. Para representar el falso contacto se utilizaron dos interruptores en paralelo, donde el primero abre en un tiempo de 15ms y el segundo cierra en 16ms y con una resistencia de 200Ω . La razón por la que se eligió $R5=200\Omega$ es por lo mismo que el esquema para el neutro conectado sólidamente a tierra con falso contacto.

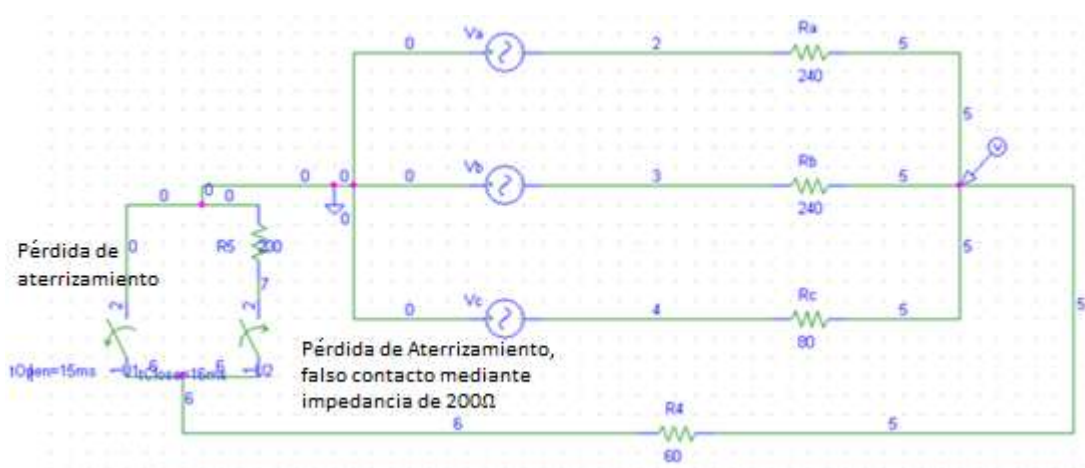


Figura 4.18. Esquema en PSpice con carga de 80Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω

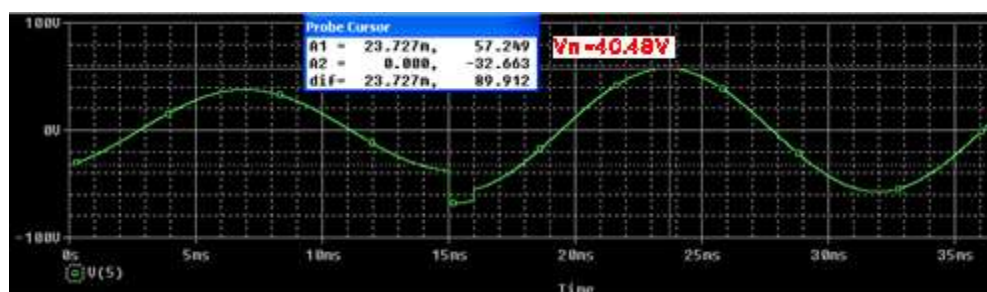


Figura 4.19. Respuesta en PSpice con carga de 80Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω

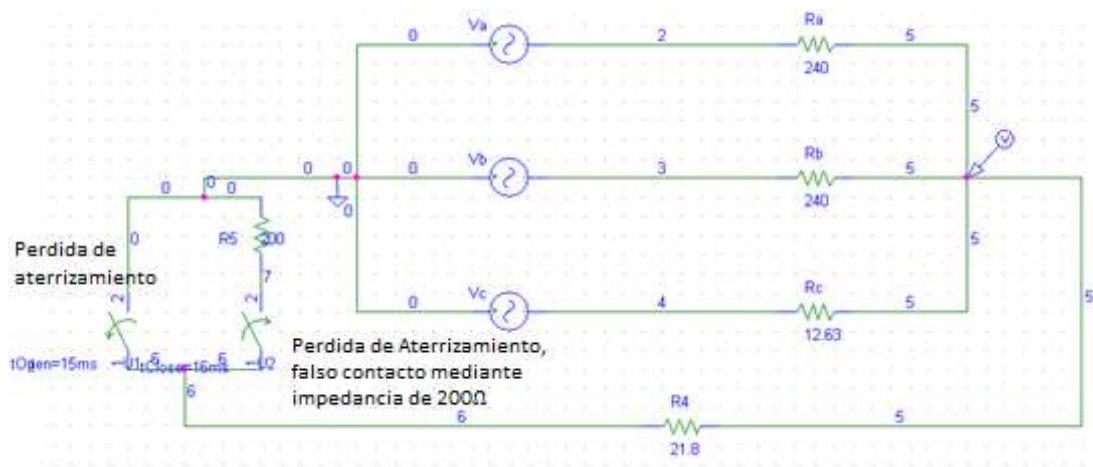


Figura 4.20. Esquema en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 21.8Ω

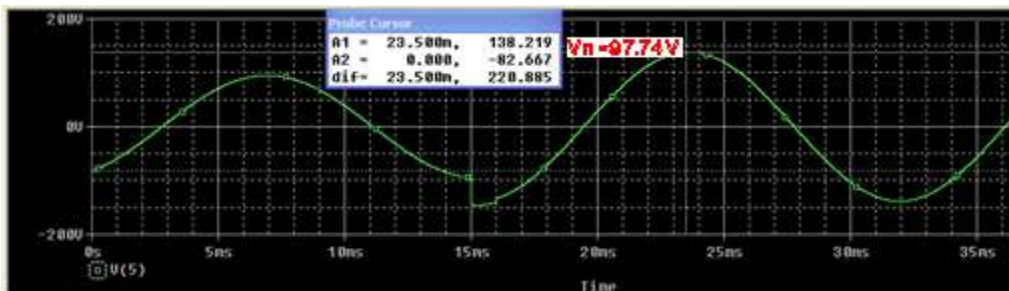


Figura 4.21. Respuesta en PSpice con carga de 12.63Ω en R_c y neutro conectado a través de una impedancia de 21.8Ω

Para ambos esquemas de la figura 4.18 y 4.20 se simularon dos ciclos para observar la respuesta antes y después del falso contacto a tierra, donde se observa un valor más alto de pico en el neutro cada que se aumenta el desbalance. Comparando el esquema de neutro sólidamente a tierra y conectado por medio de una impedancia, el transitorio al cerrarse el interruptor y al incrementarse el voltaje se observa que es menor para un sistema de neutro por medio de una impedancia.

Tabla 4.8. Resultados de simulación en PSpice con neutro a través de una impedancia con falso contacto

Neutro a través de una impedancia de 12.63Ω	
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =38.99V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =71.05V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =84.71V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =97.61V
Neutro a través de una impedancia de 21.8Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =39.46V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =70.95V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =85.23V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =97.74V
Neutro a través de una impedancia de 30Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =39.71V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =71.68V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =85.39V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =97.99V
Neutro a través de una impedancia de 60Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =40.48V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =72.55V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =86.18V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =98.53V
Neutro a través de una impedancia de 80Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =40.97V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =73.03V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =86.59V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =98.83V
Neutro a través de una impedancia de 120Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =41.72V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =73.77V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =87.212V
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =99.28V

Para todos los valores de la tabla puede observarse como el voltaje de desplazamiento en el neutro es casi exactamente el mismo, razón por la cual tanto para un sistema sólidamente a tierra y conectado por medio de una impedancia al tener un falso contacto nuestro sistema se estará comportando como un sistema aislado. Lo anterior es lo que pasa cuando se pierde la conexión de los neutros a tierra.

4.4 Pruebas de laboratorio

El equipo utilizado forma parte del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y se utilizaron tres transformadores monofásicos para formar la Delta-Estrella del transformador, se utilizaron cargas resistivas para representar las cargas para la representación de la Impedancia Z de neutro para el análisis de neutro conectado por medio de una Impedancia a tierra. Para realizar las mediciones de corrientes y voltajes de fases y de neutro se utilizó un módulo de amperímetro y voltímetro de CA, ambos módulos analógicos.



Figura 4.22. Equipo para prueba de laboratorio

4.4.1 Prueba con neutro aislado

Al montar el sistema con neutro aislado y medir el voltaje de V_n , voltajes de fase en el secundario y el valor de I_n del neutro y el valor de corrientes de fase a neutro se representan en la siguiente tabla:

Tabla 4.9. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro aislado

Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Corrientes de fase I_a, I_b, I_c	Voltaje y Corriente de Neutro V_n e I_n
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=121V$	$I_a=0.25A$ $I_b=0.29A$ $I_c=0.2A$	$I_n=0.29A$ $V_n=0.2657V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=120V$	$I_a=0.2A$ $I_b=0.65A$ $I_c=1A$	$I_n=0.75A$ $V_n=46.31V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=120V$ $V_{cn}=110V$	$I_a=0.4A$ $I_b=0.8A$ $I_c=1.3A$	$I_n=0.78A$ $V_n=78.65V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=119V$ $V_{cn}=119V$	$I_a=0.4A$ $I_b=0.83A$ $I_c=1.4A$	$I_n=0.83A$ $V_n=90.72V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=119V$ $V_{cn}=119V$	$I_a=0.5A$ $I_b=0.84A$ $I_c=1.5A$	$I_n=0.85A$ $V_n=100.66V$

Puede observarse como con cargas balanceadas hay una diferencia de potencial en el neutro, es pequeña la cantidad pero ya existe un desplazamiento del neutro esto puede ser debido a que a pesar de que las cargas están balanceadas y en los módulos de resistencias tenga los valores cerrados no significa que necesariamente estos valores sean exactos, además idealmente se espera que los voltajes de fase sean balanceados pero no se tiene la certeza de que estén balanceados.

Los voltajes de fase se mantienen en cierta medida en el mismo valor variando solo en 1 V, mientras las corrientes se van incrementando conforme aumenta el desbalance en una de las fases, observándose que en la fase donde se da el desbalance la corriente de fase tiende a aumentar.

Las corrientes y voltajes de neutro también se incrementan al aumentar el desbalance, el incremento es más grande en el desplazamiento del neutro del voltaje, observándose que en este tipo de conexión las corrientes son menores en comparación con el voltaje.

4.4.2 Prueba con neutro aterrizado sólidamente a tierra

Al proporcionar ahora al neutro un retorno por tierra y al realizar las mediciones de corriente y voltaje de neutro a fase y del desplazamiento del neutro con cargas balanceadas y desbalanceadas se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4.10. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro aterrizado sólidamente a tierra

Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Corrientes de fase I_a, I_b, I_c	Voltaje y Corriente de Neutro V_n e I_n
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=120V$	$I_a=0.2A$ $I_b=0.29A$ $I_c=0.29A$	$I_n=0.53A$ $V_n=0.0029V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=120V$	$I_a=0.25A$ $I_b=0.29A$ $I_c=0.8A$	$I_n=0.53A$ $V_n=0.031V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=115V$	$I_a=0.25A$ $I_b=0.29A$ $I_c=1.4A$	$I_n=0.53A$ $V_n=0.092V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=120V$ $V_{cn}=110V$	$I_a=0.25A$ $I_b=0.29A$ $I_c=5A$	$I_n=0.53A$ $V_n=0.1486V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=100V$	$I_a=0.25A$ $I_b=0.984A$ $I_c=8.4A$	$I_n=0.53A$ $V_n=0.2432V$

Como puede observarse con cargas balanceadas la corriente se mantiene prácticamente igual en ambas fases y es mínima la cantidad de corriente en el neutro. Al momento de agregar un desbalance, el efecto se ve reflejado en la fase o fases donde se aplique el desbalance o la disminución de la carga. Puede comprobarse como la corriente

sufre un aumento considerablemente grande cuando se presenta un desbalance de cargas, no ocurre lo mismo con el voltaje del neutro, sin embargo en la fase modificada también varía el voltaje proveniente del transformador obteniéndose una baja tensión siendo esta mayor si se incrementa el desbalance.

Al realizar este tipo de conexión debe tenerse en cuenta las grandes cantidades de corriente que se pueden alcanzar.

4.4.2.1 Prueba con neutro sólidamente a tierra con falso contacto

Para la prueba de un falso contacto a tierra en el laboratorio se utilizó un trozo de papel que impidiera un buen contacto del neutro con tierra como se muestra en la figura 4.23, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.11.

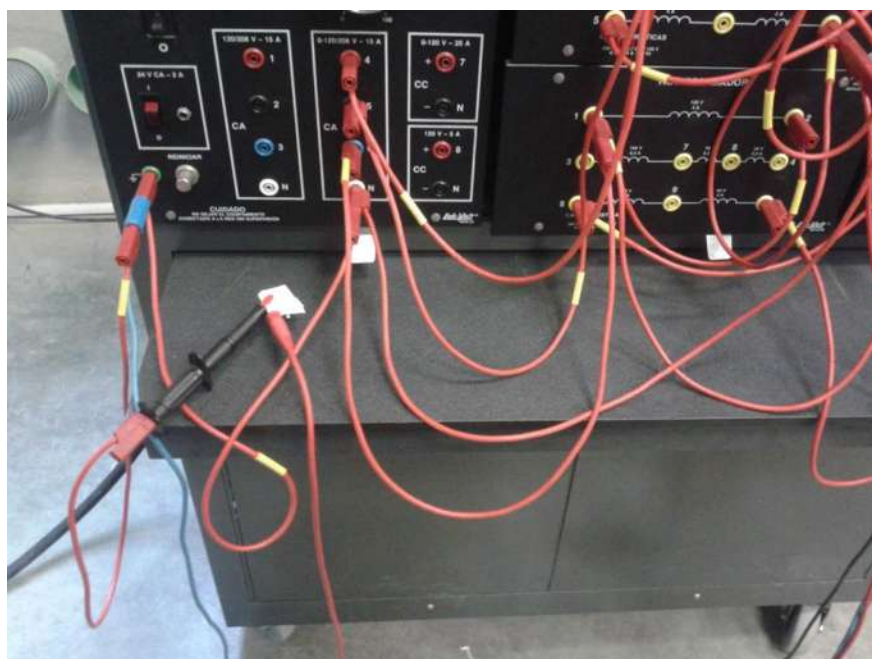


Figura 4.23. Falso contacto en el laboratorio

Tabla 4.11. Resultados de prueba de laboratorio con neutro sólidamente a tierra con falso contacto

Neutro sólidamente a tierra	
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Prueba de laboratorio
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=0.24V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_n=46.12V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_n=78.42V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_n=90.32V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_n=100.33V$

Los resultados obtenidos en el laboratorio son prácticamente los mismos valores para un neutro aislado como era de esperarse.

4.4.3 Prueba con neutro a través de una impedancia

Se realizaron varias pruebas con distintas impedancias para mostrar como el valor de la impedancia causa un gran impacto en la red tanto de voltajes cómo en la corriente, se tomaron mediciones con la carga balanceada y aplicando desbalance pequeño hasta llegar a uno más alto. Los resultados obtenidos son los mostrados en las siguientes tablas:

Tabla 4.12. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=12.63$

$Z=12.63$			
Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Corrientes de fase I_a, I_b, I_c	Voltaje y Corriente de Neutro V_n e I_n
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=120V$ $V_{cn}=120V$	$I_a=0.2A$ $I_b=0.3A$ $I_c=0.3A$	$I_n=0.53A$ $V_n=0.0698V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=119V$	$I_a=0.25A$ $I_b=0.28A$ $I_c=1.45A$	$I_n=0.55A$ $V_n=9.36V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=115V$	$I_a=0.26A$ $I_b=0.28A$ $I_c=2.8A$	$I_n=0.59A$ $V_n=30.7V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=112V$	$I_a=0.27A$ $I_b=0.28A$ $I_c=3.8A$	$I_n=0.6A$ $V_n=42.91V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=110V$	$I_a=0.28A$ $I_b=0.28A$ $I_c=5.2A$	$I_n=0.62A$ $V_n=58.45V$

Tabla 4.13. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=21.8$

$Z=21.8$			
Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Corrientes de fase I_a, I_b, I_c	Voltaje y Corriente de Neutro V_n e I_n
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	$V_{an}=120V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=120V$	$I_a=0.3A$ $I_b=0.25A$ $I_c=0.25A$	$I_n=0.55A$ $V_n=0.071V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=120V$	$I_a=0.3A$ $I_b=0.3A$ $I_c=1A$	$I_n=0.58A$ $V_n=14.13V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=115V$	$I_a=0.35A$ $I_b=0.25A$ $I_c=2.5A$	$I_n=0.61A$ $V_n=34.73V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=112V$	$I_a=0.35A$ $I_b=0.25A$ $I_c=3.2A$	$I_n=0.63A$ $V_n=47.91V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_{an}=121V$ $V_{bn}=121V$ $V_{cn}=111V$	$I_a=0.3A$ $I_b=0.3A$ $I_c=4.2A$	$I_n=0.67A$ $V_n=63.57V$

Tabla 4.14. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=30$

Z=30			
Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro Van,Vbn,Vcn	Corrientes de fase Ia, Ib, Ic	Voltaje y Corriente de Neutro Vn e In
Carga balanceadas (240 Ω en a, b y c)	Van=120V Vbn=121V Vcn=120V	Ia=0.2A Ib=0.3A Ic=0.3A	In=0.53A Vn=0.7768V
Carga en a y b de 240 Ω y 80 Ω en c	Van=120V Vbn=121V Vcn=120V	Ia=0.2A Ib=0.3A Ic=1.3A	In=0.56A Vn=16.88V
Carga en a y b de 240 Ω y 34.3 Ω en c	Van=120V Vbn=121V Vcn=119V	Ia=0.25A Ib=0.3A Ic=2.3A	In=0.62A Vn=39.7V
Carga en a y b de 240 Ω y 21.8 Ω en c	Van=120V Vbn=121V Vcn=118V	Ia=0.3A Ib=0.3A Ic=2.8A	In=0.66A Vn=53.29V
Carga en a y b de 240 Ω y 12.63 Ω en c	Van=120V Vbn=121V Vcn=118V	Ia=0.52A Ib=0.3A Ic=3.55A	In=0.7A Vn=68.57V

Tabla 4.15. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=60$

Z=60			
Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro Van,Vbn,Vcn	Corrientes de fase Ia, Ib, Ic	Voltaje y Corriente de Neutro Vn e In
Carga balanceadas (240 Ω en a, b y c)	Van=120V Vbn=120V Vcn=120V	Ia=0.2A Ib=0.3A Ic=0.3A	In=0.54A Vn=0.1516V
Carga en a y b de 240 Ω y 80 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=120V	Ia=0.28A Ib=0.29A Ic=1.15A	In=0.58A Vn=24.65V
Carga en a y b de 240 Ω y 34.3 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=119V	Ia=0.29A Ib=0.29A Ic=1.8A	In=0.64A Vn=52.55V
Carga en a y b de 240 Ω y 21.8 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=115V	Ia=0.35A Ib=0.29A Ic=2.1A	In=0.65 Vn=66.94V
Carga en a y b de 240 Ω y 12.63 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=114V	Ia=0.41A Ib=0.3A Ic=2.4A	In=0.75A Vn=81.43V

Tabla 4.16. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=80$

Z=80			
Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro Van,Vbn,Vcn	Corrientes de fase Ia, Ib, Ic	Voltaje y Corriente de Neutro Vn e In
Carga balanceadas (240 Ω en a, b y c)	Van=121V Vbn=121V Vcn=120V	Ia=0.23A Ib=0.18A Ic=0.23A	In=0.55A Vn=0.1276V
Carga en a y b de 240 Ω y 80 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=120V	Ia=0.25A Ib=0.2A Ic=1.2A	In=0.58A Vn=29.193V
Carga en a y b de 240 Ω y 34.3 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=118V	Ia=0.25A Ib=0.2A Ic=1.8A	In=0.61A Vn=59.77V
Carga en a y b de 240 Ω y 21.8 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=112V	Ia=0.5A Ib=0.3A Ic=2.1A	In=0.63A Vn=74.6V
Carga en a y b de 240 Ω y 12.63 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=110V	Ia=0.6A Ib=0.35A Ic=2.4A	In=0.67A Vn=80.92V

Tabla 4.17. Resultados obtenidos de voltaje y corriente con prueba de neutro a través de una impedancia de $Z=120$

Z=120			
Cargas conectadas al sistema	Voltajes de fase a neutro Van,Vbn,Vcn	Corrientes de fase Ia, Ib, Ic	Voltaje y Corriente de Neutro Vn e In
Carga balanceadas (240 Ω en a, b y c)	Van=120V Vbn=120V Vcn=120V	Ia=0.28A Ib=0.2A Ic=0.28A	In=0.55A Vn=0.2064V
Carga en a y b de 240 Ω y 80 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=120V	Ia=0.28A Ib=0.22A Ic=1A	In=0.6A Vn=32.51V
Carga en a y b de 240 Ω y 34.3 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=120V	Ia=0.3A Ib=0.22A Ic=1.6A	In=0.7A Vn=63.36V
Carga en a y b de 240 Ω y 21.8 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=118V	Ia=0.4A Ib=0.23A Ic=1.8A	In=0.75A Vn=77.36V
Carga en a y b de 240 Ω y 12.63 Ω en c	Van=121V Vbn=121V Vcn=117V	Ia=0.4A Ib=0.25A Ic=2.2A	In=0.7A Vn=90.26V

De acuerdo a los resultados se observa que entre más grande es la impedancia por la cual se conecta el neutro es más grande la diferencia de potencial en el neutro, mientras que la corriente en el mismo se encuentra a la inversa, lo anterior cuando se presenta algún desbalance. Sin embargo de manera balanceada también se observa un voltaje en el neutro, como se mencionó en la conexión sólidamente a tierra esto se puede deber a que los valores reales de carga y voltajes de fase difieran un poco del valor que muestran los módulos de laboratorio.

Ahora se mostraran en la siguiente tabla los valores de medición y calculadas por el método matemático, simulación con PSpice y prueba de laboratorio:

Tabla 4.18. Comparación del método matemático, prueba de laboratorio y simulación en PSpice con neutro aislado y sólidamente a tierra

Neutro aislado			
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Método matemático	Desplazamiento de neutro. Prueba de laboratorio	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	$V_n=0V$	$V_n=0.2657V$	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_n=48V$	$V_n=46.31V$	$V_n=48V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_n=79.99V$	$V_n=78.65V$	$V_n=79.99V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_n=92.33V$	$V_n=90.72V$	$V_n=92.33V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_n=102.86V$	$V_n=100.66V$	$V_n=102.86V$
Neutro sólidamente a tierra			
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	$V_n=0V$	$V_n=0.0029V$	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	$V_n=0.04V$	$V_n=0.031V$	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	$V_n=0.1198V$	$V_n=0.092V$	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	$V_n=0.1998V$	$V_n=0.1486V$	$V_n=0V$
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	$V_n=0.3588V$	$V_n=0.2432V$	$V_n=0V$

Tabla 4.19. Comparación del método matemático, prueba de laboratorio y simulación en PSpice con neutro a través de una impedancia

Neutro conectado a través de una impedancia de 12.63Ω			
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Método matemático	Desplazamiento de neutro. Prueba de laboratorio	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.0698V	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=9.99V	Vn=9.36V	Vn=9.99V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=25.7V	Vn=30.7V	Vn=25.7V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=37.52V	Vn=42.91V	Vn=37.52V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=54V	Vn=58.45V	Vn=54V
Neutro conectado a través de una impedancia de 21.8Ω			
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.071V	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=14.99V	Vn=14.13V	Vn=14.99V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=35.97V	Vn=34.73V	Vn=35.97V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=50V	Vn=47.91V	Vn=50V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=67.45V	Vn=63.57V	Vn=67.48V
Neutro conectado a través de una impedancia de 30Ω			
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.7768V	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=18.46V	Vn=16.88V	Vn=18.46V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=42.34V	Vn=39.7V	Vn=42.34V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=57.17V	Vn=53.29V	Vn=57.17V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=74.49V	Vn=68.57V	Vn=74.49V
Neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω			
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.1516V	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=26.67V	Vn=24.65V	Vn=26.67V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=55.37V	Vn=52.55V	Vn=55.51V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=70.61V	Vn=66.94V	Vn=70.62V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=86.4V	Vn=81.43V	Vn=86.41V
Neutro conectado a través de una impedancia de 80Ω			
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.1276V	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=30V	Vn=29.193V	Vn=29.99V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=59.99V	Vn=59.77V	Vn=59.99V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=75.03V	Vn=74.60V	Vn=75.03V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=90V	Vn=80.92V	Vn=90V
Neutro conectado a través de una impedancia de 120Ω			
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.2064V	Vn=0V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=34.29V	Vn=32.51V	Vn=34.28V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=65.44V	Vn=63.36V	Vn=65.44
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=80.02V	Vn=77.36V	Vn=80.03
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=93.92V	Vn=90.26V	Vn=93.92

4.4.3.1 Prueba con neutro a través de una impedancia con falso contacto

Se utilizó el mismo método para falso contacto con neutro sólidamente a tierra de acuerdo a la figura 4.23, de esta manera los resultados obtenidos son los mostrados en la tabla 4.20

Tabla 4.20. Resultados de prueba de laboratorio con neutro a través de una impedancia con falso contacto

Neutro a través de una impedancia de 12.63Ω	
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Prueba de laboratorio
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0.37V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =46.39V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =79.58V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =90.55V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =100.43V
Neutro a través de una impedancia de 21.8Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0.2654V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =47.54V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =80.78V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =93.07V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =103.27V
Neutro a través de una impedancia de 30Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0.2415V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =46.22V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =78.63V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =90.53V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =100.53V
Neutro a través de una impedancia de 60Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0.2732V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =46.25V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =78.60V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =90.60V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =100.56V
Neutro a través de una impedancia de 80Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	V _n =0.3912V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	V _n =47.79V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	V _n =80.05V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	V _n =93.31V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	V _n =103.43V

Neutro a través de una impedancia de 120Ω	
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=0.3428V$
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=46.38V$
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=78.66V$
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=90.62V$
Carga balanceada (240Ω en a, b y c)	$V_n=100.63V$

Al ver la tabla 4.20 puede observarse como el sistema se comporta como un sistema aislado.

En la siguiente tabla se muestran comparativos de los valores de falso contacto a tierra con neutro sólidamente a tierra y a través de impedancia en pspice y prueba de laboratorio:

Tabla 4.21. Comparación con falso contacto en prueba de laboratorio con neutro sólidamente a tierra y a través de una impedancia

Neutro conectado a través de una impedancia de 12.63Ω		
Cargas conectadas al sistema	Desplazamiento de neutro. Simulación PSpice	Desplazamiento de neutro. Prueba de laboratorio
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.37V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=38.99V	Vn=46.39V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=71.05V	Vn=79.58V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=84.71V	Vn=90.55V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=97.61V	Vn=100.43V
Neutro conectado a través de una impedancia de 21.8Ω		
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.2654V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=39.46V	Vn=47.54V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=70.95V	Vn=80.78V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=85.23V	Vn=93.07V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=97.74V	Vn=103.27V
Neutro conectado a través de una impedancia de 30Ω		
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.2415V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=39.71V	Vn=46.22V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=71.68V	Vn=78.63V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=85.39V	Vn=90.53V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=97.99V	Vn=100.53V
Neutro conectado a través de una impedancia de 60Ω		
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.2732V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=40.48V	Vn=46.25V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=72.55V	Vn=78.60V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=86.18V	Vn=90.60V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=98.53V	Vn=100.56V
Neutro conectado a través de una impedancia de 80Ω		
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.3912V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=40.97V	Vn=47.79V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=73.03V	Vn=80.05V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=86.59V	Vn=93.31V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=98.83V	Vn=103.43V
Neutro conectado a través de una impedancia de 120Ω		
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.3428V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=41.72V	Vn=46.38V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=73.77V	Vn=78.66V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=87.212V	Vn=90.62V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=99.28V	Vn=100.63V
Neutro sólidamente a tierra		
Carga balanceadas (240Ω en a, b y c)	Vn=0V	Vn=0.24V
Carga en a y b de 240Ω y 80Ω en c	Vn=38.7V	Vn=46.12V
Carga en a y b de 240Ω y 34.3Ω en c	Vn=70.57V	Vn=78.42V
Carga en a y b de 240Ω y 21.8Ω en c	Vn=84.5V	Vn=90.32V
Carga en a y b de 240Ω y 12.63Ω en c	Vn=97.27V	Vn=100.33V

Ambos resultados, tanto para neutro sólidamente a tierra y por medio de una impedancia en falso contacto nos dan un comportamiento como un sistema de neutro asilado como es de esperarse, con lo cual se observa la importancia de la falta del neutro, ya que no tenerlo y en desbalances este puede provocar grandes desplazamientos del neutro dependiendo la magnitud del desbalance y tomar en cuenta que en la realidad es casi imposible tener un sistema 100% balanceado.

Para sistema de bajo voltaje no se observan en las líneas incrementos o decrementos de voltajes muy altos, pero para un dispositivo estos cambios de voltaje pueden provocar daños, con sobretensiones se corre el riesgo de que se quemen los dispositivos ya que se sobrepasa el valor nominal de voltaje y corriente requerido, así como en subtensión se provoca un mal funcionamiento de los dispositivos provocándose con el tiempo en aquellos dispositivos que requieren cierto valor de corriente y voltaje de arranque, deterioro y una vida corta del dispositivo.

En sistemas donde se requieren voltajes altos, los niveles de voltaje de desbalance en las líneas se incrementa también por lo que son un peligro tanto para dispositivos como para las personas mismas.

CAPITULO 5

Conclusiones y Trabajo Futuro

5.1 Conclusiones

Se analizó el problema ocasionado por la pérdida del neutro corrido en el suministro eléctrico aéreo, sin embargo este mismo análisis se aplica para la distribución subterránea, debido a que en ambas formas de suministro eléctrico el transformador en el secundario tiene la conexión en estrella.

El principal problema que se ocasiona en el suministro eléctrico aéreo son las sobretensiones, estas son generadas cuando queda conectada alguna de las líneas a neutro del transformador y en otra se desconecta, la sobretensión con mayor valor se generará en la línea que presente una carga más grande, provocándose así daños a los equipos ya que se sobrepasaría el valor nominal de los dispositivos. En las líneas donde se encuentren las cargas más pequeñas se presentará una subtensión, con esto los dispositivos no alcanzarían el valor requerido de voltaje y corriente por lo que no funcionarán adecuadamente. Sin embargo el sistema en alguna línea podría permanecer en su valor nominal, debido a que reparto del voltaje depende del reparto de las cargas.

El balance del sistema es muy importante debido a que si existe algún corte del neutro y las cargas del sistema se encuentran equilibradas no se presentara ninguna sobretensión o subtensión dentro de la red de suministro.

Cuando un sistema se encuentra en desequilibrio y se presentan sobretensiones la carga puede disminuir y por lo tanto generar sobretensiones en las otras líneas, provocándose un efecto de cascada de daño de dispositivos, daño que afecta a la empresa suministradora como a los usuarios. Un sistema de tierra garantiza mayor seguridad para

ambos, además de que se pueden hacer más pequeñas las sobretensiones provocadas por la falta del neutro.

En condiciones de desequilibrio el neutro puede ayudar a equilibrar un poco las tensiones en la carga, pero aun funciona mucho mejor la conexión del neutro del transformador a tierra debido a que se refuerza el equilibrio que proporciona el neutro. Lo más recomendable es conectar el neutro por medio de una impedancia de bajo valor para facilitar la detección de fallas. El uso de la conexión del neutro a tierra por medio de una impedancia de alto valor ayuda más para no generar disparos instantáneos ante una primera falla, pero siempre es más recomendable que su valor sea pequeño.

La capacidad de conducción del hilo neutro se encuentra en función de las corrientes de desbalance y de las corrientes indeseables que pudieran circular por el mismo, las cuales son provocadas por las terceras armónicas que pueden generarse por cargas no lineales como lo son, en este caso, las lámparas fluorescentes y las computadoras, o por cualquier dispositivo de electrónica de potencia, dispositivos que son cada vez más susceptibles a cambios de voltajes, o armónicos ocasionados por las mismas cargas y que pueden no estar bien balanceadas. El hilo del neutro debe diseñarse como mínimo o al 100% de la corriente máxima de línea a neutro de cualquiera de las fases, por lo que se puede utilizar el mismo valor de calibre para el neutro que el de las fases.

Las simulaciones realizadas en PSpice están apegadas al Análisis matemático, verificándose los resultados por ambos medios. De la misma forma los valores corresponden a las pruebas de laboratorio.

Para ambas pruebas se comprobó la importancia de un sistema con conexión a tierra, mientras más pequeño sea su valor se tendrá así un sistema sin desplazamientos grandes del neutro a pesar de que exista desbalance en la línea, ya que al quitar el neutro ya sea por falso contacto o robo se estaría generando un sistema aislado en el que desbalances grandes provocan resultados de incrementos o decrementos de voltajes. Por lo que es importante tener conectado el neutro ya que ayudara a que los desbalances sean más pequeños.

Es importante verificar que el sistema de distribución funcione correctamente en aspectos de contaminación, ya que si el aislamiento de algún conductor no encuentra en buenas condiciones, podría provocar falsos contactos que provoquen un mal funcionamiento en el aterrizamiento del neutro.

5.2 Trabajo futuro

Con este análisis se busca conocer las sobretensiones que se generan cuando hay corte del neutro permitiendo así la búsqueda de mejores alternativas de conexión del neutro y diseño de mejores sistemas de suministro, además de que se eviten ciertos errores o conexiones que puedan provocar pérdidas mucho mayores.

Es posible el desarrollo de mejores alternativas y mayor comprensión de por qué se utiliza más un método que otro.

El análisis de los sistemas aéreos proporciona las bases para el análisis de un sistema subterráneo.

También es posible analizar sistemas con cargas capacitivas e inductivas.

Referencias

- [1] Comisión Federal De Electricidad “Sistema de Tierra para Plantas Y Subestaciones Eléctricas”, NRF-011-CFE-2004

- [2] IEEE Std. 399-1990 “IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis” Practicas recomendadas por IEEE para el análisis de sistemas industriales y comerciales de potencia, Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos IEEE, 31 de Mayo 1990.

- [3] ANSI/IEEE Std. 81-1983 “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System” (Guía para la medición de resistividad de tierra, impedancia de tierra y potenciales de superficie de un sistema de tierra), Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos IEEE, 4 de Septiembre 1984.

- [4] IEEE Std. 80-2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substations Grounding” (Guía para la puesta a tierra con seguridad en Subestaciones de Corriente Alterna), Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos IEEE, 4 de Agosto 2000.

- [5] E. E STAFF-M.I.T “Circuitos Magnéticos y Transformadores”, Ed. REVERTÉ, 2003.

- [6] Germán Moreno Ospina “Fundamentos e Ingeniería de las puestas a tierra”, 1ª Edición, Ed. Universidad de Antioquia, 2007

- [7] William D. Callister “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales”, Ed REVERTÉ, 1996.

- [8] Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, Diego J. Alcaraz Lorente “Manual básico de corrosión para ingenieros”, 1ª Edición, Ed. Universidad de Murcia, 2004.
- [9] Comisión Federal de Electricidad “Normas de Distribución-Construcción-Instalaciones Aéreas en media y baja Tensión-Generalidades”.
- [10] Comisión Federal de Electricidad “Normas de Distribución-Construcción-Instalaciones Aéreas en media y baja Tensión-Sistemas de tierra”.
- [11] Alberto Naranjo “Proyecto del sistema de distribución eléctrico”, 1ª Edición, Ed. EQUINOCCIO, 2006.
- [12] Samuel Ramírez Castaño “Redes de Distribución de Energía”, Ed. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 3ª edición, 2004.
- [13] Gilberto Enríquez Harper “Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión”, 2ª edición, Ed. LIMUSA, 2002.
- [14] José Coto Aladro “Análisis de sistemas de energía eléctrica”, Ed. Universidad de Oviedo, 1ª edición, 2003.
- [15] Juan Manuel Cervantes “Análisis de la calidad de la energía en la red de distribución de ciudad universitaria”, Tesis, 2006.
- [16] M.C. Francisco Hernández Cortes “El arte de distribuir energía eléctrica”
- [17] <http://clasificado.mimorelia.com/noticias/morelia/el-robo-de-cableado-y-luminarias-constante-flagelo-del-municipio-/82758>

Apéndice

A. Símbolos y abreviaciones correspondientes al Capítulo 4

Símbolo	Descripción	Sección
A	Valor de fasor de A	4.1
B	Valor de fasor de B	4.1
C	Valor de fasor de C	4.1
I_A	Corriente de Línea en A	4.1
I_B	Corriente de Línea en B	4.1
I_C	Corriente de Línea en C	4.1
I_{AB}	Corriente de fase en A	4.1
I_{BC}	Corriente de fase en B	4.1
I_{CA}	Corriente de fase en C	4.1
E_{AB}	Tensión entre fases A y B	4.1
E_{BC}	Tensión entre fases B y C	4.1
E_{CA}	Tensión entre fases C y A	4.1
I_N	Corriente de neutro	4.1
$\bar{Y}_A$	Suma de admitancias de todos los receptores conectados entre la fase A y neutro n de la carga	4.1
$\bar{Y}_B$	Suma de admitancias de todos los receptores conectados entre la fase B y neutro n de la carga	4.1
$\bar{Y}_C$	Suma de admitancias de todos los receptores conectados entre la fase C y neutro n de la carga	4.1
$\bar{Y}_N$	Suma de admitancias de todos los receptores conectados entre neutro n y la tierra	
$\bar{V}_{An}$	Tensión entre la fase A a n de las cargas	4.1
$\bar{V}_{Bn}$	Tensión entre la fase B a n de las cargas	4.1
$\bar{V}_{Cn}$	Tensión entre la fase B a n de las cargas	4.1
$\bar{V}_{nN}$	Desplazamiento del neutro	4.1

n	Neutro de las cargas	4.1
N	Neutro de la alimentación	4.1