



REPUBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
FACULTAD DE METALURGIA ELECTREOMECAÁNICA  
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

# *Trabajo de Diploma*

*En opción al Título de Ingeniero Eléctrico*

*Título: Ajuste de las bobinas compensadoras en el sistema de 10 kV de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.*

*Autor: Dilber Acosta Iribal.*

*Tutor: Ms.c Ing. Adol Hernández Rojas.*

*Moa 2014*

*“Año 56 de la Revolución”*

# Declaración de autoridad

## Yo: Dilber Acosta Iribal:

Autor del Trabajo de Diploma “*Ajuste de las reactancias compensadoras en el sistema de 10 kV de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”*”, en conjunto con el Master en Ciencias Adol Hernández Rojas, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” y la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, los cuales podrán hacer uso del mismo para fines científicos, docentes y educativos.

---

Dilber Acosta Iribal.

(Diplomante)

---

Ms.c Adol Hernández Rojas

(Tutor(a))

## Pensamiento.

*“...el futuro de toda la industria, el futuro de la Humanidad, no está en la gente que llena papeles; está en la gente que construye máquinas, que entre otras cosas puede llenar papeles... Está en la gente que estudia los grandes problemas tecnológicos, los resuelve, los de hoy y los de mañana, descubre nuevas cosas, aprende a sacarle a la naturaleza nuevas cosas. Tenemos que ir entonces hacia ese salto, hacia esa revolución técnica, que ya ha planteado Fidel, con paso de carga...”*

*Ernesto Che Guevara*

## **Agradecimientos.**

*Dedico este Trabajo de Diploma, mis esfuerzos y triunfos a quienes han sido responsables, en gran medida de que esté aquí: mi Madre, mi Padre y mi Hermana, a mis familiares, amigos y a todos los que creyeron en mí. Sin su apoyo incondicional y ejemplo hoy no me consideraría mejor que ayer.*

*A todos muchas gracias.*

## **Dedicatoria.**

*A mi tutor, profesores, trabajadores de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y compañeros de aula, que me orientaron, ayudaron, acompañaron e inspiraron en cada paso de la realización del presente proyecto.*

*Dedico esta tesis a mi padre Rafael Acosta Liranza por la combinación de amor y rectitud con la que siempre me educó, porque su amor ha sido el amor más parecido al de Dios, de todos los que he conocido. Gracias a eso he podido llegar hasta aquí.*

*A mi madre, ese ángel de luz que Dios creó para cuidarme y bendecir mi vida con su presencia cada día.*

*A mi hermana Daily que siempre esperó lo mejor de mí.*

*A todos los que por dejar su huella en mí, la han dejado también en estas páginas, y que prefiero no aventurarme a nombrarlos para evitar omisiones.*

*Para todos ellos, este, mi testimonio de infinita gratitud.*

## Resumen.

Este trabajo, titulado: ***Ajuste de las bobinas compensadoras en el sistema de 10 kV de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”***, está compuesto por; Introducción, Tres Capítulos, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos.

En el primer capítulo, se tienen en cuenta trabajos precedentes realizados sobre el tema abordado. Además, contiene el marco teórico-conceptual de la investigación, el que tiene como objetivo; establecer las bases para el desarrollo del estudio que se realiza y se recoge una breve mención al origen histórico del empleo de la bobina resonante como medio de puesta a tierra del neutro, la utilidad y principio de funcionamiento mediante el análisis electrotécnico de dicho sistema sobre la red en distintas situaciones de operación así como un repaso por los aspectos constructivos, de diseño y operación.

El segundo capítulo proporciona una descripción detallada del sistema de suministro de media tensión de la empresa, sistema de protecciones y conductores más utilizados. Se describen las herramientas y métodos utilizados con el objetivo de determinar el valor de ajuste de las bobinas compensadoras.

En el tercer capítulo se realiza el análisis de los resultados y valoración económica de la propuesta de ajuste.

Este trabajo de diploma culmina con las conclusiones generales, las recomendaciones y los anexos propuestos para el mismo.

## Summary.

This work, entitled: ***Adjust of compensating reels in 10 kV system of the Enterprise “Comandante Ernesto Che Guevara”***, is composed for; Introduction, Three chapters, Conclusions, Recommendations, Bibliography and Annexed.

In the first chapter, the keep in mind to him preceding works carried out on the topic. Moreover, it contains the theoretical-conceptual frame of the investigation, the one which has as objective; establish the bases for the development of the study that are carried out and a brief mention is picked up to the historical origin of the employment of the resonant reel as half from setting to earth of the neuter , the utility and operation principle by means of the electrical engineer analysis of this system on the net in different operation situations as well as a review for the constructive aspects, of design and operation.

The second chapter provides a detailed description of the system of supply of half voltage of the enterprise, system of protection and more used wires. It describes the employee instruments and methods with the objective of determining the value of adjustment of the reels compensation.

In the third chapter it realizes the analysis of the results and economic valuation of the adjustment proposal.

This diploma work culminates with the general conclusions, the recommendations and the annexes proposed for the same one.

Tabla de contenido:

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD .....	II
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
RESUMEN. ....	VI
SUMMARY. ....	VII
TABLA DE CONTENIDO: .....	VIII
INTRODUCCIÓN GENERAL:.....	XI
<b>FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>XII</b>
<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN. ....	2
1.3 ESTADO DEL ARTE. ....	2
1.4 CONCEPTOS BÁSICOS: .....	4
1.5 MÉTODOS PARA LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO.....	6
1.6 CÁLCULO DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO. ....	7
1.7 FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO. ....	8
1.8 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO:.....	8
1.9 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE BOBINA PETERSEN. ....	9
1.10 ORIGEN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA RESONANTE. ....	10
1.11 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA RESONANTE .....	11
1.12 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA BOBINA PETERSEN. ....	16
1.12.1 Componentes del sistema Petersen. ....	16
1.12.2 Transformador de puesta a tierra.....	16
1.12.3 Bobina Petersen. ....	16
1.12.4 Resistencia de neutro. ....	17
1.13 REGULACIÓN DE LA BOBINA PETERSON. ....	19
1.14 BOBINA DE TIPO FIJA .....	19

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO: .....	21
<b>CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS. ....</b>	<b>22</b>
2.1 INTRODUCCIÓN: .....	22
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA EMPRESA. ....	22
2.3 SISTEMAS DE PROTECCIONES. ....	25
2.4 DESCRIPCIÓN DEL CABLEADO DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE MEDIA TENSIÓN. ....	26
2.5 DESCRIPCIÓN DE LAS MÁQUINAS SINCRÓNICAS EXISTENTES EN LA EMPRESA. ....	27
2.6 OPERACIÓN EN RÉGIMEN NORMAL SIN FALLOS DE LAS BOBINAS PETERSEN.....	27
2.6.1 <i>Tensión de neutro (homopolar) por desequilibrio transversal a tierra</i> .....	28
2.7 OPERACIÓN EN RÉGIMEN DE FALLOS. ....	29
2.7.1 <i>Intensidad de falla a tierra.</i> .....	29
2.7.2 <i>Sobretensiones temporales.</i> .....	30
2.7.2.1 <i>Sobretensiones por reencendido del arco eléctrico en sistemas de alta impedancia.</i> .....	30
2.7.3 <i>Tensión transitoria de recuperación.</i> .....	31
2.8 SOFTWARES UTILIZADOS.....	33
2.8.1 <i>Easy power. Montaje del sistema de suministro de media tensión.</i> .....	33
2.8.2 <i>Matlab.</i> .....	35
2.9 CÁLCULO DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICA DE COMPENSACIÓN MEDIANTE PUESTA A TIERRA.....	35
2.10 CÁLCULO DE LA REACTANCIA INDUCTIVA DE LAS BOBINAS SUPRESORAS DE ARCO ELÉCTRICO MEDIANTE EL MÉTODO DE LA IMPEDANCIA. ....	41
2.11 MÉTODOS DE PROTECCIÓN A TIERRA.....	42
<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</b>	<b>44</b>
<b>CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
3.1 INTRODUCCIÓN: .....	45

---

3.2 VARIANTES PARA LIMITAR LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO:.....	45
3.2.1 Variante 1: Ajuste de las bobinas Peterson tipo fija. ....	46
3.2.2 Variante 2: Bobina de hierro móvil. ....	47
3.2.3 Variante 3: Utilización de los reactores con núcleo de aire. ....	51
3.3 PÉRDIDAS DE PRODUCCIÓN. ....	53
3.4 EFECTO ECONÓMICO: .....	53
3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO. ....	56
<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>57</b>
<b>RECOMENDACIONES:.....</b>	<b>58</b>
BIBLIOGRAFÍA: .....	59
<b>ANEXOS:.....</b>	<b>64</b>

## **Introducción General:**

En diciembre de 1972 se acordó entre los gobiernos de la URSS y la República de Cuba la colaboración técnica para la rehabilitación de las fábricas niquelíferas de Moa y Nicaro y la construcción de una nueva fábrica de níquel en Punta Gorda. El área de la construcción de la fábrica se encuentra al norte del yacimiento mineral de Punta Gorda, provincia de Holguín, en la costa norte del Océano Atlántico entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda. La caída del campo socialista tuvo una gran repercusión en todo el país, por la afectación que provocó en la economía cubana. La fábrica Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) sufrió grandemente el embate del período especial, al verse afectada por la colaboración soviética y de los países miembros del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME). Esto conllevó a que en los años 1991 a 1993 se llevaran a cabo varias acciones en la reubicación de personal a otras entidades, mantenimiento de la cultura industrial, conservación de equipamiento en almacenes, entre otras tareas, mientras se ejecutaban diferentes estrategias para salir adelante en esta crisis. La empresa productora de níquel y cobalto (ECG), recientemente ha experimentado una serie de cambios, encaminados a mantener el nivel de la producción e ir de la mano con la tecnología. Se ha llevado a cabo la reparación y sustitución de conductores (cambio del tipo, sección y trazas), sin tener en cuenta una paulatina actualización de las bases de datos, lo que ha desencadenado que no se conozca actualmente cuáles son los niveles reales de corrientes de falla capacitiva a tierra cuando aparece una falla monofásica. Lo cual ha traído como consecuencia un mal funcionamiento de las bobinas de compensación (Petersen) del sistema de 10 kV, debido a que no se conoce el valor de ajuste de la corriente para su correcto funcionamiento. Eliminando las ventajas que este sistema brindaba como son: la explotación de la red durante un largo período de tiempo en condiciones de falla, reducción drástica de los disparos transitorios de las protecciones, mejora del servicio e incluso reducción del mantenimiento a los interruptores.

## **FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.**

### **Situación Problémica:**

El deterioro del aislamiento de los conductores de 10 kV de la empresa productora de níquel y cobalto “Cdte. Ernesto Che Guevara” producto al envejecimiento, operación continua de estos y los cambios en las dimensiones de los trazados de este circuito sin tener en cuenta la paulatina actualización de la base de datos, han provocado que el ajuste actual de las bobinas compensadoras no sea efectivo en la limitación de corrientes de cortocircuito. Razón por la cual el tiempo de explotación de la red, en condiciones de estas fallas se ha reducido drásticamente, afectando el proceso productivo de la empresa.

### **Problema:**

Necesidad de elevar la confiabilidad del suministro eléctrico de 10 kV de la empresa Ernesto che Guevara ante la presencia de fallas monofásicas.

### **Hipótesis:**

Si se actualiza el diagrama unifilar de 10 kV y se determina el valor de ajuste de las bobinas Petersen para las condiciones actuales de la red, entonces se elevará la confiabilidad del sistema de suministro eléctrico con presencia de fallas monofásicas.

### **Objeto de investigación:**

Bobinas compensadoras del sistema de 10kV de la empresa ECG.

### **Campo de acción:**

Sistema de protecciones para la compensación y reducción de cortocircuitos.

**Objetivo General:**

Ajustar las reactancias compensadoras del sistema de 10 kV de la empresa ECG.

**Objetivos específicos:**

- ❖ Realizar un estudio bibliográfico para determinar el método óptimo para el ajuste de las bobinas Petersen.
- ❖ Describir y actualizar el diagrama eléctrico de 10kV para poder calcular los parámetros eléctricos necesarios para el ajuste.
- ❖ Calcular el valor de ajuste de las bobinas Petersen.
- ❖ Determinar el valor de las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero.
- ❖ Realizar un análisis técnico que permita determinar la mejor variante de solución al problema y un análisis económico que permita validar la aplicación de esta solución.

**Resultados esperados:**

1. Actualizar el esquema monolineal de 10 kV y realizar el montaje en el software EasyPower.
2. Calcular los parámetros eléctricos para determinar el ajuste de las bobinas.
3. Proponer variantes más efectivas y actuales para la solución del problema.
4. Determinar económicamente el costo por variante y seleccionar la más adecuada

## CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.

### 1.1 Introducción.

Los sistemas eléctricos generalmente contienen un medio de conexión con tierra cuyo objeto primordial es limitar las diferencias de potencial que pudiesen darse entre sus elementos normalmente en tensión, o entre aquellos que puedan estarlo de manera accidental y que no deban estar sometidos a diferencias de potencial eléctrico, mediante la unión conductora de algunas de sus partes con otros puntos a potencial cero (tierra o masa) manteniendo las instalaciones eléctricas en un estado seguro para las personas y para la integridad material de los aparatos que la componen. En general, cuando por un defecto se produce el contacto de una fase del sistema con tierra, además de aparecer un aumento de la intensidad de corriente en la fase en falla, la tensión de dicha fase se colapsa y aparece en el resto de fases sanas una elevación de la tensión respecto a tierra impuesta por la relación fija existente entre ellas y la tensión del neutro del sistema a través de los devanados del transformador de alta tensión a media tensión (AT/MT).

El sistema de puesta a tierra mediante bobina de Petersen, denominado también como de neutro resonante, compensado o supresor de arco, es la evolución del método de neutro aislado [3] en redes donde el progresivo soterramiento de líneas aéreas de media tensión y el aumento del número y longitud de nuevas líneas subterráneas ha producido un incremento en la capacidad total a tierra de la red MT y, en consecuencia, en la corriente capacitiva a tierra en caso de defecto.

Se cita en la norma UNE EN 60071-1 [12] que, según el régimen de neutro empleado, una red compensada es aquella red en el que uno o más puntos neutros están conectados a tierra a través de reactancias que

compensan, aproximadamente, la componente capacitiva de una corriente de defecto monofásica a tierra.

El correcto ajuste y sintonización de las bobinas Petersen juegan un papel importante en el sistema de protecciones de los complejos industriales. En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica de trabajos que tratan sobre el tema, se aborda también, gran parte de la teoría acerca de los métodos de compensación de las bobinas Petersen y los beneficios obtenidos.

### **1.2 Métodos de investigación.**

Para comenzar, desarrollar y concluir con éxito cualquier investigación se hace necesario utilizar diferentes métodos, este trabajo no fue la excepción, algunos de los métodos que se emplearon son los siguientes:

- ❖ Inductivo-Deductivo, para realizar el examen y evaluación de los hechos que son objetos de estudio, partiendo de un conocimiento general de los mismos, que permitan una mejor aproximación a la realidad que los originó, y luego, mediante un proceso de síntesis, emitir una opinión profesional. Todo esto exigió la utilización de una serie de pasos realizados en forma sistemática, ordenada y lógica, que permitieron luego emitir una crítica objetiva del hecho.
- ❖ Histórico-Lógico, para desarrollar el análisis de las investigaciones anteriores y antecedentes que permitan continuar el estudio.
- ❖ Análisis-Síntesis, para lograr la descomposición de las funciones de control e información y su concreción.

### **1.3 Estado del arte.**

Durante el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios realizados en los campos del Sistema de protecciones para la compensación y reducción de cortocircuitos. La revisión bibliográfica estuvo

dirigida al enfoque teórico metodológico, así como al análisis de los trabajos que sobre el tema, desde el punto de vista científico, técnico y práctico, se han efectuado en los últimos años.

Numerosos estudios se han realizado relacionados con el origen de los cortocircuitos y su influencia en los sistemas eléctricos, todos ellos persiguen un fin común, eliminar o atenuar sus efectos nocivos. Aunque la temática de las fallas en los sistemas de distribución de energía toma mayor relevancia en los momentos actuales debido al desarrollo de las protecciones, no es un fenómeno nuevo. Es conocido que en 1910 se publica un libro que presta especial atención al estudio de las fallas en los sistemas trifásicos, específicamente trata el tema de la eliminación de las fallas a tierra intermitentes. Estas investigaciones en los sistemas de CA llevan a la invención de la bobina supresora de arco eléctrico (bobina de Petersen) en 1917, y en 1918 de la tecnología de relés para detección de fallas a tierra por métodos vatimétricos (ver anexo 3), de aplicación en redes con neutro resonante (“Wattmetrische Erdschluss relais”).

(Herrera, 2011) Realiza un profundo análisis con su trabajo titulado sistemas de puesta a tierra en redes de distribución de media tensión mediante neutro resonante, de los sistemas de protecciones para compensar y limitar las corrientes de falla en redes de distribución de media tensión a nivel global, comparando los tipologías de puesta a tierra para el neutro en cuanto a ventajas uno con respecto al otro, proponiendo la utilización del método de neutro resonante mediante bobinas Petersen en paralelo con resistencias en sistemas aislados, para reducir los efectos de las corrientes de falla monofásicas.

(Pérez, 2008) Lleva a cabo la evaluación y análisis de sobretensiones a frecuencia industrial en el sistema de transmisión de Cadafe, y su vinculación con el sistema de puesta a tierra del neutro. Le presta atención al tipo de neutro a utilizar de acuerdo a las características del sistema eléctrico, así como

---

*Ajuste de las bobinas compensadoras del sistema de 10 kV de la Empresa ‘Ernesto Che Guevara’*

el cálculo de las bobinas compensadoras Petersen y las consecuencias de una mala sintonización de dichas bobinas limitadoras de cortocircuitos monofásicos.

(Mujal; 2002) Publica un trabajo titulado protección de los sistemas eléctricos de potencia, el mismo aborda que en el caso de los sistemas resonantes a medida que se tenga una red de más tensión y más extensa (mayor corriente residual) será más difícil establecer un grado de sintonización que permita mantener la corriente a tierra lo suficientemente reducida como para que se dé la autoextinción del arco tras el defecto sin provocar sobretensiones inadmisibles en régimen normal. Por esta razón se considera que los sistemas de puesta a tierra de neutro mediante Bobina de Petersen no se utilizan en redes de tensión nominal superior a 110 kV. Expone mucha información técnica pero no define un método para el ajuste de las bobinas Peterson.

(Vásquez, 2009) Desarrolla un trabajo titulado características y aplicaciones de los reactores con núcleo de aire, en el cuál describe y calcula por varios métodos la corriente de defecto y el ajuste de los reactores para limitar dichas corrientes de fallas. En el trabajo desarrolla una metodología para el ajuste de los reactores utilizando el método de la impedancia, método directo y de cálculo mediante aplicaciones informáticas. Abarca además otros usos de estos reactores en los sistemas industriales como interconexión de transformadores en paralelo, para filtros de armónicos, compensador de línea shunt, y puesta a tierra. Haciendo un trabajo bien detallado y exacto para el análisis del tema desarrollado.

#### **1.4 Conceptos Básicos:**

**Sistema de puesta a tierra:** En base al objetivo perseguido por dicha conexión a tierra, la normativa eléctrica en materia de subestaciones [7] distingue dos conceptos de sistemas de puesta a tierra, la puesta a tierra de protección y la puesta a tierra de servicio o funcional:

**La puesta a tierra de protección** es aquella que tiene por finalidad exclusiva la seguridad eléctrica y lo conforma el sistema de conductores que unen de manera directa con tierra, a través de mallas de conductores enterrados y picas, las partes conductoras de una instalación que no están en tensión normalmente pero que pueden estarlo a consecuencia de averías, accidentes, descargas atmosféricas o sobretensiones con el fin de proteger a las personas contra contactos con tensiones peligrosas.

**La puesta a tierra de servicio o funcional** por su parte es aquella que, de manera directa o a través de resistencias o impedancias adicionales, tienen por objeto unir a tierra de manera permanente ciertos puntos de los circuitos eléctricos de servicio que lo necesiten para su correcto funcionamiento, como: los neutros de los transformadores en instalaciones o redes con neutro a tierra, el neutro de los alternadores y otros aparatos o equipos que lo precisen, los circuitos de baja tensión de los transformadores de medida, los limitadores, descargadores, autoválvulas, pararrayos para eliminación de sobretensiones o descargas atmosféricas y los elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra.

**Capacidad eléctrica:** La capacidad o capacitancia eléctrica es la capacidad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica.

**Reactancia:** Se denomina reactancia a la oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por inductores (bobinas) o condensadores y se mide en ohmios.

**Susceptancia:** Es el recíproco de la reactancia. La parte imaginaria de la admitancia. Se representa por B y se mide en SI (Siemens).

**Cortocircuito:** Se denomina cortocircuito al fallo en un aparato o línea eléctrica por el cual la corriente eléctrica pasa directamente del conductor activo o fase al neutro o tierra en sistemas monofásicos de corriente alterna, entre dos fases o

igual al caso anterior para sistemas polifásicos, o entre polos opuestos en el caso de corriente continua.

**Resonancia eléctrica:** Es un fenómeno que se produce en un circuito en el que existen elementos reactivos (bobinas y condensadores) cuando es recorrido por una corriente alterna de una frecuencia tal que hace que la reactancia se anule, en caso de estar ambos en serie, o se haga infinita si están en paralelo.

**Arco eléctrico:** En electricidad se denomina arco eléctrico a también arco voltaico a la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa enrarecida, normalmente a baja presión, o al aire libre.

**Permeabilidad:** Medida de qué tan bueno es un material con respecto al aire para servir de trayectoria, para líneas de fuerza magnética.

**Potencia reactiva:** Parte imaginaria de la potencia compleja, equivalente al valor pico de la componente que viaja hacia delante y hacia atrás en una línea, resultando en un promedio igual a cero.

**Potencia activa:** Parte real de la potencia compleja y es el valor promedio del producto  $V \cdot I \cdot \cos\theta$ , donde  $V$  e  $I$  son el voltaje y la corriente alterna respectivamente y  $\cos\theta$  el factor de potencia.

### 1.5 Métodos para la puesta a tierra del neutro.

La norma española y europea UNE-EN 6007 [12] sobre coordinación de aislamiento distingue entre los siguientes tipos de sistemas según el régimen de neutro:

- ❖ **Red con neutro aislado:** Red en la que el punto neutro no está conectado a tierra intencionalmente, excepto en condiciones de alta impedancia con fines de medida y protección.
  
- ❖ **Red de neutro rígidamente a tierra:** Red en la que el punto neutro o puntos neutros están conectados directamente a tierra.
  
- ❖ **Red de neutro no rígidamente a tierra:** Red en la que el punto neutro o puntos neutros están puestos a tierra a través de impedancias destinadas a limitar las corrientes de defecto a tierra.
  
- ❖ **Red compensada:** Red en la que uno o más puntos neutros están conectados a tierra a través de reactancias que compensan, aproximadamente, la componente capacitiva de una corriente de defecto monofásica a tierra.

### 1.6 Cálculo de corriente de cortocircuito.

Para el cálculo de cortocircuito hay muchos imponderables y este en muchas ocasiones solamente se realiza tomando en consideración las condiciones más severas, que en realidad pueden no ocurrir nunca, pero contra las cuales se debe estar prevenido. La determinación de la magnitud de la corriente de cortocircuito es tan importante como la determinación de las corrientes a plena carga, máxima demanda, factor de potencia y todos los parámetros básicos para el proyecto y explotación de la unidad de producción o la unidad consumidora de energía eléctrica. Al conocer todo lo relacionado con las corrientes de cortocircuito se pueden seleccionar las

capacidades necesarias de los interruptores y desconectivos de todo tipo, las protecciones a instalar, su calibración y las coordinaciones que deben existir entre ellas. Esto garantiza que en caso de ocurrir una falla, esta sea

interrumpida con seguridad por el equipo adecuado en el tiempo previsto, de manera que se pueda aislar el circuito dañado y continuar abasteciendo de energía eléctrica los circuitos vecinos, sin afectar otra área de producción.

### **1.7 Factores de los que depende la corriente de cortocircuito.**

La corriente de cortocircuito y su desarrollo en el tiempo depende varios factores que son los siguientes:

- ❖ Distancia en que se encuentra la fuente de corriente que alimenta la falla.
- ❖ Ángulo que se inicia el fenómeno con respecto al voltaje.
- ❖ Magnitud de la resistencia de los conductores con respecto a su reactancia.
- ❖ Magnitud y números de los motores de todo tipo que están conectados a la línea en el momento de la falla.

### **1.8 Métodos para el cálculo de la corriente de cortocircuito:**

- ❖ Método de ohms.
- ❖ Método del cálculo por unidades relativas (por unidad).
- ❖ Método de los MVA.
- ❖ Método de la impedancia de barra.
- ❖ Método de la corriente capacitiva a tierra.
- ❖ Método de la corriente media capacitiva a tierra.

El cálculo manual de la corriente de cortocircuito a través de los métodos antes mencionados, resulta una tarea bastante trabajosa cuando se desea conocer las corrientes de cortocircuito en fallas trifásicas o asimétricas. La resolución de estos métodos lleva implícito el conocimiento del método de las componentes simétricas para la conversión del sistema en los respectivos diagramas de

reactancias equivalentes de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero.

### 1.9 Sistemas de puesta a tierra mediante bobina Petersen.

En las redes donde el constante cambio de líneas aéreas por soterradas en media tensión y el aumento del número y longitud de nuevas líneas subterráneas ha producido un incremento en la capacidad total a tierra de la red MT y, en consecuencia, en la corriente capacitiva a tierra en caso de defecto.

Los problemas que traen aparejados este incremento de la corriente de defecto a tierra para este tipo de sistemas, y que provocan que los mismos pierdan la funcionalidad que el neutro aislado les permitían, son:

- ❖ Continuidad del suministro: Mantener el servicio incluso ante la aparición de un defecto a tierra era una de los objetivos fundamentales para adoptar un régimen de neutro aislado. En caso de alcanzarse corrientes de defecto suficientemente elevadas no será posible, sin el deterioro del material por razones térmicas, mantener la continuidad del suministro ante un defecto sin desconectar en un corto periodo de tiempo el circuito en falla.
- ❖ Seguridad de las personas: Los sistemas de puesta a tierra de protección están dimensionados para corrientes de defecto nulas o muy pequeñas, por lo que, al aumentar el valor de dichas corrientes, las tensiones de paso y contacto transferidas al terreno en las inmediaciones del defecto así como la tensión de neutro en las instalaciones de BT se pueden volver demasiado altas y peligrosas para la seguridad de las personas.
- ❖ Seguridad de materiales y equipos: El aumento de la *intensidad* de falta disminuye la probabilidad de autoextinción del arco en el punto de falta ante defectos transitorios tras la desconexión inicial del circuito, con lo que en sistemas de neutro aislado en el que se alcancen estas características se pueden dar fenómenos de graves sobretensiones escalonadas por

reencendidos sucesivos del arco, que dañan a los aislamientos del sistema y que llevan a la aparición a la postre de faltas bifásicas a tierra de alto valor de intensidad de defecto.

### 1.10 Origen del sistema de puesta a tierra resonante.

El sistema de puesta a tierra del neutro mediante bobina resonante fue invención del ingeniero alemán Waldemar Petersen en el año 1917 [14][15]. El primer prototipo de bobina de puesta a tierra resonante (ver figura 1.1) fue puesta en servicio dicho año sobre una red de 11 kV en la central eléctrica de Ludwigsburg (Suabia) perteneciente a la compañía eléctrica del Altwürttemberg, al norte de Stuttgart, y se conserva actualmente en el Deutsches Museum de Munich.



Figura 1.1 Primer prototipo de bobina resonante construida en 1917.

W. Petersen su inventor realizó una importante labor de investigación en el campo de la tecnología en corriente alterna, considerándose el padre de la ingeniería de alta tensión por sus estudios pioneros en la materia, publicando entre del primer prototipo de bobinas Petersen escribió otros libros como “Allgemeine Elektrotechnik” (Ingeniería Eléctrica), “Theorie der Wechselströme und Transformatoren” (Teoría de la corriente alterna y

transformadores), “Überströme und Überspannungen in Netzen mit hohem Erdschlussstrom” (Sobreintensidades y sobretensiones en redes con alta corriente de falta), “Die Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses” (Eliminación de faltas a tierra intermitentes) y en 1910 el denominado “Hochspannungstechnik” (Tecnología de la Alta Tensión), de reconocida importancia en su época. Esta investigación en los sistemas de corriente alterna (CA) le lleva en 1917 a la invención de la bobina supresora de arco eléctrico para fallas a tierra, y en 1918 de la tecnología de relés para detección de faltas a tierra por métodos vatimétricos, de aplicación en redes con neutro resonante (“Wattmetrische Erdschlussrelais”).

### **1.11 Principio de funcionamiento del sistema resonante**

un sistema de neutro mediante bobina Petersen consiste en la instalación de una bobina de alta impedancia entre el neutro del secundario del transformador AT/MT, o del generador de neutro artificial en caso de secundario en triángulo o de neutro no accesible, y tierra. El principio de funcionamiento del sistema se basa en elegir la inductancia de la bobina de compensación de valor tal que, al producirse un defecto monofásico a tierra, la intensidad reactiva consumida por la misma al elevarse la tensión a tierra del punto neutro a causa de la falla sea aproximadamente igual en módulo que la intensidad aportada a la falla por la capacidad total a tierra de la red MT.

De esta manera, la componente reactiva de la intensidad de falta en régimen permanente resulta nula y en consecuencia, si el defecto es de naturaleza no permanente, se autoextingue una vez finalizado el régimen transitorio de la corriente.

Si se analiza el circuito que representa el esquema a componentes simétricas de la red ante un defecto a tierra en el punto de fallo, lo que se produce con la adición al sistema de la bobina de Petersen, es un circuito resonante paralelo entre la capacidad a tierra de la red y la inductancia de la bobina. Ajustando el

valor de inductancia de la bobina a un valor LN tal que la capacidad C0 se encuentre en resonancia con el valor 3·LN a la frecuencia de la red ω (60 Hz):

$$W_{res} = W = 2\pi * 60Hz \quad 1.1$$

$$W_{res} = \sqrt{\frac{1}{3} * Ln * C0} \quad 1.2$$

Donde:

Wres: Frecuencia de resonancia del sistema.

W: Frecuencia angular, (rad/seg).

Ln: Inductancia de la bobina.

Co: Capacidad a tierra de la red.

La corriente permanente de falla a tierra se anula:

$$I_f = 3 * I_0 = I_l + I_c = 3 * V_0 * (jWC_0) + \frac{1}{3} * (jWLn) = 0 \quad 1.3$$

Donde:

IF: Corriente de falla a tierra.

Io: Intensidad residual.

IL: Corriente inductiva de la bobina.

Ic: Corriente capacitiva del sistema.

V0: Tensión de neutro a tierra.

Co: Capacidad a tierra de la red.

$V_f$ : tensión de fase

$W$ : Frecuencia de trabajo del sistema.

$L_n$ : Inductancia de la bobina.

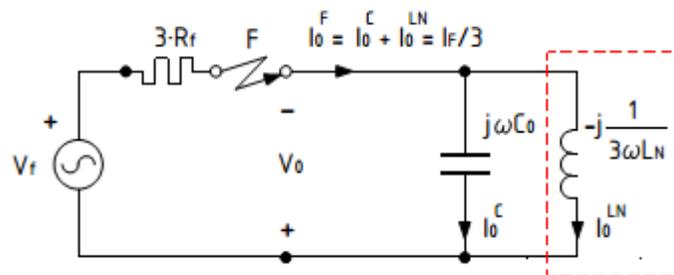


Figura 1.2 Esquema de secuencias para fallo fase-tierra en el punto de falla F (suponiendo  $Z_1$ ,  $Z_2$  y admitancia conductiva a tierra  $G_0$  de la red MT despreciables, y transformación AT/MT con secundario en conexión delta).

Se define el grado de compensación o sintonización del sistema Petersen a la relación entre la intensidad de la bobina y la corriente capacitiva total a tierra aportada por la red MT en condiciones de fallo a tierra:

$$\delta = \frac{I_l}{I_c} = \frac{1/X_{ln}}{3 * Y_0 C^t} = \frac{1}{3 * W^2 * L_n * C_0^t} \quad 1.4$$

Donde:

$I_L$ : Corriente inductiva de la bobina.

$I_c$ : Componente capacitiva de la corriente.

Una sintonización perfecta ( $\delta=1$ ) anularía la componente reactiva de la intensidad de falla (en cuadratura con la tensión homopolar) en el punto de fallo. Sin embargo, la existencia en la red MT de cierta admitancia a tierra de naturaleza conductiva  $G$  (pérdidas activas por efecto corona ante condiciones atmosféricas, pérdidas en los aisladores...), y la presencia habitual en los sistemas de neutro resonante de una resistencia de alta impedancia  $R_N$  instalada en paralelo con la inductancia de p.a.t., producen una componente activa, en fase con la tensión homopolar, que no es compensada por la bobina Petersen y que constituye la corriente residual de falta.

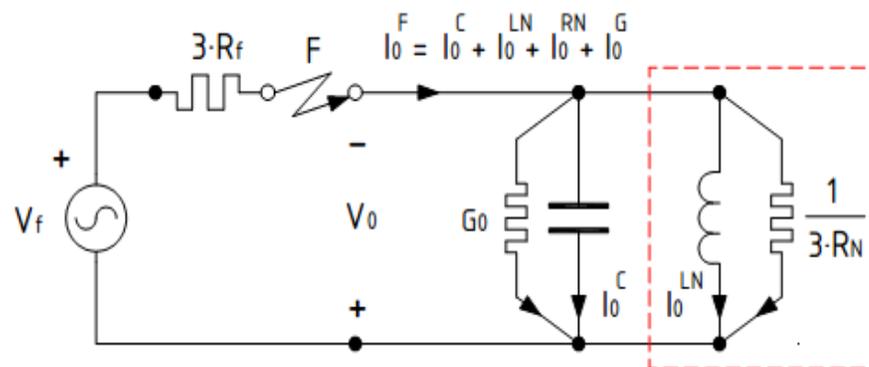


Figura 1.3 Esquema de secuencias considerando no despreciable la admitancia conductiva a tierra  $G_0$  de la red MT y la existencia en el sistema Peterson de una resistencia de neutro  $R_N$  en paralelo con la bobina.

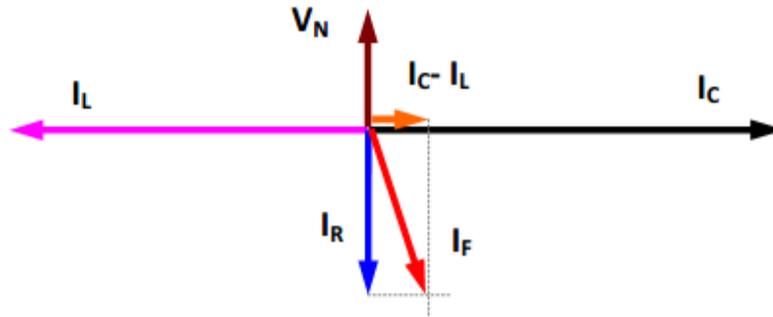


Figura 1.4 Intensidades de falla en un sistema de neutro resonante de sintonización no perfecta.

La citada resistencia de neutro  $R_N$  en paralelo con la bobina tiene dos funciones fundamentales:

- ❖ Facilitar la selectividad para el sistema de protecciones: Debido a la compensación de la intensidad capacitiva de defecto por la bobina Petersen, la estrategia seguida para identificar la línea en falta se realiza a través de la componente activa de la corriente. Debido a los pequeños valores de corriente a tierra originados por la conductancia de las líneas es necesario para el correcto funcionamiento de los relés direccionales incrementar la corriente resistiva residual mediante la adición a la bobina Petersen de una resistencia en paralelo de valor suficiente para mantener la corriente de falta a unas decenas de amperios.
- ❖ Mejora el comportamiento de las sobretensiones tanto en régimen normal, debido a posibles desequilibrios de admitancia fase-tierra que dan lugar a corrientes y tensiones homopolares amplificadas por la existencia de la bobina resonante, y en régimen de alta por defectos a tierra (tensión transitoria de recuperación en el punto de fallo), rotura de conductores o fallos en líneas vecinas con acoplamiento capacitivo.

## 1.12 Aspectos constructivos de la bobina Petersen.

### 1.12.1 Componentes del sistema Petersen.

#### 1.12.2 Transformador de puesta a tierra.

El sistema de p.a.t. resonante consiste esencialmente en un conjunto de resistencia y reactancia variable (bobina Petersen) en paralelo que se conecta al centro de la estrella MT del transformador AT/MT o al neutro artificial proporcionado por el transformador zig-zag. Cuando la instalación se realiza mediante neutro artificial, dado que la impedancia de la bobina Petersen y del transformador zig-zag resultan en serie en el esquema homopolar, es preciso que la reactancia de este último sea relativamente pequeña respecto a la del conjunto para que el sistema de regulación de la bobina sea capaz de realizar el ajuste en la reactancia hasta el valor necesario (se estima en un 20% el peso máximo que debe tener en la reactancia total la reactancia del zig-zag).

#### 1.12.3 Bobina Petersen.

Para dimensionar la bobina hay que tener en cuenta que en condiciones de falla a tierra:

- ❖ La tensión soportada en régimen permanente será prácticamente la tensión fase-tierra nominal.

$$U^{bp} = Vf \tag{1.5}$$

- ❖ La máxima intensidad sobre la bobina se corresponde con la de la toma de menor reactancia.

$$I^{bp} = \frac{Vf}{X_{bp}} \tag{1.6}$$

$$I_{bp\text{m}\acute{a}x} = \frac{V_f}{X_{bp\text{m}\acute{i}n}} \quad 1.7$$

#### 1.12.4 Resistencia de neutro.

La resistencia de neutro tiene la función de garantizar la presencia de una adecuada componente de corriente homopolar activa (del orden de 20 A a 30 A) que permita llevar a cabo la selectividad vatimétrica. Para dimensionar la resistencia paralelo RN se supone que la tensión de neutro (homopolar) ante defecto alcanza la tensión de fase tierra nominal.

Para dimensionar el valor de esta resistencia RN se tiene en cuenta que la bcomponente resistiva de la corriente de falla sea al menos de 5 a 15 veces menor que la corriente capacitiva [2], aunque manteniendo un valor suficiente para asegurar la detección (Enel Distribuzione en Italia y EDF en Francia limitan la corriente resistiva a entre 20 y 40 A [10]).

$$R_n = \frac{V_f}{I_{Rn}} \quad 1.8$$

La potencia térmica a disipar suele ser bastante elevada aunque el funcionamiento suele ser de corta duración. La resistencia paralela tiene normalmente un contactor que permite su conexión/desconexión del conjunto.

Esto es necesario por ejemplo cuando se realiza un acople entre dos barras sobre las que se encuentran dos transformadores AT/MT dotados de su propio sistema Petersen. Aunque se deban mantener ambas bobinas de Petersen, con el ajuste adecuado del nivel de compensación, para hacer frente a la compensación de la red

MT asociada a su barra, se debe desconectar una de las resistencias dado que si no se hace se doblaría la intensidad activa residual de falta aportada por la misma.

La corriente homopolar medida por los (Transformadores de corriente) TIs de la línea en falta es composición de la corriente capacitiva de las líneas sanas, de componente unidireccional amortiguada de constante de tiempo muy pequeña ( $t_C = R_s \cdot C$  con  $R_s$  resistencia serie de las LMT), y de la corriente inductiva aportada por la bobina, con una componente unidireccional de constante de tiempo más larga ( $t_L = L/R_s$  con  $R_L$  resistencia serie de la bobina).

Por lo anterior, esta corriente residual en la línea en falta contiene una componente unidireccional bastante grande y prolongada que puede provocar la saturación de los TIs y mal funcionamiento del dispositivo de protección, se recomienda la utilización de transformadores de intensidad de tipo toroidal para la medida de la intensidad homopolar de línea en lugar de los unipolares por no presentar este tipo de problemas).

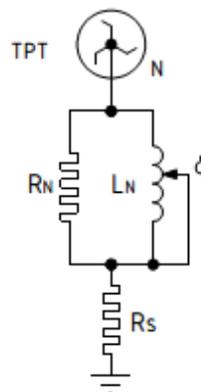


Figura 1.5 Esquema de la resistencia de neutro paralelo  $R_N$  y serie  $R_s$  en el sistema de puesta a tierra resonante.

### **1.13 Regulación de la bobina Peterson.**

El nivel de sintonización de la bobina es un factor que debe ajustarse a la operación y desarrollo de la red MT, dado que con el número de líneas acopladas a la misma barra MT y su longitud agregada se modifica la capacidad a tierra total del sistema. Para ello existen dos tipos constructivos de bobinas Peterson, de tipo fijo con tomas variables de manera manual en vacío y de núcleo magnético variable de regulación continua y automática.

### **1.14 Bobina de tipo fija**

La bobina de Peterson de tipo fijo es una reactancia con toma ajustable manualmente al valor apropiado para una configuración de red determinada. En este tipo de bobinas, además de no ser posible en general conseguir un nivel de compensación perfecta, el nivel de sintonización depende de las condiciones de operación de la red. Una vez elegido una toma concreta se hace necesario evaluar el campo de variación de la corriente de falla para las posibles condiciones de operación previstas (cantidad mínima de líneas acopladas, contribución capacitiva individual de cada línea a la falta...) y verificarse que la sintonización elegida sobre el rango anterior es compatible con el reglaje de las protecciones.



Figura 1.6 Bobina Peterson de tipo fija de uso exterior utilizada por ‘‘En el Distribuzione’’ (Italia). ZENNARO Electrical Constructions ([www.Zennarotrafo.com](http://www.Zennarotrafo.com)).

Constructivamente es una simple bobina al aire, al que se le añade un yugo de hierro para el cierre del flujo magnético, en el que se modifica la reactancia de la misma mediante la variación del número de espiras  $N$ .

En bobinas de Petersen de tipo fija, la resistencia de neutro paralelo se instala conectada directamente sobre la bobina.

La ventaja de utilizar una bobina de tipo fija reside en la sencillez y coste del dispositivo. Sin embargo, la corriente de falla dependerá del estado de operación de la red y en consecuencia cuando este se encuentre muy lejos del estado base a la que se realizara el ajuste de la sintonización, la probabilidad de no autoextinción del arco aumentará e incluso la protección direccional vatimétrica puede dejar de funcionar correctamente.

### **Conclusiones del capítulo:**

1. El nivel de sintonización de la bobina es un factor que debe ajustarse a la operación y desarrollo de la red de MT, dado que con el número de líneas acopladas a la misma barra de MT y su longitud agregada se modifica la capacidad a tierra total del sistema.
2. El grado de ajuste del sistema resonante afecta a la tensión de la red de MT en régimen normal de explotación, siendo máximo cuando se cumple la condición de resonancia.
3. A medida que se tenga una red de más tensión y más extensa (mayor corriente residual) será más difícil establecer un grado de sintonización que permita mantener la corriente a tierra lo suficientemente reducida como para que se dé la autoextinción del arco tras el defecto sin provocar sobretensiones inadmisibles en régimen normal.

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **2.1 Introducción:**

En este capítulo se describe la red de suministro de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, se muestran los resultados arrojados después de realizar un levantamiento del sistema de distribución de media tensión de la empresa desde conductores hasta consumidores para el cálculo por varios métodos de la corriente de cortocircuito a tierra, y se simula el comportamiento de la red utilizando el software EasyPower, para determinar las corrientes de secuencia en el punto de conexión de las bobinas para obtener el valor de ajuste óptimo de las protecciones contra fallas monofásicas mediante puesta a tierra de los transformadores 20,21, 22 y 23 T.

### **2.2 Descripción del sistema eléctrico de la empresa.**

El Dispositivo de Distribución Principal (DDP), como se muestra en la figura 2.1, es el nodo principal de la empresa, este cuenta con cinco secciones de barras distribuidas de la siguiente forma: se enlaza con el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) a través de dos transformadores de fabricación Soviética tipo TRDH-40000/115 17.6 T-Y, de 40MVA, La conexión proveedora principal llega a estos transformadores procedente de la subestación 220/110 kV ubicada en Punta Gorda, por medio de dos líneas aéreas de 110 kV con cables AC-185 mm<sup>2</sup>.

La salida de los dos transformadores están conectadas a la 2da y 4ta sección de barra respectivamente, las tres secciones restantes están conectadas a un generador cada una, las secciones 1ra, 3ra cuentan individualmente con un generador de 12 MW marca Skoda de producción checa y la 5ta con un generador de 25 MW tipo BDAX62-195ERH, estas cinco secciones de barra

forman un lazo cerrado mediante reactores, enlazándose las secciones I con II, II con III, III con IV, IV con V y V con I.

Desde el Dispositivo de Distribución Principal se le suministra energía a la propia CTE, así como las subestaciones de distribución 1SD, 2SD, 5SD y las subestaciones transformadoras ST6, ST7, ST8, ST12, ST14.

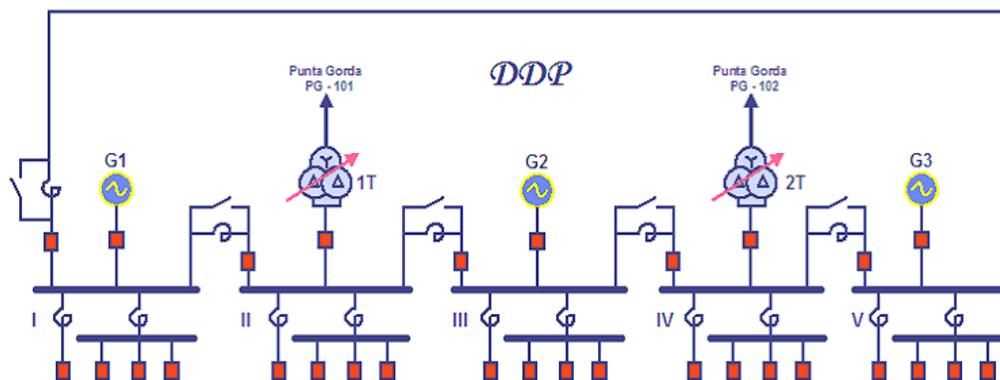


Figura 2.1 (DDP) Nodo principal de la empresa.

La subestación 1SD está localizada en la casa de compresores, consta de cuatro secciones de barra que permiten enlazarse entre ellas (I con II y III con IV), estas son alimentadas con una tensión de 10.5 kV, independientemente desde el Dispositivo de Distribución Principal (DDP). La subestación suministra energía a los motores más potentes de la empresa (los motores sincrónicos de 2500 y 1600 kW y los asincrónicos de 1700 kW), entre ellos se encuentran; cuatro molinos, seis motores sincrónicos para la producción de aire de servicio y transporte neumático, cinco motores asincrónicos, tres de ellos para la producción de los compresores de aire tecnológico y dos ventiladores, además, desde esta subestación se alimentan todas las subestaciones de alumbrado, así como las subestaciones de fuerza de la planta de Hornos de Reducción,

Lixiviación, Calcinación y Sínter, Recuperación de Amoníaco, Servicio Energético, el área de laboratorios, talleres y edificios administrativos.

La subestación 2SD se localiza también en la casa de compresores, consta de cuatro secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas por medio de interruptores, (I con II y III con IV), cada sección es alimentada por los transformadores 1T, 2T, 3T y 4T de 6300 kVA, los que se encargan de transformar la tensión proveniente del DDP de 10.5 kV a 6.3 kV, que es la tensión nominal de esta subestación. Desde aquí se le suministra energía a los motores asincrónicos y sincrónicos de 6,3 kV, (excavadoras, ventiladores, compresores), entre ellos se encuentran; tres compresores de aire de instrumento, cuatro ventiladores de circulación de los molinos, dos ventiladores de los silos, un ventilador de gases de los secaderos, la mina y dos Centros de Control de Motores (CCM) de media tensión denominados 3SD y 4SD. La subestación 3SD está ubicada en la planta de secaderos y es alimentada con una tensión de 6.3 kV desde la 2SD, la misma consta de dos secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas mediante un interruptor. Desde aquí se le suministra energía a los trasportadores, motores asincrónicos de las trituradoras, extractores de gases de los secaderos (exhauster) y a la planta de preparación de mineral.

La subestación 4SD se alimenta con una tensión de 6,3 kV proveniente desde la 2SD, la misma consta de dos secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas mediante un interruptor. Esta se encarga de alimentar a los motores sincrónicos que accionan las bombas de agua de la torre de enfriamiento y a los motores asincrónicos que accionan a los extractores de gases de la planta Calcinación y Sínter.

La subestación 5SD se encuentra ubicada en la planta de secaderos y se alimenta con una tensión de 10,5 kV desde la Central Termoeléctrica, la misma está compuesta por dos secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas mediante un interruptor.

Desde aquí se le suministra energía a varias subestaciones transformadoras, tales como: 5TP-6, 5TP-13, 5TP-19, 5TP-1y2, 5TP-4y5 y 5TP-21.

**Nota aclaratoria:** Aunque el generador de 25 MW ya está montado, por razones de trabajo en el montaje y ajuste de las protecciones, etc., aún no está entregando energía, por lo que la fábrica en estos momentos sigue alimentándose de las otras cuatro secciones de barra del Dispositivo de Distribución Principal.

### **2.3 Sistemas de protecciones.**

El sistema de media tensión de la fábrica es un sistema aislado, el de baja tensión se encuentra aterrado, razón por la cual el sistema de protección se adecua a las especificaciones técnicas de cada sistema en específico.

El sistema de protección está compuesto por diferentes protecciones que se encargan de proporcionarle a los dispositivos una mayor vida de explotación, estos son generalmente relés electrónicos o digitales (MUTILIN) para proteger los equipos de media tensión y para baja tensión se utilizan los interruptores automáticos, interruptores de cajas moldeadas e interruptores magnetotérmicos, así como interruptores electromagnéticos de tres polos de tipo BMPП-10 y 6 kV que tienen como función la conexión y desconexión de los circuitos eléctricos en régimen normal y de avería, entre los valores de corrientes usados se encuentran los de 630, 1000, 1250 y 2500 A. Las protecciones a motores, objetos de prioridad principal a proteger, son relativamente variables ya que dependen en gran medida de las condiciones y el régimen de trabajo a las que se someten, principalmente se usan interruptores de cajas moldeadas, interruptores automáticos especialmente e interruptores térmicos para fallas de sobrecargas.

Cuenta además con 2532 motores de baja tensión y 59 de media tensión para un total aproximado de 2591, lo que representan, según sus usos y de acuerdo con las condiciones a las que son sometidos, el mayor porcentaje de fallas que

ocurren en el sistema provocando las mayores pérdidas económicas en el proceso productivo, razón por la cual la investigación se dirigirá principalmente hacia las principales causas y los efectos que generan las fallas de los motores y las consecuencias que traen para el sistema en estudio.

#### **2.4 Descripción del Cableado del sistema de suministro de media tensión.**

El sistema de suministro de media tensión de la fábrica cuenta fundamentalmente con dos tipos de conductores, véase figura 2.2, mayormente conductores trefilares de aluminio (trenzado), de la compañía GENERAL CABLE de 6/10kV (Secos), estos poseen buenas cualidades en cuanto a la no propagación del fuego y la no contaminación del medio ambiente. El nivel máximo de tensión para el que fueron fabricados es menor de 10.5 kV que es la tensión nominal de gran parte del sistema de suministro, lo que provoca la ocurrencia ocasional de averías, además de estos, en menor grado, cuenta con conductores trefilares de aluminio (Barras), de fabricación soviética, del tipo AAΨB-T (En aceite). El aislamiento de estos conductores está hecho con papel especial, impregnado en aceite, debido a su deterioro paulatino han sido sustituidos casi en su totalidad. Es válido destacar que estos conductores (AAΨB-T) cuentan aproximadamente con 30 años de explotación, por lo que en estos tipos de cables son muy frecuentes las fallas, debido, entre otros aspectos, a la pérdida del aceite y daños físicos, además de haber superado ya el tiempo máximo de explotación que otorga el fabricante, en Anexos; Tabla 3, se muestran tablas por subestaciones con datos actualizados de los conductores, se tiene en cuenta, armario del que se conecta, consumidor que alimenta, sección transversal, longitud en metros y tipo de conductor.

En los últimos años se han cambiado los conductores en aceite por conductores de aluminio trenzado 12/20 kV, secos.

En el anexo 1 tabla 1, se realiza un levantamiento de los conductores existentes en 10kV y tabla 2, 3, y 4 se describen los cambios de conductores realizados y propuestos desde el año 2012-2014.



Figura 2.2 Secciones de los conductores, AAΨB-T y GENERAL CABLE.

## 2.5 Descripción de las máquinas sincrónicas existentes en la empresa.

En la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” existen instaladas 29 máquinas sincrónicas, agrupadas de la siguiente forma:

- ❖ 3 Turbogeneradores.
- ❖ 2 Compresores K-500.
- ❖ 4 Compresores 5HK.
- ❖ 4 Motores de los Mecanismos Principales de los Molinos de Bolas.
- ❖ 9 Bombas de Agua.
- ❖ 4 Motores de los Mecanismos Principales de las Excavadoras.
- ❖ 3 Compresores BM.

En Anexos, Tabla 5 aparecen las características de chapa de todas estas máquinas.

## 2.6 Operación en régimen normal sin fallos de las bobinas Petersen.

La presencia de la bobina de Petersen conectada sobre el neutro MT tiene influencia en las magnitudes eléctricas de tensión e intensidad incluso en régimen normal de operación debido al efecto amplificador por parte del sistema resonante de los posibles desequilibrios en la admitancia de fase a tierra que pudiesen existir en la red de media tensión. Estos aspectos hay que tenerlos en

cuenta para evitar funcionamientos anómalos de la red asociados al empleo de la bobina de Petersen.

### **2.6.1 Tensión de neutro (homopolar) por desequilibrio transversal a tierra**

En régimen normal de operación, en un sistema trifásico equilibrado de tensiones MT sobre una red de media tensión con admitancia de fase a tierra también equilibrada no aparece diferencia de tensión entre el neutro MT y tierra, y en consecuencia tampoco aparece intensidad homopolar circulando por la puesta a tierra del neutro. Sin embargo, en caso de que por una disposición geométrica asimétrica de los conductores respecto al terreno y la ausencia de transposición en líneas MT, la capacidad a tierra de las tres fases (capacidad a secuencia homopolar) no sean iguales entre sí, aparecerá un cierto desequilibrio transversal que dará lugar, aun estando el sistema de tensiones equilibrado, a la circulación de corrientes no equilibradas y un aumento de la tensión del neutro a tierra.

$$V_o = V_{ng} = -V_f * \frac{k}{\sqrt{1 - \delta^2 + D^2}} \quad 2.1$$

Donde:

- ❖ D: Factor de amortiguamiento.
- ❖ K: Factor de asimetrías de admitancias.
- ❖  $\delta$ : Factor de sintonización del sistema resonante.

La tensión de neutro a tierra será tanto mayor como lo sea la asimetría de admitancia a tierra y más cerca de la condición de resonancia ( $\delta$  tiende a 1) se encuentre el sistema formado por la bobina de Petersen y la capacidad de la red.

A medida que la capacidad a tierra de la red aumenta, también lo hace la tensión de neutro al acercarnos a la condición de resonancia para una resistencia de neutro dada, por lo que a la hora de diseñar el sistema de puesta

a tierra (p.a.t) es conveniente instalar con la bobina Petersen una resistencia de neutro de valor adecuado a la capacidad de la red y mantener un grado de sintonización algo diferente del correspondiente a la resonancia perfecta.

La ventaja que se obtiene de la característica anterior es que se puede aprovechar la asimetría de fases para determinar de manera experimental el punto de sintonización de la red MT a través de la medida de la tensión de neutro.

## 2.7 Operación en régimen de fallos.

### 2.7.1 Intensidad de falla a tierra.

La intensidad de falta a tierra para un sistema con neutro resonante es, despreciando la impedancia directa del sistema aguas arriba del defecto y considerando todas las fuentes de intensidad homopolar (admitancia conductiva  $G_0$  y capacitiva  $C_0$  a tierra de la red MT, bobina LN y resistencia  $R_N$  de puesta a tierra del neutro):

$$I_{af} = \frac{3 * U_f * \left[ \left( G_0 + \frac{1}{3R_n} \right) + j \left( WC_0 - \frac{1}{3WL_n} \right) \right]}{1 + 3R_f * \left[ \left( G_0 + \frac{1}{3R_n} \right) + j \left( WC_0 - \frac{1}{3WL_n} \right) \right]} \quad 2.2$$

El objetivo para un buen funcionamiento del sistema Petersen es reducir lo más posible mediante la sintonización del sistema resonante la corriente capacitiva en el punto de falta aunque manteniendo un valor mínimo de aportación de intensidad de componente activa que pueda ser detectado por los transformadores de intensidad de las salidas MT y detectar el fallo selectivamente. La componente activa de la corriente residual homopolar medida en la línea en falla está siempre en antifase con la tensión homopolar, mientras que en las líneas sanas se encuentra en fase con ella.

### **2.7.2 Sobretensiones temporales.**

En general, la magnitud de las sobretensiones esperadas en un sistema MT ante fallo monofásico a tierra se puede expresar en función de las características de la red y del sistema de puesta a tierra.

Dado el efecto contrapuesto que tiene la impedancia de puesta a tierra respecto a limitar la intensidad de falta y la tensión, la adopción del valor adecuado será un compromiso técnico y económico que mantenga unos valores de sobretensiones a tierra suficientemente reducidas para las tensión soportada por el nivel de aislamiento de la red y unas corrientes de cortocircuito que, si bien sean suficientemente elevadas para su detección, permitan utilizar un conjunto de prestaciones y costes viables económicamente para la red de MT.

#### **2.7.2.1 Sobretensiones por reencendido del arco eléctrico en sistemas de alta impedancia.**

Un fenómeno por sobretensiones de tipo temporal crítico que se puede dar ante fallo a tierra en caso de sistemas con neutro no conectado a tierra es el de aparición de sobretensiones escalonadas en cadena por recibidos sucesivos del arco eléctrico en el punto de falta tras el despeje inicial de la misma [9]. Este tipo de sobretensiones pueden llevar a la destrucción de los aislamientos del sistema aunque estos estén dimensionados para las sobretensiones temporales esperadas determinadas anteriormente.

A consecuencia de tener el neutro de sistema no referenciado a tierra mediante ningún tipo de conexión fija (neutro “flotante”) y la existencia de capacidades a tierra que pueden mantener el potencial eléctrico hasta su descarga gradual, la tensión del sistema trifásico de tensiones. puede evolucionar de forma creciente respecto a tierra en caso de sucederse una secuencia de recibidos del defecto en el punto de falta en los instantes de tiempo en el que la tensión a tierra del sistema remanente alcanza su valor máximo.

Si este fenómeno se fuese sucediendo en cadena cada 1/2 ciclo, realimentado por los sucesivos aumentos de tensión (5x, 7x...), se podrían llegar a

sobretensiones que llevarían a los aislamientos a su destrucción y a la aparición de múltiples fallos a tierra en el sistema (fallo bifásico, de intensidad no limitada) si no se ponen los medios adecuados (protecciones de detección de sobretensiones o establecer un tipo conexión de neutro a tierra de tipo bobina resonante):

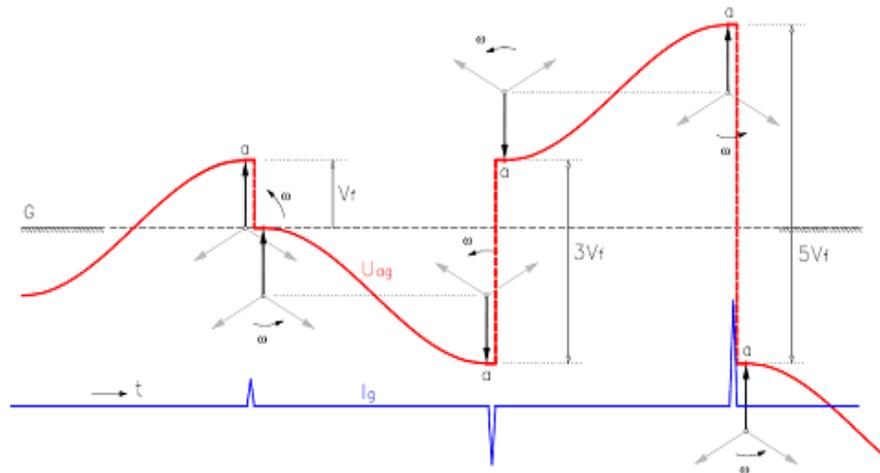


Figura 2.3 Evolución de la tensión fase-tierra en sistema con neutro aislado ante reencendido intermitente del arco eléctrico.

### 2.7.3 Tensión transitoria de recuperación.

Cuando aparece un defecto monofásico a tierra en un sistema con neutro resonante [11], por ejemplo por un defecto de aislamiento en una fase de la red, se produce un arco eléctrico en el punto de contacto F y una circulación de corriente a tierra transitoria que se extingue cuando la tensión a lo largo del arco eléctrico pasa por cero. Sin embargo, una vez pasado este instante, a medida que empieza a crecer de nuevo a lo largo del arco la tensión de polaridad inversa, este puede volver a cebarse si se alcanzase entre los extremos la tensión suficiente a la velocidad necesaria para que vuelva a producirse la disrupción del medio aislante. Esta situación se representa mediante el circuito de la figura 2.4:

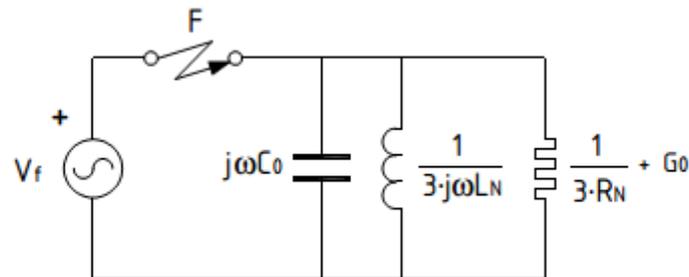


Figura 2.4 Sistema equivalente en el punto de defecto F tras la aparición del arco.

A medida que aumenta la resistencia a tierra (red MT con menos pérdidas conductivas) en el sistema resonante, la velocidad de restablecimiento de la tensión en el arco se hace más pequeña con lo que la capacidad dieléctrica del media aislante vuelve a restablecerse antes de que la tensión se haga lo suficientemente grande como para volver a iniciarse la corriente por el defecto.

### 2.7.2 Extinción del arco eléctrico

La extinción de un arco eléctrico en aire depende fundamentalmente de dos factores: del valor de la corriente y de la evolución de la tensión transitoria de recuperación entre el punto de defecto y tierra.

Cuanto mayor sea la corriente, mayor será la temperatura del medio, más ionizado se encontrará el aire y en consecuencia será menor la probabilidad de que el arco se extinga dentro de un periodo de tiempo determinado. Por su parte, a medida que aumenta la tensión de restablecimiento (TRV), disminuye también dicha probabilidad tras un intento de extinción.

Por tanto, la capacidad de autoextinción en el aire aumenta considerablemente en sistemas con neutro resonante, debido a la menor corriente de arco fase-tierra a causa de la compensación y a que, al limitar la impedancia de puesta a tierra el valor y la evolución de la tensión de restablecimiento, la TRV se

mantiene suficientemente baja para ocurra el recebado incluso cuando la compensación de la componente capacitiva de falta no sea perfecta.

## **2.8 Softwares utilizados.**

### ***2.8.1 Easy power. Montaje del sistema de suministro de media tensión.***

Para la actualización y montaje del esquema monolineal se utilizó el software Easy Power para lograr tener el valor preciso de los parámetros que se deseen conocer y que el cálculo sea lo más acertada posible hay que tener en cuenta que los parámetros de los consumidores y los conductores deben ser los reales. La figura 2.5, muestra cómo queda conformado el esquema monolineal de media tensión de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", montado en la ventana de trabajo del software EasyPower.

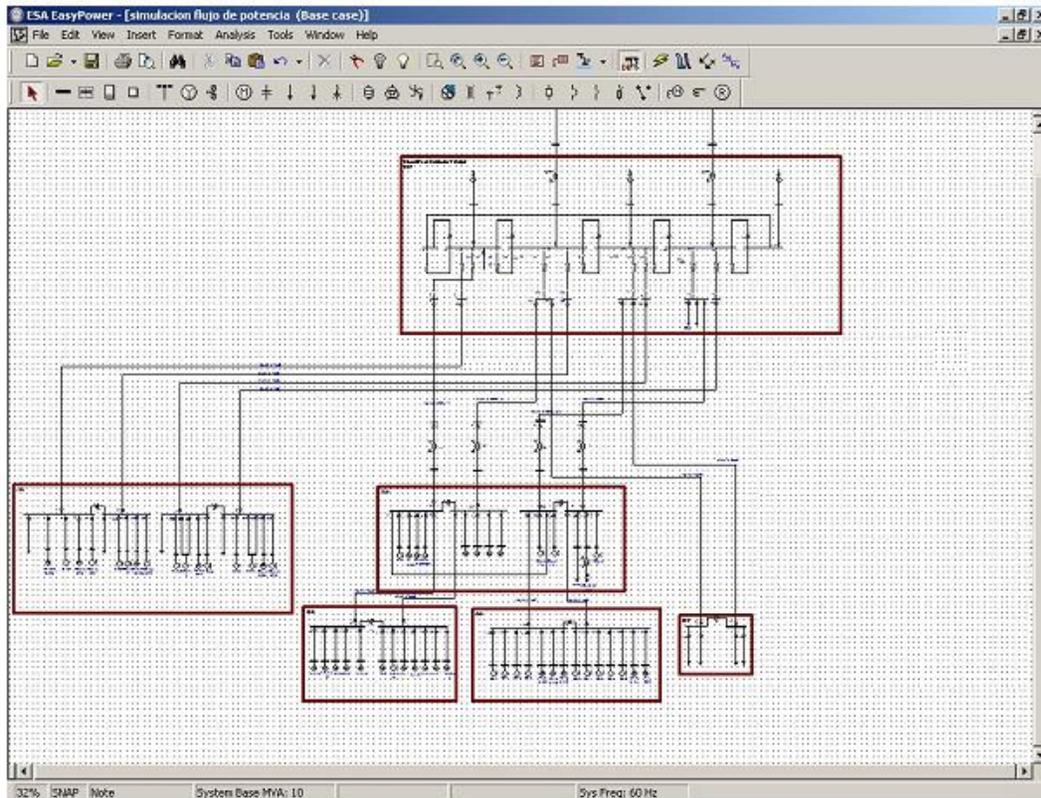


Figura 2.5 Esquema de suministro de media tensión en el Software Easy Power.

Además mediante la simulación fue posible la obtención de las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero como se muestra en siguiente tabla.

Tabla 2.1 Datos obtenidos de las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero

Transformador	20T	21T	22T	23T
$I(+)$	8.273	8.218	8.495	8.330
$I(-)$	8.273	8.218	8.495	8.330
$3*I(0)$	25.580	25.672	26.419	25.814

### **2.8.2 Matlab.**

Para realizar el cálculo de corriente de cortocircuito monofásica se utilizó un script del software Matlab que es un programa interactivo para computación numérica y visualización de datos. Es ampliamente usado por Ingenieros de Control en el análisis y diseño, posee además una extraordinaria versatilidad y capacidad para resolver problemas en matemática aplicada, física, química, ingeniería, finanzas y muchas otras aplicaciones.

Está basado en un sofisticado software de matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones. Permite resolver complicados problemas numéricos sin necesidad de escribir un programa. Es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos.

Goza en la actualidad de un alto nivel de implantación en escuelas y centros universitarios, así como en departamentos de investigación y desarrollo de muchas compañías industriales nacionales e internacionales. En entornos universitarios, por ejemplo, MATLAB se ha convertido en una herramienta básica, tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes, como una importante herramienta para impartir cursos universitarios, tales como sistemas e ingeniería de control, álgebra lineal, proceso digital de imagen, señal, etc. En el mundo industrial, MATLAB está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Ver programación para el cálculo en anexo 2.

### **2.9 Cálculo de corriente de cortocircuito monofásica de compensación mediante puesta a tierra.**

La corriente de cortocircuito monofásica durante la ida a tierra de una fase de la red en un sistema con neutro [16] es:

$$I_{cc} = \sqrt{3} * U_n * W * C_{11} * L * 10^{-6} \quad 2.1$$

Pero con  $C_{11} \approx 0.56 * C_p$

$$I_{cc} = \sqrt{3} * U_n * W * 0.56 * C_p * L * 10^{-6} * \quad 2.2$$

$$W = 2\pi * f \quad 2.3$$

Donde:

- ❖  $U_n$ : Voltaje nominal de línea, (v).
- ❖  $W$ : Frecuencia angular, (rad/s).
- ❖  $C_p$ : Capacidad a tierra de los conductores,  $\mu\text{F}/\text{km}$ .
- ❖  $L$ : Longitud de la línea, km.
- ❖  $F$ : Frecuencia de la red (Hz).

#### Datos nominales de la red:

$U_n = 10 \text{ kV}$      $F = 60 \text{ Hz}$      $W = 376.8 \text{ rad/s}$

Para el cálculo de los cables de 10kV las longitudes se tomaron del levantamiento y de los pedidos realizados por la empresa para la sustitución de conductores hasta el año 2014 ver anexo 1 Tabla 1,2, 3, y 4.

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x50.

$I_{cc} = 2.097 \text{ A}$ .

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x70.

$I_{cc} = 5.2084 \text{ A}$ .

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x95.

$I_{cc} = 17.2049 \text{ A}$ .

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x120.

$$I_{cc} = 8.7164 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x150.

$$I_{cc} = 3.6284 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x185.

$$I_{cc} = 17.9136 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 1x400.

$$I_{cc} = 1.9324 \text{ A.}$$

La corriente de cortocircuito total a tierra será:

$$I_{ccT} = \sum I_{cc}.$$

$$I_{ccT} = 56.7012 \text{ A.}$$

El cálculo aproximado de la  $I_{cc}$  puede realizarse con ayuda de los valores medios de la corriente capacitiva de cortocircuito monofásica (Manual electrotécnico página 161)

$$I_{cc} = I_c * L$$

Donde:

$I_c$ : Corriente media capacitiva de cortocircuito (Datos tomados de catálogos dados por los fabricantes).

$L$ : Longitud, km.

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x50.

$$I_{cc} = 0.77 * 2.72 = 2.0944 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x70.

$$I_{cc} = 0.9 * 5.17 = 4.653 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x95.

$$I_{cc} = 1 * 12.45 = 12.45 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x120.

$$I_{cc} = 1.1 * 7.68 = 8.448 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x150.

$$I_{cc} = 1.3 * 3.03 = 3.939 \text{ A.}$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 3x185.

$$I_{cc} = 1.4 * 10.44 = 15.016.$$

Para los cables de aluminio trenzado, de sección 1x400.

$$I_{cc} = 1.8 * 0.24 = 0.432 \text{ A.}$$

La corriente de cortocircuito media total será:

$$I_{ccmT} = \sum I_{cc}$$

$$I_{ccmT} = 47.0324 \text{ A.}$$

Por el método de las capacidades a tierra de los conductores:

$$I_{ccT} = 56.7 \text{ A.}$$

Por el método de la corriente media capacitiva de cortocircuito a tierra:

$$I_{ccmT} = 47.0324 \text{ A.}$$

- ❖ El nivel de diferencia entre los valores calculados por ambos métodos es de  $\approx 13.5\%$ .

La potencia instalada de los reactores supresores de arco eléctrico se calcula:

$$Q_k = 1.25 * I_{ccT} * U_f \tag{2.4}$$

$$U_f = U_n / \sqrt{3} \tag{2.5}$$

Donde:

$I_{ccT}$ : Corriente de cortocircuito total, (A).

$U_f$ : Voltaje de fase, V.

Un: Voltaje nominal de línea.

$$Qk1 = 1.25 * 56.7 * \frac{10}{\sqrt{3}} = 409.197 \text{ kVA.}$$

$$Qk2 = 1.25 * 47.0324 * \frac{10}{\sqrt{3}} = 339.43 \text{ kVA.}$$

Elección del ajuste de las bobinas supresoras de arco eléctrico. En presencia de fallas monofásicas la corriente que circula por la bobina será:

$$I_l > I_{ccmT} = I_{ccT} \quad 2.6$$

Tabla 2.2 Datos de chapa de las bobinas RPT-1 y RPT-2:

Escalón	Posición	Bornes	Régimen de trabajo
49	V	A1-X1	6 HORAS
43	IV	A1-X1	Continuo
36.5	III	A-X1	Continuo
30.5	II	A1-X	Continuo
24.5	I	A-X	Continuo

a)  $I_{ccmT} = 47.0324 \text{ A.}$

Para que se cumpla la condición  $I_L > I_{ccmT}$  ambas bobinas deben estar conectadas en el escalón I. La corriente inductiva de la bobina es:

$$I_{Lbob \ I} = 24.5.$$

$$I_{Lbob \ I\sum} = 24.5 + 24.5 = 49 \text{ A.}$$

**La componente reactiva de la corriente de cortocircuito es:**

$$I_{\text{Reactiva}} = I_{\text{Lbob I}} - I_{\text{ccmT}} \quad 2.7$$

$$I_{\text{Reactiva}} = 49 - 47.0324 = 1.9676 \text{ A.}$$

1.9676 A < (Máximo permisible) 5A, está dentro de la norma.

**Nivel de desajuste:**

$$V = \frac{I_{\text{Lbob I}} - I_{\text{ccmT}}}{I_{\text{ccmT}}} \quad 2.8$$

$$V = \frac{49 - 47.0324}{47.0324} * 100\% = 4.2\%$$

V = 4.2% < Máximo recomendable (5%).

b)  $I_{\text{ccT}} = 56.7 \text{ A.}$

Para satisfacer la condición  $I_{\text{L}} = I_{\text{ccT}}$  es necesario conectar las dos bobinas al escalón II.

$I_{\text{Lbob II}} = 30.5 \text{ A}$

$I_{\text{Lbob II } \Sigma} = 30.5 + 30.5 = 61 \text{ A.}$

**La componente reactiva de la corriente de cortocircuito es:**

$I_{\text{reactiva}} =$

$I_{\text{reactiva}} = 61 - 56.7 = 4.3 \text{ A.}$

4.3A < 5A (Máximo permisible).

**Nivel de desajuste:**

$$V = \frac{I l \text{ bob } I \Sigma - I_{ccmT}}{I_{ccmT}} \quad 2.8$$

$$V = \frac{61 - 56.7}{56.7} * 100\% = 7.58\%$$

7.58 > 5% (Máximo permisible).

### 2.10 Cálculo de la reactancia inductiva de las bobinas supresoras de arco eléctrico mediante el método de la impedancia.

A partir de los valores obtenidos mediante la modelación de cortocircuito, es posible obtener las reactancias equivalentes en el punto a través de la ley de ohm para corriente alterna.

$$U = I * X \quad 2.9$$

Despejando los valores de reactancia se obtiene los siguientes resultados:

$$X(+)= \frac{6.06kV}{8.273A} = j732.76\Omega.$$

$$X(-)= \frac{6.06kV}{8.273A} = j732.76\Omega.$$

$$X(0) = \frac{6.06kV}{8.53A} = j710.43\Omega.$$

$$I_{cc1\Phi} = I(+)+I(-)+I(0) \tag{2.10}$$

$$I_{cc1\Phi} = 42.126 A.$$

$$I_{cc1\Phi} = \frac{3 * E(A)}{j(X(+)+X(-)+X(0))+3 * X_n} \tag{2.11}$$

$$3 * X_n = 431.56 - j1443.19$$

$$X_n = 502.58 \Omega.$$

### 2.11 Métodos de protección a tierra.

El valor de la impedancia de puesta a tierra influye sobre el método de protección necesario contra los defectos fase-tierra. De forma general, cuando más importantes son las corrientes de defecto, más fácil es su detección; e inversamente, cuanto más débiles son las corrientes de defecto, más delicada y sensible a fenómenos parásitos es su detección. Por otra parte es deseable, y a veces imperativo, realizar esta protección, no en un punto solamente sino sobre cada una de las arterias de la red, con un funcionamiento selectivo entre los relés.

La protección de los defectos fase-tierra se realiza mediante relés de máxima intensidad alimentados por la corriente de tierra. La medida se puede llevar a cabo:

- ❖ Mediante un único transformador toroidal atravesado por los tres conductores de fase, el cual nos detectará directamente la suma de las tres corrientes (nula en ausencia de defecto).

- ❖ Mediante tres transformadores de intensidad, con los secundarios conectados de forma que puedo obtenerse un conductor neutro recorrido por la suma de las tres intensidades de fase.
  
- ❖ La solución transformador toroidal es la más precisa, si las condiciones de la instalación a base de cables la hacen posible, pero evidentemente no es aplicable en embarrados o líneas aéreas.

## **CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.**

1. Se logró realizar la actualización de las bases de datos de la totalidad de los conductores de media tensión del sistema de suministro de la empresa, teniendo en cuenta sección transversal, longitud y tipo.
2. Para el montaje y simulación del esquema de media tensión en el software EasyPower fue necesario la actualización de los datos de cargas y conductores.
3. Se determinó el valor de ajuste óptimo para las bobinas Petersen con lo cual se mejora la confiabilidad del sistema.
4. El nivel de sintonización de las bobinas de Peterson tipo fija nunca será del 100%, debido a que solo se tienen valores fijos de inductancia en la bobina y no el requeridos de manera exacta por la capacidad de la red.

## **CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.**

### **3.1 Introducción:**

En este capítulo se realiza el análisis técnico económico de las propuestas, se determina el ahorro por concepto de producción, así como la variante más efectiva en la limitación de fallas a tierra.

#### **Opciones:**

En este proyecto se consideraron las tres opciones siguientes:

- ❖ De no implementarse el proyecto, se continuarían confrontando las dificultades actuales del equipamiento con pérdidas considerables para la producción.
- ❖ Ajustar las bobinas al valor de ajuste calculado.
- ❖ Sustituirlas por una de las variantes que a continuación se presentan para la limitación de corriente de cortocircuito. Con esto garantizamos mayor confiabilidad del sistema eléctrico para la planta y minimizar las pérdidas que afecten la producción por paros del sistema productivo ante la presencia de fallas.

### **3.2 Variantes para limitar las corrientes de cortocircuito:**

La solución más común para superar las limitaciones impuestas a los equipamientos por deficiencias en la capacidad para manejar corrientes de cortocircuito, que superan los valores nominales son: la sustitución de equipos, cambiar la tipología de la red, introducir altas impedancias en los transformadores, usar reactores limitadores en series.

No obstante estas alternativas tienen sus inconvenientes como: altos costos, pérdidas de energía y otros.

Fundamentalmente las alternativas para limitar las corrientes de cortocircuito se centran en la posibilidad de introducir medios que permiten variar la impedancia del sistema o no.

A continuación se realizan varias propuestas que pueden dar solución al problema planteado en este trabajo de diploma.

### **3.2.1 Variante 1: Ajuste de las bobinas Peterson tipo fija.**

Partiendo del levantamiento de conductores en 10kV y el pedido para la sustitución del año 2015 se determinó el nivel de ajuste de las bobinas de Peterson tipo fija con tomas variables existentes en los transformadores 20, 21, 22 y 23 T de la empresa comandante Ernesto Che Guevara en dependencia de la capacidad a tierra de los conductores y la longitud y otro método utilizando la corriente media capacitiva de cada conductor y la longitud.

Este método presenta la ventaja de no necesitar inversiones, pero tiene el inconveniente de que a medida que se realicen cambios en las redes de 10 kV se debe ajustar el valor de corriente inductiva de la bobina de valor aproximadamente igual al que se calcule de corriente capacitiva que aporten las fuentes de cortocircuito. Además nunca tendrá un nivel de sintonización del 100% debido a que no se puede ajustar con ese nivel de precisión porque son valores fijos de corriente en las tomas de las bobina, no regulables.

El nivel de desajuste calculado por el método de las corrientes capacitivas a tierra teniendo en cuenta capacidad y longitud del cable es de 4.5%, mientras que por el método de cálculo de las corrientes medias capacitivas es de 7.8%. El valor de ajuste de las bobinas Peterson existentes en el sistema de 10kV  $I_{cc1\phi}=56.7$  A. El valor de la toma de reactancia a la cual debe estar en funcionamiento es de valor igual  $X_L= 502.58 \Omega$ .

Para lograr sintonizar correctamente las bobinas es necesario la conexión de las dos bobinas en el escalón 3, para ello es primordial que estén en funcionamiento los transformadores 22T o 23T. Lograr mantener un nivel de sintonización como el requerido por la red de media tensión de la empresa

Cdte. Ernesto Che Guevara es complicado debido a los cambios que se realizan diariamente en el cableado, debido a fallas que a menudo aparecen.

Una vez elegido una toma concreta se hace necesario evaluar el campo de variación de la corriente de falla para las posibles condiciones de operación previstas (cantidad mínima de líneas acopladas, contribución capacitiva individual de cada línea a la falla...) y verificarse que la sintonización elegida sobre el rango anterior es compatible con el ajuste de las protecciones.

### 3.2.2 Variante 2: Bobina de hierro móvil.

A diferencia de las de tipo fijo, el mecanismo de variación de la reactancia en este tipo de bobinas consiste en la modificación del entrehierro del circuito magnético a través de la inserción en mayor o menor medida de una pieza magnética móvil en forma de émbolo en el núcleo de la bobina.

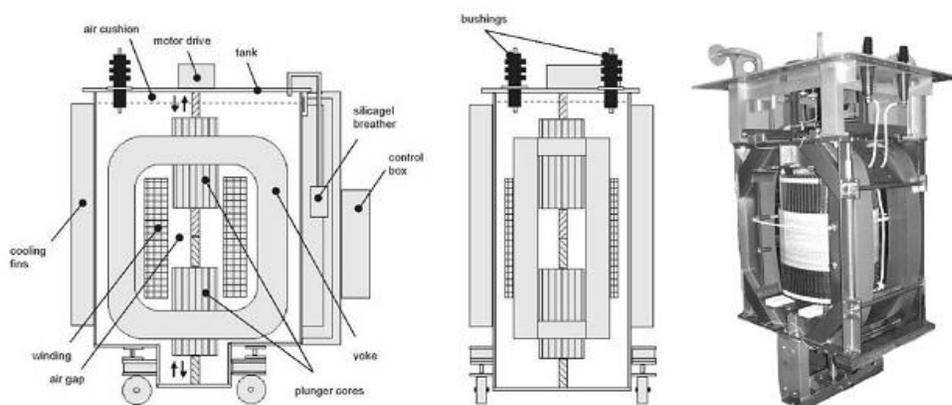


Figura 3.1 Bobina Petersen de núcleo variable. Arc Supression Coils ([www.trenchgroup.com](http://www.trenchgroup.com)).

La reactancia consta de una bobina en cuyo interior se encuentra una columna de material ferromagnético con un eje vertical, dividido en dos mitades separadas formando un entrehierro. Mediante la acción de un motor se acercan

o alejan entre sí las dos mitades de hierro aumentando o disminuyendo el volumen del entrehierro. En la parte superior e inferior de la bobina un yugo de hierro permite cerrar por un camino externo el flujo magnético.

El motor que mueve el émbolo es accionado y controlado desde un sistema de control que se ajusta automáticamente a la sintonización requerida con la ayuda de un analizador de neutro. Con el que es posible mantener un grado de compensación perfecto si se desea incluso ante cambios en la configuración de la red MT. En bobinas de Peterson de núcleo móvil la resistencia de neutro paralelo se realiza sobre un devanado auxiliar secundario en baja tensión (~ 500 V) de la bobina principal que mejora las sollicitaciones dieléctricas sobre la misma y permite la conexión del analizador de neutro en BT. En bobinas de tipo fija con tomas, no es posible instalar la resistencia mediante un devanado auxiliar dado que al modificarse la toma de la bobina se modificaría también la resistencia equivalente a tierra del sistema en relación cuadrática del número de espiras de la bobina y del devanado secundario.



Figura 3.2 Aspecto de una bobina Petersen de núcleo magnético móvil y vista interior del mecanismo de sintonización automática. A: accionamiento eléctrico, B: eje (posición 100%), C: parte fija del núcleo.

### 3.2.2.1 Analizador de neutro.

Un analizador de neutro es el dispositivo encargado de realizar el control de la bobina móvil, determinando el estado de compensación actual y requerido del sistema y mandando el accionamiento eléctrico que desplaza el mecanismo.

El analizador de neutro es capaz de determinar la capacidad total a tierra de la red MT en cada instante, y el punto de sintonización en que se encuentra el sistema, a través de la medida de tensión e intensidad homopolar de neutro en el punto de conexión de la bobina. Para ello, analiza la característica de la curva de tensión homopolar que experimenta el sistema con la variación de la intensidad homopolar (intensidad de neutro) a través de la modificación de la reactancia de la bobina Petersen aprovechando la curva de resonancia que se manifiesta de forma natural en estado sin fallos en la red a causa de los desequilibrios transversales de capacidad de fase a tierra existentes o creando de manera artificial dicha curva mediante la inyección de corriente sobre el neutro del sistema (la bobina Petersen se encuentra sintonizada al 100% con la capacidad total a tierra de la red MT cuando se produce el máximo en la  $U_0$  medida).

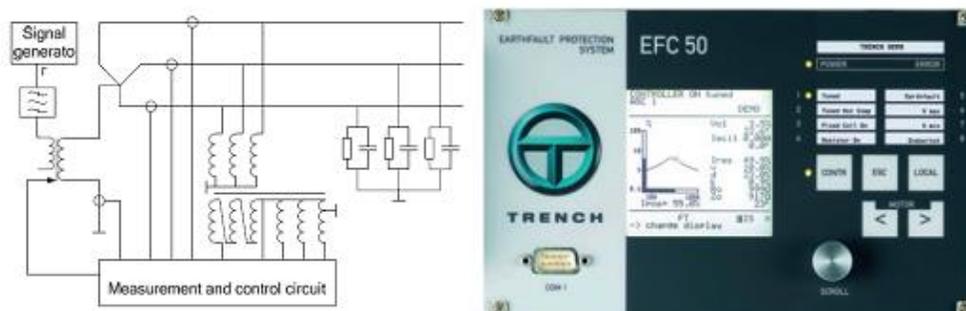


Figura 3.3 Esquema de conexión de un analizador de neutro [30] y vista de un panel de operación de un analizador-controlador de neutro modelo EFC50 de Trench ([www.trenchgroup.com](http://www.trenchgroup.com)).

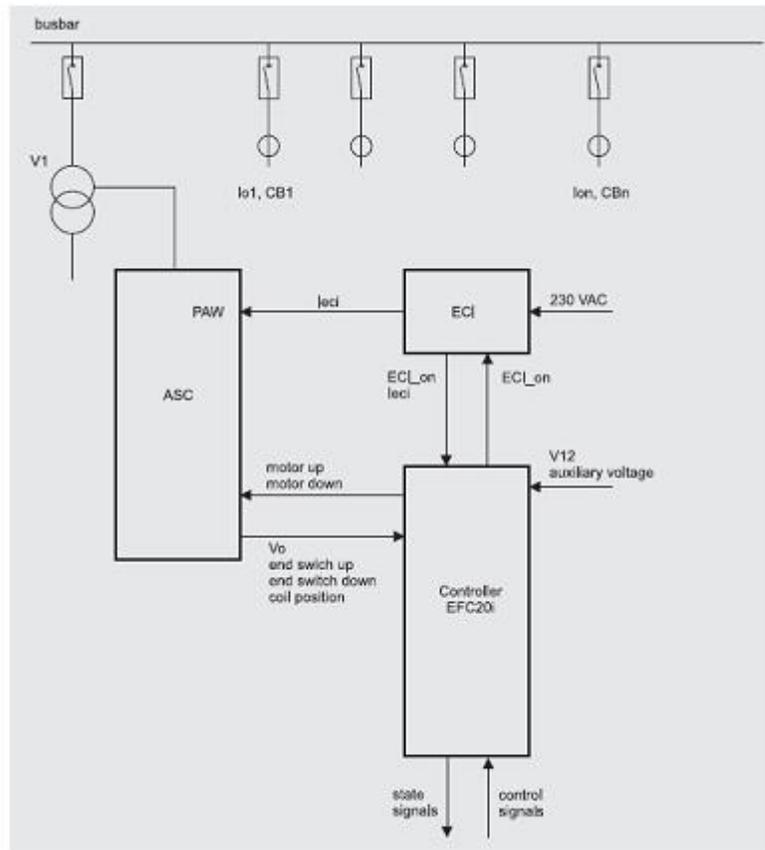


Figura 3.4 Esquema de conexión de un analizador/controlador de neutro (modelo EFC20i de Trench) para subestación con configuración en simple barra. (www.trenchgroup.com). ECI: Dispositivo inyector de corriente. ASC: sistema bobina Peterson (Arc Suppression).

Tabla 3.1 Costos de Bobinas Petersen.

<b>Precio FOB:</b>	\$ 1000-5000
<b>Puerto:</b>	Tianjin or shanghai
<b>Cantidad de pedido mínima:</b>	1 Set/s
<b>Capacidad de suministro:</b>	50 Set/s por Mes
<b>Plazo de entrega:</b>	45 días después de recibido 30% depósito

A este precio se le suma el flete desde China hasta Cuba, 1000 usd.



Figura 3.5 Bobinas de núcleo magnético variable de producción China.

### 3.2.3 Variante 3: Utilización de los reactores con núcleo de aire.

Una reactancia de puesta a tierra se conecta entre el neutro de un sistema trifásico y tierra. Su función es la de limitar la corriente entre fase y tierra de un sistema directamente puesto a tierra, o reducir la corriente entre fase y tierra de un sistema aislado hasta un valor adecuado para su protección.



Figura 3.6 Reactor con núcleo de aire para puesta a tierra.

Tabla 3.2 Precio de los reactores con núcleo de aire.

Precio FOB:	\$ 1000-5000
Puerto:	XINGANG port
Cantidad de pedido mínima:	1 Set/s
Capacidad de suministro:	600 Set/s por Mes 30 días

Al costo se le suma el flete China Cuba, 1000 USD.

- ❖ Los reactores de núcleo de aire como principal objetivo tienen que reducir costos para las instalaciones de cualquier voltaje, son capaces de reducir las corrientes de corto circuito, absorber potencia reactiva para la regulación de voltaje en líneas largas, filtrar armónicas etc. disminuyen las inversiones en los equipos de transmisión y distribución de energía eléctrica.
- ❖ Los reactores con núcleo de aire que se fabrican de mayor potencia tienen un menor costo por KVA o MVA debido a que presentan mayores eficiencias por su alto factor de calidad.
- ❖ Disminuyen los esfuerzos en varios equipos, lo que permite usar de menor capacidad o una vida más larga para los equipos actuales. Esto es particularmente importante en los transformadores de potencia e interruptores de potencia.
- ❖ Adicionalmente, son elementos pasivos prácticamente libres de mantenimiento y una historia comprobada libre de fallas.
- ❖ El uso de reactores limitadores de corriente con núcleo de aire es una herramienta poderosa pero hay que tener en cuenta que para lograr ajustar las protecciones adyacentes con esta, cambiaría todos los niveles de ajuste de los esquemas de protecciones.

### 3.3 Pérdidas de producción.

Por cada falla monofásica a tierra que se produzca en los ramales conectados a las bobinas supresoras de arco eléctrico (Peterson) que se encuentran ubicadas en el sistema de 10 kV y estas no actúen las protecciones actúan, se ocasionan pérdidas al proceso productivo, incidiendo directamente en la alimentación del suministro eléctrico a equipos principales de la planta, fundamentalmente en el paro de los secaderos. Lo que ocasiona un impacto negativo en el cumplimiento del plan de producción de la empresa.

La importancia de mantener una elevada seguridad de funcionamiento en estas bobinas se debe a que si analizamos la productividad de un secadero que es de 90t/h y el precio del níquel que está a 7.27 cuc la libra, un paro de una hora equivale a pérdida de 1,08 toneladas, equivalente a pérdida de **16037.50 CUC**.

### 3.4 Efecto económico:

Para que se tenga una idea de las pérdidas ocasionadas por concepto de averías en uno de los interruptores que alimenta un secadero podemos expresar que la productividad de una línea de secado promedia 90 toneladas de mineral por hora. Si tomamos en cuenta la producción perdida por las afectaciones ocasionadas por falla de un interruptor se puede apreciar que son muy elevadas.

Se muestra en la tabla 3.3 las pérdidas ocasionadas al proceso productivo por fallas monofásicas durante el año 2013.

Tabla 3.3 Pérdidas por concepto de producción.

Años	Cantidad de afectaciones	Toneladas de Ni+Co afectadas	Precio de la tonelada de Ni+Co (USD)	Valor económico (USD)

		(estimado)		
2013	5	9.38	16 037.50	206 261.50

**Nota:** A continuación se muestra el cálculo para comprensión de la tabla 1.

**Parada de un secadero:**

P/h de un secadero x Ley de Níquel :  $90 \times 0,0120 = 1.08 \text{Tn}$ .

Precio de 1T/Níquel: 16037.50 cuc

Perdida de Níquel por parada del secadero 1/hora =  $1.08 \text{ TN} \times 16037.50 \text{Tn} = 17320.50 \text{ cuc}$

Según cálculo realizado por la parada de un secadero 1/hora se deja de producir 1.08 tonelada de Níquel, por lo que teniendo en cuenta el precio actual de una tonelada es (16037.50 cuc) las pérdidas serían de 17320.50 cuc.

**Parada de un molino :**

P/h de un molino x Ley de Níquel :  $120 \times 0,0120 = 1.44 \text{Tn}$ .

Precio de 1T/Níquel: 16037.50 cuc

Pérdidas de Níquel por parada del molino 1/hora =  $1.44 \text{ Tn} \times 16037.50 \text{Tn} = 23 094 \text{ cuc}$

Según cálculo realizado por la parada de un molino 1/hora se deja de producir 1.44 tonelada de Níquel, por lo que teniendo en cuenta el precio actual de una tonelada es (16037.50 cuc) las pérdidas serían de 23 094 cuc.

A esto se le suma el costo de reparaciones y mantenimiento, al no estar bien sintonizadas las bobinas, con el consecuente disparo de los interruptores. Para definir los costos por mantenimiento actuales, se tomaron los resultados de los costos por mano de obra y materiales. Los datos fueron tomados a partir de las órdenes de trabajo existentes en el Dpto. Económico de la UB de Mantenimiento de la Empresa.

Tabla 3.4 Costo de mantenimiento de los interruptores.

Costo Interruptores subestación 1SD-10.5 kV /año					
Equipos		MO			
	Cantidad	Hombres	horas	Tarifa	Costo
Interruptores	51	2	8.6666	\$4.40	\$686.39

Costo por Materiales				
Materiales	U/M	Cantidad	Precio	Costo
Lubricante DWF	L	0.2	3.6	\$0.72
Alcohol técnico	L	1.0	0.56	\$0.56
Limpiador Tecniclean	L	0.13	4.27	\$0.56
Lija fina 150	cm2	20	0.38	\$7.60
Finasol	L	1.5	4.33	\$6.50
Material textil	kg	0.1	0.4735	\$0.05
Aceite Dieléctrico	L	12	1.16	\$13.92
Costo MT				\$29.90

Total para 9 Interruptores				\$1524.9
----------------------------	--	--	--	----------

### 3.5 Conclusiones del capítulo.

1. Desde el punto de vista económico la variante 1 es la más viable debido a que la empresa ya posee dichas bobinas, por lo que no habrá necesidad de realizar inversiones, solo las relacionadas al mantenimiento. La ventaja de utilizar una bobina de tipo fija reside en la sencillez y coste del dispositivo.
2. A diferencia de las bobinas de tipo fija con tomas variables, en las que no es posible instalar la resistencia mediante un devanado auxiliar dado que al modificarse la toma de la bobina se modificaría también la resistencia equivalente a tierra del sistema en relación cuadrática del número de espiras de la bobina y del devanado secundario, en estas sí.
3. La bobina Petersen con núcleo magnético variable tiene una sintonización del 100%, lo que la hace mucho más efectiva que las de tipo fija.
4. Las pérdidas debido a las interrupciones en el suministro eléctrico a equipos importantes en el proceso productivo de la se estiman en alrededor de 206 261.50 CUC en el año 2013.

### **3.6 CONCLUSIONES GENERALES.**

1. El análisis de los resultados de los capítulos anteriores permitió proponer una solución técnica que reside en el ajuste de las bobinas Petersen requerido para las condiciones actuales del sistema de 10 kV, que es de  $I_{cc1\phi}=56.7$  A y reactancia inductiva  $X_l=j 502, 58 \Omega$ .
2. Para lograr sintonizar correctamente las bobinas es necesario la conexión de las dos bobinas en el escalón 2, para ello es primordial que estén en funcionamiento los transformadores 22T o 23T.
3. Las bobinas con núcleo magnético variable brindan una mayor confiabilidad que las de tipo fija en la limitación de fallas monofásicas.
4. Se estimaron las pérdidas económicas del año 2013 debido al desajuste del sistema resonante, que fueron alrededor de 206 261.50 CUC.

## **RECOMENDACIONES:**

- ❖ Mantener actualizada la base de datos del cableado en función de los cambios que se ejecuten
  
- ❖ Llevar el control y registro de las fallas monofásicas, que ocurran en la red de suministro, para poder utilizar otros métodos para calcular el ajuste óptimo de las bobinas Peterson.
  
- ❖ Emplear para el sistema de protecciones mediante puesta a tierra de los transformadores 20T, 21T, 22T y 23T bobinas Peterson de núcleo magnético variable.

**Bibliografía:**

- [1] Arc Suppression Coils ([www.trenchgroup.com](http://www.trenchgroup.com)).
- [2] Corso sulla messa a terra del neutro tramite bobina di Petersen. Acea S.p.A. Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, Roma 08-09 Octubre de 2003.
- [3] Herrera C.E. Sistemas de puesta a tierra en redes de distribución de media tensión mediante neutro resonante. Tesis de Maestría. Universidad de Sevilla.2011.
- [4] Overvoltage Protection and Insulation Coordination. Fachgebiet Hochspannungs technik. Technische Universitat Darmstad.
- [5] Pérez V.C. Análisis de sobretensiones a frecuencia industrial en el sistema de transmisión de CADAFE. Trabajo de Diploma. Universidad Central de Venezuela.2008.
- [6] Protección de sistemas eléctricos de potencia. Ramón M. Mujal Rosas. Área Politécnica ETSEIT (2002). Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- [7] RD 3275/1982 sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación y Orden de 6 de julio de 1984 sobre Instrucciones técnicas complementarias del anterior (MIE-RAT).
- [8] Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems. Jeff Roberts, Dr. Hector J. Altuve, y Dr. Daqing Hou. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA. Trabajo de Diploma Anexos
- [9] System-Grounding Principles. Protective Relaying. Principles and Applications. Thomas J . Domin and J . Lewis Blackburn.
- [10] Temporary overvoltages due to ground faults in MV Networks. A. Cerretti, F.M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni, G. Valtorta.

- [11] The Theory and Operation of Petersen Coils. J.H. Sumner. M.Sc., Tech., Associate Member.
- [12] UNE EN 60071-1 Coordinación de aislamiento. Parte 1: Definición, principios y reglas.
- [13] Vásquez P.L. Características y aplicaciones de reactores con núcleo de aire. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2009.
- [14] W.Petersen. [http://www.electrosuisse.ch/g3.cms/s\\_page/84610/s\\_name/petersenw](http://www.electrosuisse.ch/g3.cms/s_page/84610/s_name/petersenw).
- [15] W.Petersen. [http://de.wikipedia.org/wiki/Waldemar\\_Petersen](http://de.wikipedia.org/wiki/Waldemar_Petersen). S.p.A. Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, Roma 08-09 Octubre de 2003.
- [16] colectivo de Autores, Cálculo de corriente de cortocircuito, Manual electrotécnico, edición, editorial moscú, volumen 1, pág. 161-307, Moscú, URRSS, 1983.
- [17] ZENNARO Electrical Constructions ([www.zennarotrafo.com](http://www.zennarotrafo.com))

**ANEXOS:**

Tabla 1: Datos de los conductores de 10kV.

<b>DDP</b>					
<b>Arm.</b>	<b>Consumidor</b>	<b>S(mm2)</b>	<b># de C/fase</b>	<b>Long(m)</b>	<b>Tipo cable</b>
<b>Primera sección</b>					
<b>2</b>	TP-7	3x70	1	1100	Aceite
	TP-20	3x70	1	450	
<b>4</b>	TP-6-1T	3x95	2	950	Seco
	TP-8-1T	3x95	1	200	
<b>6</b>	2RP-1-1T	3x185	2	600	Aceite
<b>7</b>	Trans. 41T	3x50	1	100	Seco
<b>16</b>	1RP-1	3x185	3	650	Aceite
<b>17</b>	Trans. 21T	3x120	1	30	Seco
<b>18</b>	Trans de tensión 1180	3x185	2	650	Aceite
<b>19</b>	Generador1	1x400	6	110	Aceite Unifilares
<b>Segunda sección</b>					
<b>24</b>	TP-14-1T	3x150	1	500	Aceite
	TP-12-1T	3x70	1	120	
<b>26</b>	5RP-1	3x185	3	1000	2Aceite 1Seco
<b>27</b>	Trans-1T	3x150	4	50	Barra
<b>28</b>	2RP-2-2T	3x185	2	600	Seco
<b>33</b>	Trans. 20T	3x120	1	30	Seco
<b>38</b>	1RP-2	3x185	3	650	Aceite
<b>40</b>	Trans de tensión 2400	3x185	2	650	Aceite
<b>43</b>	Trans 40T	3x50	1	100	Aceite
<b>45</b>	Trans. 80T	3x50	1	100	Seco

Tabla 1: Continuación.

<b>DDP</b>					
<b>Arm.</b>	<b>Consumidor</b>	<b>S(mm<sup>2</sup>)</b>	<b># de C/fase</b>	<b>Long(m)</b>	<b>Tipo cable</b>
<b>Tercera sección</b>					
<b>42</b>	2RP-3	3x185	2	500	Seco
<b>44</b>	TP-6-2T	3x95	2	950	Seco
	TP-8-2T	3x95	1	200	
<b>46</b>	5RP-2	3x185	3	1000	Aceite
<b>53</b>	Trans. 81 T	3x50	1	100	Seco
<b>55</b>	Trans 42T	3x95	1	100	Seco
<b>56</b>	1RP-3	3x185	5	650	1Aceite 4Seco
<b>57</b>	Trans 22T	3x120	1	30	Seco
<b>67</b>	Generador 2	1x400	6	130	Aceite Unifilares
<b>Cuarta sección</b>					
<b>64</b>	CIL	3x50	1	800	Aceite
<b>66</b>	2ST-12-2T	3x185	1	350	Seco
	1ST-14-2T				
<b>68</b>	2RP-3-4T	3x185	2	600	Aceite
<b>78</b>	Línea 1RP-4	3x185	5	550	Seco
<b>79</b>	Trans-2T	3x150	4	50	Barra
<b>81</b>	Trans. 23T	3x120	1	30	Seco
<b>91</b>	Trans. 82T	3x50	1	100	Seco

Tabla 1: Continuación.

<b>Subestación 1SD</b>					
<b>Arm.</b>	<b>Consumidor</b>	<b>S(mm2)</b>	<b># de C/fase</b>	<b>Long(m)</b>	<b>Tipo cable</b>
<b>Primera sección</b>					
1	Ventilador 22	3x95	1	450	Seco
2	1TP-15-1T	3x95	1	470	Aceite
3	1TP-16-1T	3x95	1	250	Seco
4	1TP-2-1T	3x95	2	250	Seco
	1TP-1-1T	3x95	1	670	Seco
5	1TP-7-1T	3x150	1	490	Seco
6	1TP-17-1T	3x95	1	920	Seco
7	1TP-28	3x70	1	550	Aceite
8	1TP-1T	3x70	1	80	Seco
9	Molino-1	3x70	1	430	Aceite
10	1TP-6-1T	3x95	1	850	Seco
12	Compresor-25	3x70	1	70	Seco
13	Compresor-31	3x95	1	90	Seco
14	Entrada.Term	3x185	5	650	Aceite
<b>Segunda sección</b>					
18	Int.Secc I-II				
21	Entrada.Term	3x185	5	650	Aceite
22	Línea 1TP-2 -2T	3x120	2	250	Seco
23	1TP-13-1T	3x120	1	800	Aceite
	1TP-5-1T	3x70	1	300	Seco
24	1TP-7-2T	3x95	1	450	Seco
25	Molino-2	3x70	1	420	Aceite
26	Compresor-21	3x95	1	70	Seco
27	1TP-11-1T	3x95	2	375	1Sec 1Ac
	1TP-10-1T	3x95	1	200	Seco
28	1TP-26	3x70	1	150	Aceite
29	Ventilador 23	3x95	1	460	Seco
30	Compresor-22	3x95	1	70	Aceite
31	1TP-17-2T	3x120	1	920	Seco

Tabla 1: Continuación.

<b>Subestación 1SD</b>					
<b>Arm.</b>	<b>Consumidor</b>	<b>S(mm2)</b>	<b># de C/fase</b>	<b>Long(m)</b>	<b>Tipo cable</b>
<b>Tercera sección</b>					
33	Línea A 1TP3-1T	3x95	1	750	Aceite
34	1TP-15-2T	3x95	1	530	Aceite
35	1TP13-2T	3x120	1	800	Aceite
36	1TP-2T	3x95	1	80	Seco
37	1TP30	3x70	1	370	Aceite
	1TP25	3x70	1	170	Aceite
39	Molino-3	3x95	1	400	Seco
40	Comp.-21(K 500)	3x185	3	300	Aceite
41	Comp.-21(K 500)	3x120	1	300	Seco
42	Compresor-32	3x95	1	90	Seco
43	Compresor-24	3x95	1	70	Seco
44	1TP-23	3x95	1	750	Aceite
	1TP-4	3x150	1	60	Seco
45	1TP-2-3T	3x120	1	250	Seco
46	1TP-8-1T	3x120	1	550	Seco
47	Entrada.Term	3x185	5	650	1-Seco 4-Aceite
<b>Cuarta sección</b>					
54	Entrada.Term	3x185	5	650	Seco
55	1TP31	3x70	1	350	Aceite
	1TP24	3x70			Seco
56	1TP-16-2T	3x95	1	250	Seco
57	Molino-4	3x95	1	400	Seco
58	Línea A 1TP8-2T	3x95	1	550	Seco
59	1TP-22	3x70	1	250	Seco
	1TP-4	3x150	1	80	Seco
60	1TP-11-2T	3x95	2	375	Aceite
	1TP-10-2T	3x95	1	200	
61	Comp.K500-3	2(3x95) 1(3x120)	3	300	Seco
62	Comp.K500-3	3x95	1	300	Seco
63	Compresor-33	3x70	1	90	Seco
64	Compresor-23	3x70	1	70	Seco
65	1TP-3-2T	3x95	1	780	Aceite
66	Línea 1TP-2-4T	3x120	1	270	Seco

Tabla 1: Continuación.

<b>Subestación 5SD</b>					
<b>Arm.</b>	<b>Consumidor</b>	<b>S(mm2)</b>	<b># de C/Fase</b>	<b>Long(m)</b>	<b>Tipo cable</b>
<b>Primera sección</b>					
1	5TP6 1T	3x95	1	110	Seco
2	5TP- 13-1T	3x70	1	60	Aceite
3	5TP-19	3x50	1	600	Seco
4	5TP-1-1T 5TP-2-1T	TP2= 3x120 1TP1=3x70	1	950 250	Aceite
5	5TP-4-1T 5TP-5-1T	3x120	1	300 80	Aceite
6	Entrada Term.	3x185	3	1000	2 Aceite 1 Seco
<b>Segunda sección</b>					
11	Entrada Term.	3x185	3	1000	Aceite
12	5TP-13-2T	3x70	1	60	Aceite
13	5TP- 21	3x95	1	450	Seco
14	5TP-1-2T	3x95	1	950	Seco
	5TP-2-2T	3x95	1	250	Seco
15	5TP-4-2T	3x120	1	100	Aceite
	5TP- 5-2T	3x185	1	200	Aceite
16	5TP-6 2T	3x95	1	100	Seco

Tabla 2. Sustitución de conductores 10 kV año 2012.

Armarios	Descripción	Tipo de cables	No. Conductores	Area	Cant. De metros	Total metros
43	40T	3x50	1	DDP	100	100
7	41T	3x50	1	DDP	100	100
55	42T	3x50	1	DDP	100	100
33	20 T	3x50	1	6SD	30	30
17	21 T	3x50	1	6SD	30	30
57	22 T	3x50	1	6SD	30	30
81	23 T	3x50	1	6SD	30	30
45	80 T	3x50	1	DDP	100	100
53	81 T	3x50	1	DDP	100	100
91	82 T	3x50	1	DDP	100	100
2	TP-7	3x70	1	DDP	1100	1100
19	TG-401	1x400	6	DDP	110	660
67	TG-402	1x400	6	DDP	130	780

**Tabla 3. Sustitución de conductores año 2013.**

Armarios	Descripción	Tipo de cables	No. Conductores	Area	Cant. De metros	Total metros
<b>1 y 2</b>	Entrada # 1 (1T) 10kV	3x185	2	2SD	600	1200
<b>26 y 27</b>	Entrada # 2 (3T) 10kV	3x185	2	2SD	650	1300
<b>53 y 54</b>	Entrada # 4 (4T) 10kV	3x185	2	2SD	700	1400
<b>47</b>	1SD-3	3x185	5	1SD	700	3500
	<b>Total 3x185</b>					<b>7400</b>
<b>11</b>	Entrada # 2	3x150	2	5SD	950	1900
<b>6</b>	Entrada # 1	3x150	2	5SD	900	1800
	<b>Total 3x150</b>					<b>3700</b>
<b>2</b>	5ST-13 (1T)	3x70	1	5SD	100	100
<b>12</b>	5ST-13 (2T)	3x70	1	5SD	100	100
<b>3</b>	5ST-19	3x70	1	5SD	300	300
	<b>Total 3x70</b>					<b>500</b>
Cantidad de copas			36			

Tabla 4. Propuesta de sustitución de conductores año 2014.

Armarios	Descripción	Tipo de cables	No. Conductores	Area	Cant. De metros	Total metros
<b>21</b>	1SD-2	3x185	5	1SD	650	3250
<b>14</b>	1SD-1	3x185	5	1SD	640	3200
<b>4</b>	5ST-2(1T)	3X120	1	5SD	<b>250</b>	250
<b>4</b>	5ST-1(1T)	3X120	1	5SD	700	700
<b>14</b>	5ST-1(2T)	3X120	1	5SD	300	300
<b>5</b>	5ST-4(1T)	3X120	1	5SD	500	500
<b>15</b>	5ST-4(2T)	3X120	1	5SD	500	500
<b>23</b>	1ST-13 y 5 (1T)	3X120	1	1SD	1200	1200
<b>5</b>	5ST-5(1T)	3X120	1	5SD	300	300
<b>14</b>	5ST-2(2T)	3X120	1	5SD	290	300
<b>15</b>	5ST-5(2T)	3X120	1	5SD	300	290
<b>1</b>	VENTILADOR #22	3X50	1	1SD	600	600
<b>29</b>	VENTILADOR #23	3X50	1	1SD	600	600
<b>7</b>	1ST-28	3X70	1	1SD	550	550

<b>28</b>	1ST-26	3X70	1	1SD	150	150
<b>25</b>	MOLINO#2	3X70	1	1SD	420	420

Tabla 5. Propuesta de sustitución de conductores año 2015.

Armarios	Descripción	Tipo de cables	No. Conductores	Area	Cant. De metros	Total metros
<b>41</b>	Compresor K-500 - 2	3x185	1	1SD	300	300
<b>44</b>	1SD-4	3x185	5	1SD	650	3250
	1ST-7 (1T)	3x150	1	1SD	600	600
	Entrada # 3 (2T) 10kV	3X120	2	2SD	600	1200
	1ST-7 (2T)	3x150	1	1SD	600	600
	1ST-6	3X120	1	1SD	1200	1200
	1ST-13(2T)	3X120	1	1SD	1200	1200
<b>60</b>	1ST-10 y 11(2T)	3X95	2	1SD	375	750
<b>33</b>	1ST-3(1T)	3X95	1	1SD	750	750
<b>65</b>	1ST-3(2T)	3X95	1	1SD	750	750
	1TP-15 1T	3x95	1		470	470

	1TP-15 2T	3x95	1		470	470
<b>37</b>	1ST-30	3X70	1	1SD	380	380
	1ST-25	3X70	1	1SD	170	170
<b>55</b>	1ST-24 Y 31	3X70	1	1SD	450	450

Tabla 6. Datos nominales de las máquinas sincrónicas instaladas en la empresa.

Mecanismo	Tipo	#	Pn	Un	In	nn	Efic	FP	Uexc.	lexc.
Turbogenerador #1	6HY562670-2	1	12000	10500	825	3600		0.8	42-158	152-463
Turbogenerador #2	6HY562670-2	1	12000	10500	825	3600		0.8	42-158	152-463
Turbogenerador #3	BDAX62-195ERH	1	25000	10500	1718	3600		0.8	128	806
Compresor K500-2	CTD-2500-3600T4	1	2500	10000	166	3600	91.2	0.9	11	230
Compresor K500-3	CTD-2500-3600T4	1	2500	10000	166	3600	91.2	0.9	11	230
Compresor CO-21	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Compresor CO-23	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Compresor CO-24	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Compresor CO-25	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Molinos de bolas	CDC3-15-49-10T2	4	800	10000	54.6	720	93.4	0.9	45	223
Bomba de agua BO-01	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-02	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-03	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-04	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-05	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-06	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-07	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-08	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-09	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Motor Principal Excavadora	CDCE-14-29-8T2	4	500	6000	56	400	93.8	0.8	30	250
Compresor 325-CO-201 (11)	CDKZ-16-29-14KT4	1	320	6000	37	514	93	0.9	32.6	262
Compresor 325-CO-202 (12)	CDKZ-16-29-14KT4	1	320	6000	37	514	93	0.9	27	232
Compresor 325-CO-203 (13)	CDKZ-16-29-14KT4	1	320	6000	37	514	93	0.9	27	232

## Anexo 2:

Programa para el cálculo del valor de ajuste de las bobinas supresoras de arco eléctrico (Peterson) existentes en la empresa comandante Ernesto Che Guevara mediante el cálculo de compensación de corriente de cortocircuito monofásica mediante puesta a tierra.

```
%Definición de las variables
```

```
Un=input('Inserte el valor del voltaje nominal de línea, V');
```

```
f=input('Inserte el valor de la frecuencia, Hz');
```

```
W=2*pi*f;
```

```
% Cálculo de Icc monofásica para los cables de diferentes secciones
```

```
disp('Para los cables de aluminio trenzado de sección 3x50')
```

```
Cp=input('Inserte el valor de la capacidad a tierra del cable de los  
datos del fabricante, µF/km')
```

```
L=input('Inserte la distancia de la línea, km')
```

```
Icc0=sqrt(3)*Un*W*0.56*Cp*L*10^(-6)
```

```
disp('Para los cables de aluminio trenzado de sección 3x70')
```

```
Cp=input('Inserte el valor de la capacidad a tierra del cable de los  
datos del fabricante, µF/km')
```

```
L=input('Inserte la distancia de la línea, km')
```

```
Icc1=sqrt(3)*Un*W*0.56*Cp*L*10^(-6)
```

```
disp('Para los cables de aluminio trenzado de sección 3x95')
```

```
Cp=input('Inserte el valor de la capacidad a tierra del cable de los  
datos del fabricante, µF/km')
```

```
L=input('Inserte la distancia de la línea, km')
```

```
Icc2=sqrt(3)*Un*W*0.56*Cp*L*10^(-6)
```

```
disp('Para los cables de aluminio trenzado de sección 3x120')
```

```
Cp=input('Inserte el valor de la capacidad a tierra del cable de los  
datos del fabricante, µF/km')
```

```
L=input('Inserte la distancia de la línea, km')
```

```
Icc3=sqrt(3)*Un*W*0.56*Cp*L*10^(-6)
```

```
disp('Para los cables de aluminio trenzado de sección 3x150')
```

```
Cp=input('Inserte el valor de la capacidad a tierra del cable de los  
datos del fabricante, µF/km')
```

```
L=input('Inserte la distancia de la línea, km')
```

```
Icc4=sqrt(3)*Un*W*0.56*Cp*L*10^(-6)
```

```
disp('Para los cables de aluminio trenzado de sección 3x185')
```

```
Cp=input('Inserte el valor de la capacidad a tierra del cable de los  
datos del fabricante, µF/km')
```

```
L=input('Inserte la distancia de la línea, km')
```

```
Icc5=sqrt(3)*Un*W*0.56*Cp*L*10^(-6)
```

```
disp('Para los cables de aluminio trenzado de sección 1x400')
```

```
Cp=input('Inserte el valor de la capacidad a tierra del cable de los
datos del fabricante, µF/km')
L=input('Inserte la distancia de la línea, km')
Icc6=sqrt(3)*Un*W*0.56*Cp*L*10^(-6)

disp('La corriente de cortocircuito total a tierra es ');
IccT=sum(Icc0+Icc1+Icc2+Icc3+Icc4+Icc5+Icc6)

% El cálculo aproximado de la corriente de cortocircuito puede
realizarse con ayuda de los valores medios de la corriente capacitiva
de cortocircuito monofásico, Manual electrotécnico pág 161
% Los valores de la corriente media capacitiva se tomaron de catálogos.
disp('Para el cable de aluminio trenzado de sección 3x50')
L=input('inserte la longitud de la línea, km')
Iccm0=0.77*L

disp('Para el cable de aluminio trenzado de sección 3x70')
L=input('inserte la longitud de la línea, km')
Iccm1=0.9*L

disp('Para el cable de aluminio trenzado de sección 3x95')
L=input('inserte la longitud de la línea, km')
Iccm2=1.0*L

disp('Para el cable de aluminio trenzado de sección 3x120')
L=input('inserte la longitud de la línea, km')
Iccm3=1.1*L

disp('Para el cable de aluminio trenzado de sección 3x150')
L=input('inserte la longitud de la línea, km')
Iccm4=1.3*L

disp('Para el cable de aluminio trenzado de sección 3x185')
L=input('inserte la longitud de la línea, km')
Iccm5=1.4*L

disp('Para el cable de aluminio trenzado de sección 1x400')
L=input('inserte la longitud de la línea, km')
Iccm=1.8*L

disp('La corriente de cortocircuito media total es')
IccmT=sum(Iccm0 +Iccm1+Iccm2+Iccm3+Iccm4+Iccm5+Iccm6);
```

**Anexo 3: Método vatimétrico para la detección de fallas a tierra.**

Utilizando la característica de tensión-intensidad anterior entre líneas sanas y en falta, el método de detección denominado vatimétrico establece la existencia de un defecto en la línea protegida si la componente activa de la corriente residual de línea se encuentra en fase con la tensión de referencia Vr (circulación hacia la falta). Así, siendo  $\theta_r$  el desfase entre la tensión residual de referencia  $V_r = -V_0$  y la intensidad residual  $I_r$  medida por el transformador de intensidad (toroidal) de cada salida MT, se puede definir  $P_0$  como parámetro a evaluar por el relé de protección para activar la señal de disparo (falta sobre la línea protegida) o de no disparo (falta aguas arriba del transformador de intensidad) como:

$$P_0 = V_r \cdot I_r \cdot \cos \theta_r \quad \begin{cases} P_0 > 0 \rightarrow \text{dispara} \\ P_0 < 0 \rightarrow \text{no dispara} \end{cases}$$

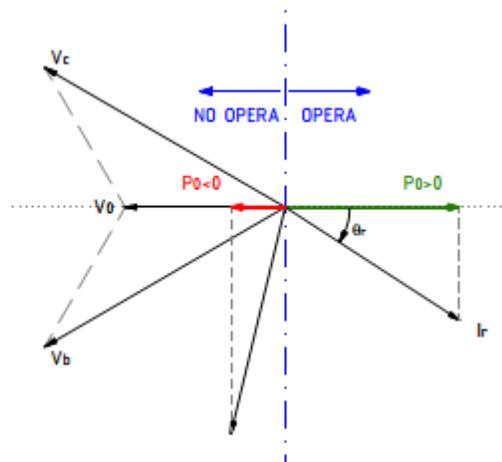


Figura 1. Criterio vatimétrico para la detección de fallas a tierra.

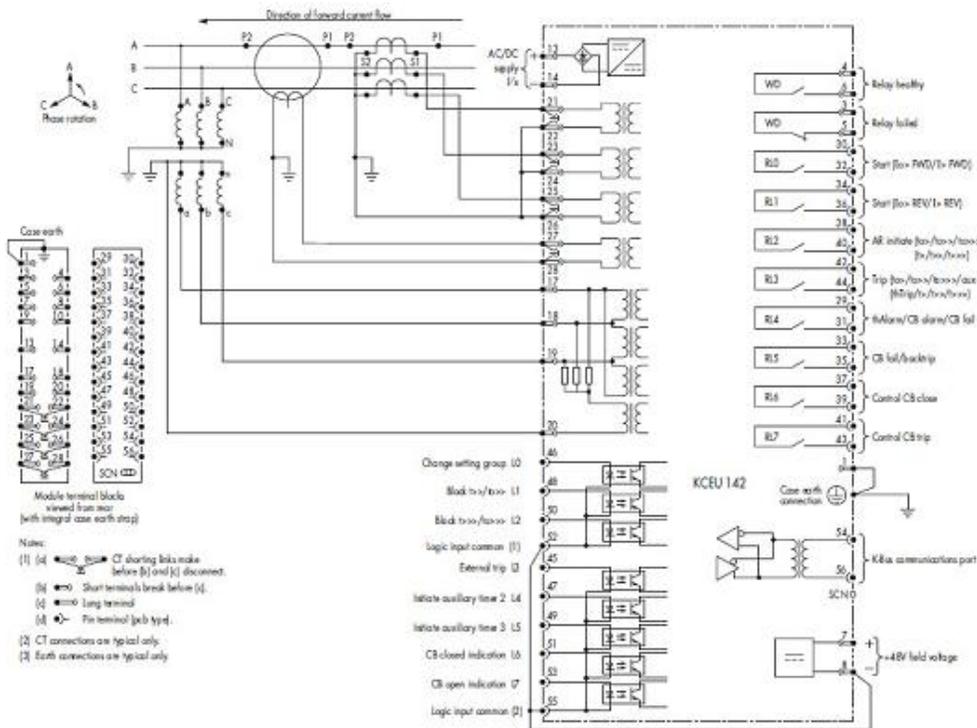


Figura 2: Diagrama típico de conexión de un relé direccional del tipo vatimétrico KCEU 142.

Este método necesita para tener un grado de sensibilidad adecuado que la componente activa de la corriente residual sea suficientemente grande (lo que se puede conseguir mediante la resistencia de neutro RN) así como magnitud de la tensión homopolar.

El método vatimétrico de detección de faltas a tierra, aun siendo el método direccional tradicionalmente utilizado en redes con neutro Petersen, se considera presenta limitaciones de sensibilidad ante faltas muy resistivas (del orden de  $k\Omega$  debido a la amplitud insuficiente de la tensión homopolar (desplazamiento de neutro) que, se reduce drásticamente a medida que

aumenta la impedancia de falta o la distancia del defecto a barras de subestación.

## Anexo 4:

## Principales afectaciones provocadas por fallas.

	Causas.	Fecha	Afectaciones productivas
1.	Cortocircuito del cable de fuerza que alimenta el compresor Betico 41 y taller mecánico de la planta de hornos debido a un empalme defectuoso, provocado por el movimiento de los cables por el personal de la construcción ya que realizaban cambio de bandejas en la estacada, esto provocó el disparo del interruptor de la entrada # 2 de la 1TP.	14/3/013 8:58 am 10:10 am	43 185.78 CUC
2.	Siendo las 13:10 p.m y estando la fábrica operando en régimen normal, con 4 Secaderos a 251 t/h; 16 Hornos a 267 t/h; Lixiviación bombeando 250 m <sup>3</sup> de licor producto; Recuperación destilando 250 m <sup>3</sup> de licor y 376 m <sup>3</sup> de cola, la CTE generando 12.23 MW y consumiendo del SEN 20.30 Mw. Se produce un disparo en la cuarta sección de barra, debido a la acción de la protección de arco al unirse las platinas, cuando se retiró la clavija del armario.	25/3/013 13:10 pm 13:13 pm	27 250.92 CUC

3	Se disparó porque se activó la entrada lógica del relé 745 de disparo por arco, debido a que la entrada esta activada, provocando la desconexión de esta.	24/05/2013 9:45 am	13 952.625 CUC
4	Cortocircuito provocado por el personal de la construcción que trabajaba desmontando cables en desuso y picaron uno de los 5 cables de la línea 1SD-3 que estaba energizado.	20/5/013 9:45 am	59 210.45 CUC
5	Cortocircuito en la entrada del interruptor de caja moldeada a la pizarra 3-III23 afectando las fibras y dejando inservible el interruptor, esto provoco el disparo del interruptor de entrada # 1 en la 1TP-3.	23/7/013	62 661.72 CUC