

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NUCLEO DE ANZOATEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**“Estudio de Cortocircuito, Flujo de Carga y
Compensación de Reactivos del Circuito Eléctrico de
Producción de Pie de Cerro en CVG BAUXILUM Los
Pijiguaos, Municipio Cedeño-Estado Bolívar”**

REALIZADO POR:

JULIO CESAR VELASQUEZ DUCAYIN

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA
UNIVERSIDAD DE ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

INGENIERO ELECTRICISTA

Barcelona, Marzo 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NUCLEO DE ANZOATEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**“Estudio de Cortocircuito, Flujo de Carga y
Compensación de Reactivos del Circuito Eléctrico de
Producción de Pie de Cerro en CVG BAUXILUM Los
Pijiguaos, Municipio Cedeño-Estado Bolívar”**

Br. Julio Cesar Velásquez Ducayin
C.I: 16.068.688

Revisado y Aprobado por:

Ing. Luis Suarez
Asesor Académico

Ing. Edwin Pérez
Asesor Industrial

Barcelona, Marzo 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NUCLEO DE ANZOATEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**“Estudio de Cortocircuito, Flujo de Carga y
Compensación de Reactivos del Circuito Eléctrico de
Producción de Pie de Cerro en CVG BAUXILUM Los
Pijiguaos, Municipio Cedeño-Estado Bolívar”**

JURADO:

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

Prof. Luis Suarez
Asesor Académico

Prof. Santiago Escalante
Jurado Principal

Prof. Pedro Rodríguez
Jurado Principal

Barcelona, Marzo 2009



RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participara al consejo universitario”.



DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado primeramente a Dios que hace tanto por mí, que día a día lleva mi historia y sé que este logro vine de Él porque me ama.

A mis padres Fausto Velásquez y Nancy Ducayin, por ayudarme en todo momento, por apoyarme y darme fuerzas para seguir adelante.

A mi abuela Ricarda, por sus enseñanzas, por apoyo incondicional y estar siempre conmigo guiándome.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios que lleva mi vida, sabiendo que todos los acontecimientos me viene de Él, porque sin su ayuda este logro no hubiese sido posible.

A mis padres, Fausto Velásquez y Nancy Ducayin, por soportarme, apoyarme día a día, motivándome a seguir adelante y enseñándome a levantarme en las caídas.

A mis familiares, A mi abuela Ricarda, a tía Carmencita, a mis tíos Rafael y José Luis, por estar siempre pendientes de mis logros.

A mi hermano Juan Carlos, porque sé que en la distancia estabas pendiente de mi y tus oraciones me ayudaron mucho, a mi hermana Johana por soportarme todo este tiempo.

Al departamento de electricidad en especial a los profesores Santiago Escalante, Pedro López, Luis Suarez, Hernán Parra, Melquiades Bermúdez y Pedro Rodriguez por sus conocimientos impartidos.

A mis mejores amigos, Jota, Juancho, Luis Miguel, Juan José, Daniel, Chuo Franco, Reivis, Eduardo, el Dos y la Niña, son parte fundamental de este logro, gracias por estar siempre ahí cuando los necesite.

A Neyfi, de verdad gracias por haberme soportado, por ser mi apoyo, gracias por haber estado siempre conmigo en las buenas y en las malas,

Agradecimientos



gran parte de mis mejores recuerdos en la universidad te lo debo a ti, gracias por haberte cruzado en mi vida.

A mis amigos con los cuales compartí muchos momentos buenos durante la carrera, Antonio, Vicente, Anderson, Juan Carlos, Vanesa, José Daniel, Stanling, El Blanco, José Lira, Edinson, Rosy, Ángela, José Ortiz, Villo, Chuo Lara, El Chino (Héctor), Martha, Saúl, Choncho, Regueton, Margarito, Nelsis, Sombay, Pedro Bello, Sergio Oropeza, Analy, Valeria, Marinel, Chataing, Mariangel y a la mejor secretaria de la UDO (Carmencita).

A CVG Bauxilum-Mina, por regalarme la oportunidad de realizar las pasantías en sus instalaciones, le agradezco de manera especial al Ing. Edwin Pérez por sus enseñanzas, por su amistad y por la confianza que me brindo.

A la unidad de Alta Tensión, en especial a Pedro Sanz, Manuel Delepiani, Rumbo, Chinchorro, Jhonny Sánchez, Víctor Delepiani, Chorrito y Jesús Gutiérrez, gracias por sus conocimientos impartidos, por la confianza y la amistad.

A mis buenos amigos de TASCATORCE, Roberto, Pedro, Jesús, Jean Carlos, Manuel, Jeison, Chikys, Carlitos, Raul y a Luis padre, por su valiosa amistad y por los buenos momentos vividos durante las pasantías.

A mis Amigas del Once, Adriana, Yanire, Natalith, lisbeth madre, marthita y nohemi, son los máximo, nunca las olvidare.

GRACIAS A TODOS... FORMAN PARTE DE ESTE LOGRO!!!



INDICE GENERAL

	Paginas
RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	iv
INDICE GENERAL.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	xii
INDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
CAPITULO I.....	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 ALCANCE.....	16
1.3 DELIMITACIÓN.....	17
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	17
1.5 OBJETIVOS.....	18
1.5.1 General.....	18
1.5.2 Específicos.....	18
1.6 METODOLOGÍA EMPLEADA.....	19
1.7 RESUMEN DE LOS CAPÍTULOS.....	20
CAPITULO II.....	22
GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....	22
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	22
2.2 RESEÑA HISTÓRICA.....	23
2.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	26
2.4 MISIÓN DE CVG BAUXILUM.....	27



2.5 VISIÓN DE CVG BAUXILUM.	27
2.6 PRINCIPIOS Y VALORES DE LA EMPRESA.	27
2.7 POLÍTICA DE CALIDAD, AMBIENTE Y SEGURIDAD.	28
2.8 ORGANIGRAMA ACTUAL DE CVG BAUXILUM.	28
2.9 PROCESO PRODUCTIVO.....	30
2.9.1 <i>La Mina.</i>	30
2.9.2 <i>Pie de Cerro.</i>	32
2.9.3 <i>El Jobal.</i>	33
2.10 CERTIFICACIONES OBTENIDAS.	36
2.11 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA EMPRESA.	36
2.11.1 <i>Sistema de Transmisión Sur.</i>	36
2.11.2 <i>Circuitos Principales.</i>	37
2.11.3 <i>Campamento, área Residencial.</i>	37
2.11.4 <i>La Mina, área Industrial.</i>	37
2.11.5 <i>Pie de Cerro, área Industrial.</i>	38
2.11.6 <i>El Jobal, área Industrial.</i>	38
CAPITULO III.....	39
MARCO TEÓRICO	39
3.1. ANTECEDENTES.....	39
3.2. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN INDUSTRIALES.	40
3.2.1. <i>Red de distribución Radial.</i>	40
3.3. CORTOCIRCUITO.	41
3.3.1. <i>Características de la corriente de cortocircuito.</i>	42
3.3.2. <i>Cálculo de las corrientes de cortocircuito.</i>	46
3.3.3. <i>Sistema Por Unidad.</i>	47
3.3.4. <i>Tipos de fallas por cortocircuitos en sistemas de potencia.</i>	49
3.3.5. <i>Métodos para el cálculo de corrientes de cortocircuito.</i>	52
3.3.6. <i>Cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas de baja tensión.</i>	60
3.3.7. <i>Potencia de Cortocircuito.</i>	63
3.4. FLUJO DE CARGA.	66
3.4.1. <i>Inyección de Corriente.</i>	68
3.4.2. <i>Métodos para la obtención del Flujo de Carga.</i>	69



3.4.3. Método de Newton-Raphson.....	71
3.5. COMPENSACIÓN DE REACTIVOS.....	72
3.5.1. Tipos de Compensación de Reactivos.....	76
3.5.2. Métodos para el cálculo de la energía reactiva necesaria para realizar la compensación.....	80
3.5.3. Compensación Fija y Automática.....	83
CAPITULO IV	85
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO	85
4.1. ANTECEDENTES.....	85
4.2. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA LOS PIJIGUAOS.....	85
4.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL ÁREA DE PRODUCCIÓN PIE DE CERRO.....	89
4.3.1. Subestación 05UB01.....	91
4.3.2. Subestación 05UB02.....	94
CAPITULO V.....	97
MARCO METODOLOGICO.....	97
5.1 METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN EN FORMATO DIGITAL DEL PLANO ELÉCTRICO Y CIVIL DEL ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PIE DE CERRO EN C.V.G. BAUXILUM-MINA.....	97
5.2 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LOS ESTUDIOS ELÉCTRICOS.....	98
5.3. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE NIVELES DE CORTOCIRCUITOS.....	99
5.3.1. Metodología del Cálculo de los Niveles de Cortocircuito.....	100
5.4 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA.....	118
5.5. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA.....	120
5.5.1. Consideraciones tomadas en cuenta para el estudio de Compensación de Energía Reactiva.....	121
5.5.2. Metodología del cálculo del estudio de Compensación de Reactivos.....	122
CAPITULO VI	126
RESULTADO DE LOS ESTUDIOS	126
6.1. RESULTADO DEL ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO.....	126
6.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA.....	135



6.3. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS 140

CAPITULO VII..... 144

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 144

7.1 CONCLUSIONES. 144

7.2 RECOMENDACIONES..... 145

BIBLIOGRAFIA..... 147

ANEXOS ¡Error! Marcador no definido.

ANEXO A: CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA CERO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS, JUNTOS CON LOS ESQUEMAS DE CONEXIONES Y LOS SÍMBOLOS PARA LOS DIAGRAMAS UNIFILARES. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO B: IEEE STD. 399-1990 **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO C: NIVELES DE CORTOCIRCUITO DE LA SUBESTACIÓN LOS PIJUAOS;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO D: IMAGEN SATELITAL DL ÁREA DE PRODUCCIÓN PIE DE CERRO, CVG BAUXILUM-MINA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO E: IMAGEN EN FORMATO TIF DEL ÁREA DE PIE DE CERRO **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO F: PLANO ELÉCTRICO Y CIVIL DE PIE DE CERRO DIGITALIZADO USANDO AUTOCAD 2007 **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO G: DIAGRAMA UNIFILAR DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DE PIE DE CERRO;**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO H: MANUAL DEL PROGRAMA ETAP DE LA VERSIÓN 5.03.. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO I: PERFILES DE TENSIÓN DE LA S/E LOS PIJUAOS A NIVEL DE 115 KV. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:..... 166





INDICE DE FIGURAS

	Paginas
Figura 2.1 localizacion del yacimiento en los pijiguaos	26
FIGURA 2.2 ORGANIZACIÓN ACTUAL DE CVG BAUXILUM	29
FIGURA 2.3 DIAGRAMA DEL PROCEDO PRODUCTIVO	30
FIGURA 2.4 PROCESO PRODUCTIVO DE LA MINA	31
FIGURA 2.5 VISTA DE LA CORREA DE BAJADA	32
FIGURA 2.6 PROCESO PRODUCTIVO DE PIE DE CERRO	33
FIGURA 2.7 VISTA DE LA LOCOMOTORA TRANSPORTANDO EL MINERAL.....	33
FIGURA.2.8 PROCESO PRODUCTIVO EL EL JOBAL	34
FIGURA.2.9 VISTA DEL MUELLE EL JOBAL	35
FIGURA 3.1 EFECTO DE LA ASIMETRIA EN LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO.	36
FIGURA 3.2 CORRIENES DE CORTOCIRCUITO SIMETRICAS DE ALGUNAS FUENTES.	36
FIGURA 3.3 CORTOCIRCUITO TRIFASICO.....	41
FIGURA 3.4 CORTOCIRCUITO TRIFASICO A TIERRA	42
FIGURA 3.5 CORTOCIRCUITO BIFASICO.....	42
FIGURA 3.6 CORTOCIRCUITO BIFASICO A TIERRA	43
FIGURA 3.7 CORTOCIRCUITO MONOFASICO	43
FIGURA 3.8 TRIANGULO DE POTENCIAS ELECTRICAS	70
FIGURA 3.9 REPRESENTACION GRAFICA DE LA COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA	71
FIGURA. 3.10 COMPENSACION GLOBAL.	72
FIGURA.3.11 COMPENSACION PARCIAL O EN GRUPO.....	73
FIGURA 3.1 2 COMPENSACION INDIVIDUAL.	74
FIGURA 5.1 DIAGRAMA DE POTENCIA DEL CIRCUITO ELECTRICO DE PIE DE CERRO.....	122
FIGURA 6.1 RESULTADOS DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO TRIFASICO EN LA S/E 05UB01	130
FIGURA 6.2 RESULTADOS DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO MONOFASICO EN LA S/E 05UB01	131
FIGURA 6.3 RESULTADOS DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO TRIFASICO EN LA S/E 05UB02.....	132
FIGURA 6.4 RESULTADOS DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO MONOFASICO EN LA S/E 05UB02.....	133
FIGURA 6.5 RESULTADOS DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO TRIFASICO EN EL RC 5.12.....	134
FIGURA 6.6 RESULTADOS DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO MONOFASICO EN EL RC 5.12	135



INDICE DE TABLAS

	Paginas
TABLA 3.1 VALORES MINIMOS APROXIMADOS DE LA CORRIENTE PARA FALLAS CON ARCO EN POR UNIDAD DE LOS VLORES DE FALLA CON CONTACTO DIRECTO ENTRE CONDUCTORES	47
TABLA 3.2 FACTOR DE MULTIPLICACION EN FUNCION DEL COSØ ANTES Y DESPUES DE LA COMPENSACION	67
TABLA 4.1 PLACA DEL TRANSFORMADOR DE LA S/E LOS PIJIGUAOS	70
TABLA 4.2 INTERRUPTOR DE POTENCIA DE ENTENTRADA A LA BARRA DE 13.8 KV DELA S/E LOS PIJIGUAOS	72
TABLA 4.3 INTERRUPTOR DE POTENCIA DE CADA UNO DE LOS CIRCUITOS DE SALIDA DE LA S/E LOS PIJIGUAOS	73
TABLA 4.4 PARAMETROS ELECTRICOS DEL CONDUCTOR	74
TABLA 4.5 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION DE PIE DE CERRO.....	75
TABLA 4.6 DISTRIBUCION DE CARGA DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE LA S/E 05UB01.....	76
TABLA 4.7 CARGA ASOCIADA A LOS TRANSFORMADORES DE LOS APILADORES ST 5.03 Y 5.05	78
TABLA 4.8 DISTRIBUCION DE CARGA DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE LA S/E 05UB02.....	79
TABLA 4.9 CARGA ASOCIADA AL TRANSFORMADOR DEL RC 5.12.....	80
TABLA 5.1 NIVELES DE TENSION EN LA BARRA DE 115 KV DE LA S/E LOS PIJIGUAOS, PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA	102
TABLA 5.2 CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA ELECTRICO DE PIE DE CERRO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA.....	103
TABLA 6.1 RESULTADOS DE LOS CALCULOD TEORICOS DE CORTOCIRCUITO	109
TABLA 6.2 RESULTADO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO DADAS POR EL ETAP 5.03	110
TABLA 6.3 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA CASO #1	118
TABLA 6.4 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA CASO #2.....	120
TABLA 6.5 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA CASO #3.....	121
TABLA 6.6 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA CASO #4.....	121
TABLA 6.7 FACTURACION DE LA ENERGIA CONSUMIDA POR PIE DE CERRO EN EL AÑO 2008.....	122
TABLA 6.8 RESULTADO DEL CALCULO DE LA ENERGIA REACTIVA PARA EL PERIODO DE PRODUCCION .	123
TABLA 6.9 RESULTADO DEL CALCULO DE LA ENERGIA REACTIVA PARA EL PERIODO DE MANTENIMIENTO	123
TABLA 6.10 RESULTADO DE LA ENERGIA REACTIVA ARROJADOS POR EL ETAP 5.03.....	124

RESUMEN

El presente trabajo describe los estudios de Cortocircuito, Flujo de Carga y Compensación de Reactivos para el sistema eléctrico de Pie de Cerro perteneciente a C.V.G Bauxilum-Mina ubicada en Los Pijiguaos estado Bolívar. La metodología utilizada fue la propuesta por las prácticas recomendadas de la IEEE Std. 242 “Protección y coordinación de sistemas eléctricos industriales y comerciales”, junto a esta metodología se utilizó para los cálculos de cortocircuito el método de los MVA calculando las potencias de cortocircuito.

Se realizó el levantamiento del sistema eléctrico para así conocer detalladamente la carga instalada del circuito en estudio y familiarizarse con los criterios utilizados por C.V.G Bauxilum-Mina para la realización de proyectos dibujando y actualizando el sistema eléctrico utilizando la herramienta computacional Autocad 2007.

Posteriormente, se realizó el estudio de Cortocircuito en las distintas condiciones de operación, permitiendo conocer los niveles de las corrientes de cortocircuitos en cada una de las barras del sistema, para que la empresa aplique metodologías en un futuro a corto o mediano plazo para mejorar las condiciones del sistema.

A continuación, se realizó el estudio de flujo de carga completo tomando en cuenta las distintas condiciones de operación que puede tomar el sistema bajo estudio, permitiendo conocer la distribución de la carga del circuito eléctrico de Pie de Cerro, así como las corrientes de operación de los equipos de potencia.

Por último, se llevó a cabo el estudio de Compensación de Reactivos permitiendo determinar la carga reactiva necesaria para mejorar las condiciones de operación del sistema y corregir el factor de potencia.



CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema.

La operadora de bauxita C.V.G. Bauxilum, cuenta con cuatro (04) áreas los cuales son: Campamento, que es el área residencial y Mina, Pie de Cerro y El Jobal que conforman las áreas del proceso productivo de la empresa, realizándose en ellas la extracción, almacenamiento, carga y transporte del mineral. Debido a la importancia de estas áreas donde se realiza el proceso de producción, el estudio se centrara en una (01) zona importante dentro de la producción como lo es el área Pie de Cerro, el cual abarcan en porcentaje gran parte del proceso de producción.

Pie de cerro es el área que recibe el mineral procedente de la mina que llega a través de un sistema de transporte denominado correa de bajada con una longitud de 4.2 kM y una pendiente máxima de aproximadamente 18° (grados), para posteriormente apilar la bauxita en cuatro (04) patios de homogenización por medio de dos (02) apiladores, cada patio tiene una capacidad de almacenamiento de 250.000 toneladas. El material almacenado en los patios es manejado por intermedio de dos (02) recuperadores de tipo puente con dos ruedas de cangilones que permiten tomar el material de las pilas y transportarlo por correas hasta el sistema de carga de vagones. El mineral es transferido por ferrocarril desde el patio de homogenización hasta el puerto El Jobal.

Estos procesos de apilación, recuperación, transporte del mineral por correas y Cargado de vagones, son movidos y accionados por un conjunto de maquinas eléctricas entre las cuales podemos mencionar: transformadores y motores de inductivos como motores de corriente continua. Estos elementos son provistos de energía eléctrica por medio de



Planteamiento del Problema

redes de electrificación que están conectadas a la subestación eléctrica (S/E) Los Pijiguaos, como es el caso del circuito eléctrico de Pie de Cerro con una estructura radial, la cual es una doble terna que cuenta con una longitud aproximada de 2.9 KM, y dos (02) subestaciones eléctricas para la distribución de 0.48 kV. Este circuito eléctrico actualmente opera a un factor de potencia (f.p) igual a 0.75 siendo este un valor bajo, impidiendo tener una eficiente utilización de la energía eléctrica, ya que la potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos pero es necesaria para el funcionamiento de elementos tales como motores, transformadores, lámparas fluorescentes y otros, volviéndose apreciable en esta área de producción la disminución del factor de potencia, trayendo como consecuencia pérdidas en los conductores y fuertes caídas de tensión, aumento de la intensidad de la corriente incrementando así la temperatura en los conductores y disminuyendo su vida de aislamiento, acarreado para la empresa pérdidas por el aumento considerable de las facturas por consumo de electricidad. Aunado a esto la subestación eléctrica Los Pijiguaos que es donde se alimenta el Circuito eléctrico en estudio presenta variaciones de voltaje a nivel de 115 kV que presenta dicha subestación, las cuales oscilan entre 102 kV y 127 kV superando los rangos recomendados de operación entre 109 y 121 kV equivalente $\pm 5\%$ con respecto a la tensión nominal.

1.2 Alcance.

Este trabajo de grado abarcará como investigación todas las subestaciones eléctricas, máquinas y equipos que se encuentran en el circuito eléctrico de potencia del área de Pie de Cerro, teniendo como objetivo la mejora del sistema eléctrico en pro de garantizar la continuidad de los procesos de producción en esta área de estudio. Para mejorar el circuito eléctrico de Pie de Cerro se realizarán los estudios de cortocircuitos, flujo de



Planteamiento del Problema

carga y compensación de reactivos, y así aplicar con los resultados obtenidos metodologías en el uso eficiente de la energía comprada por la empresa, la respuesta del circuito eléctrico del área en estudio y los niveles de las corrientes de cortocircuito y de operación de los elementos que conforman el sistema eléctrico de Pie de Cerro.

1.3 Delimitación.

Los estudios propuestos se realizarán basados en la metodología propuesta por el estándar 242 del IEEE “Prácticas Recomendadas para la Protección y Coordinación de Sistemas de Potencia Industriales y Comerciales”, apoyados en la herramienta computacional ETAP 5.03 y en mediciones de voltaje efectuadas en las barras de las subestaciones que posee el área de producción de Pie de Cerro. Aunado a esto se realizarán cálculos que dichos estudios requieran para una mejor comprensión y análisis de resultados basado en la metodología planteada para el cálculo teórico.

1.4 Justificación e Importancia.

Debido a la complejidad del circuito eléctrico de Pie de Cerro, se pretende hacer un estudio de Cortocircuito, para que la empresa utilice estos resultados para aplicar metodologías en mejora de los procesos de producción y a la vez sea más sencillo hallar la solución a una falla en un tiempo más corto y minimizando costo para la empresa, dado que los procesos de producción son críticos y en cascada, es decir, que cada uno de los procesos no tiene reemplazo y el no ejecutarse un proceso, implica la no continuidad de los demás, deteniendo la producción que se traduce en pérdidas para la empresa. Además del estudio de cortocircuito se realizará un estudio de Flujo de Carga tomando en cuenta las variaciones de voltaje a



Planteamiento del Problema

nivel de 115 kV que presenta dicha subestación, las cuales oscilan entre 102 kV y 127 kV superando los rangos de operación recomendados por las norma utilizadas para el diseño en EDELCA, obteniendo con este estudio la respuesta del circuito eléctrico de Pie de Cerro, ayudando a planear instalaciones futuras de nuevas cargas manteniendo los niveles de voltajes dentro de las tolerancias permitidas y sin exceder la capacidad de potencia en las líneas. También se realizara un estudio de Compensación de Reactivos, para fortalecer el estudio de flujo de potencia, ya que este estudio permitirá corregir el bajo factor de potencia trayendo consigo un uso eficiente de la energía eléctrica comprada reduciendo la demanda al mínimo, librando al circuito en estudio de efecto (cargas extra) de la corriente adicional innecesaria que circula por los transformadores y otros equipos importante del mismo.

1.5 Objetivos.

1.5.1 General.

Estudiar los niveles de Cortocircuito, Flujo de Carga y Compensación de Reactivos en el Circuito Eléctrico de Pie de Cerro en CVG BAUXILUM.

1.5.2 Específicos.

1. Realizar el levantamiento físico con coordenadas y distancias reales del circuito eléctrico de distribución de Pie de Cerro.
2. Determinar mediante la herramienta computacional ETAP 5.03, los niveles de cortocircuito, flujo de carga y compensación de reactivos del circuito eléctrico Pie de Cerro.
3. Calcular teóricamente la compensación de reactivos y los valores de las corrientes de cortocircuito en las barras de 13.8 y 0.48 kV en el área de Pie de Cerro.



Planteamiento del Problema

4. Comparar los valores obtenidos en los cálculos de compensación de reactivos y niveles de cortocircuito con los arrojados por la herramienta computacional ETAP 5.03.
5. Proponer conclusiones y posibles recomendaciones en base al análisis de la información obtenida en los estudios.

1.6 Metodología Empleada.

La metodología utilizada fue propuesta por el estándar 242 del IEEE “Prácticas Recomendadas para la Protección y Coordinación de Sistemas de Potencia Industriales y Comerciales” y así realizar los estudios de cortocircuito y flujo de carga. En estándar 242 del IEEE se encuentran contemplando los siguientes pasos:

- Se desarrolló el diagrama unifilar completo del sistema eléctrico de la empresa, donde se especificaron todos los equipos de potencia y cargas.
- Se determinaron las condiciones de operación normal que puede adquirir el sistema eléctrico, resultando casos distintos. En cada caso se obtuvieron los niveles de cortocircuito y las corrientes de carga.
- Se determinó el flujo de carga para las condiciones de operación. Los valores arrojados se utilizaron para determinar y recomendar ajustes mínimos de operación de algunos equipos.
- Se determinaron las corrientes máximas y mínimas de cortocircuitos a 1/2 ciclo, tanto para falla trifásica como para falla monofásica con el simulador Etap 5.03 y para los cálculos teóricos se obtuvieron empleando el método de los MVA obteniendo la potencia de cortocircuito.



Planteamiento del Problema

El estudio de compensación de reactivos se realizó apoyados en la herramienta computacional Power Station Etap 5.03 y así obtener las cargas necesaria para mejorar la operación del sistema y el lugar donde se recomienda ubicar los bancos de capacitores; todo esto respaldados con cálculos realizado para la comparación.

1.7 Resumen de los Capítulos.

El cuerpo de trabajo está estructurado en Siete capítulos donde se especifican en forma detallada toda la información pertinente para lograr el objetivo planteado. El objetivo de cada capítulo se puede resumir de la siguiente manera:

Capítulo I. Información introductoria de los estudios de cortocircuito, flujo de carga y compensación de reactivos. Se plantea el problema existente, alcance y delimitación de la investigación, la justificación e importancia de resolver el problema, los objetivos generales y específicos y la metodología llevada a cabo para hacer el estudio.

Capítulo II. Resumen histórico y organizacional de la donde se llevó a cabo este trabajo.

Capítulo III. Marco Teórico: se describen conceptos claves y conocimientos previos relacionados con los estudios realizados para una mejor comprensión.

Capítulo IV. Descripción detallada del sistema bajo estudio: se especifican todos los equipos de potencia instalados en el sistema y su respectiva identificación en el diagrama unifilar. Así mismo, se especifica toda la información técnica de los dispositivos que se consideran relevantes para los estudios que se van a realizar.



Planteamiento del Problema

Capítulo V. Descripción de la metodología y criterios empleados para los estudios: se especifican para los niveles de cortocircuito, análisis de flujo de carga y compensación de reactivos.

Capítulo VI. Resultados de los estudios: en el estudio de cortocircuito se especifican los niveles de cortocircuito trifásico y monofásico que existen en las principales barras del sistema en estudio.

Del mismo modo, en el estudio de flujo de carga se ilustran los resultados mediante el diagrama unifilar destacando los más importantes y se determinara cual es la condición de operación más crítica.

También en el estudio de compensación de reactivos se establecerá los valores arrojados mediante el diagrama unifilar y cálculos realizados mencionando el sitio específico donde deben estar colocados los bancos de capacitores.

Capítulo VII. Conclusiones y Recomendaciones: se plantean las conclusiones de los estudios y se proponen recomendaciones para mejorar las condiciones del sistema eléctrico de Pie de Cerro.



CAPITULO II GENERALIDADES DE LA EMPRESA

2.1 Antecedentes Históricos.

C.V.G BAUXILUM-MINA C.A. es El geólogo Armando Schwarck Anglade, en el año 1970, identifico en la serranía de Los Pijiguaos una coraza laterítica entre los ríos Suapure y Parguaza y lo posible existencia de horizontes de bauxita.

En el año de 1976, la Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G), procedió a efectuar la evaluación del yacimiento y en 1978, se determina que las reservas probadas alcanzan no menos de 170 millones de toneladas métricas de bauxita y las probables más de 500 millones de toneladas métricas con 50% Al_2O_3 y 40% de sílice total.

C.V.G BAUXIVEN, se creó en 1979 con la misión de explotar el yacimiento de Los Pijiguaos, siendo sus principales accionistas la Corporación Venezolana de Guayana y C.V.G Ferrominera del Orinoco; iniciando sus operaciones oficialmente en 1983, enviando las primeras gabarras con mineral de bauxita, a través del río Orinoco, desde el puerto de Gumilla de El Jobal hasta el muelle en Matanzas.

C.V.G INTERALUMINA, se creó a finales de 1977 con la participación mayoritaria de la Corporación Venezolana de Guayana y el Fondo de Inversiones de Venezuela, asociados con la empresa Suiza Swiss Aluminium. Iniciando oficialmente sus operaciones el 24 de Abril de 1983.

Su capacidad instalada inicial fue de 1.300 mil TM al año y en 1992, mediante la implementación del plan de ampliación, fue aumentada su capacidad a 2 millones de TM al año.



Generalidades de la Empresa

C.V.G BAUXILUM-MINA C.A. es el producto de la fusión realizada en el año 1994 entre C.V.G BAUXIVEN y C.V.G INTERALUMINA. Dicha participación accionaria de la compañía está constituida en un 99% por la inversión Venezolana, Representada por la Corporación Venezolana de Guayana, y un 1% de capital extranjero, correspondiente al consorcio Alusuisse Lonza Holding.

la operadora de Bauxita y está ubicada en la zona de Los Pijiguaos, se encarga de la explotación de los yacimientos de Bauxita con una capacidad máxima instalada de 5.800.000 t/año y en C.V.G BAUXILUM PLANTA es la operadora de Alúmina, ubicada en Puerto Ordaz, donde se transforma por medio del proceso Bayer, la Bauxita en Alúmina de Grado Metalúrgico con una capacidad instalada de 2 millones t/año.

La Alúmina constituye la principal materia prima para la obtención de aluminio primario, debido a ello las ventas se dirigen fundamentalmente al mercado nacional, básicamente para proveer a las empresas C.V.G ALCASA y C.V.G VENALUM, destinándose el excedente de la producción a clientes menores e internacionales.

El proyecto de desarrollo minero del yacimiento Cerro Páez en la serranía de Los Pijiguaos, es resultado final del esfuerzo exploratorio realizado por el Estado Venezolano a través de la Corporación Venezolana de Guayana y otros organismos (CODESUR, entre otros), para encontrar en Venezuela una fuente de Bauxita capaz de proveer la materia prima básica de la industria del aluminio, logrando así integrar dicha industria y en consecuencia, independizarla del suministros extranjeros.

2.2 Reseña Histórica.

El desarrollo minero del yacimiento de Los Pijiguaos, es el resultado del esfuerzo exploratorio realizado por el Estado Venezolano, a través de la



Generalidades de la Empresa

Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G) y otros organismos (Ministerio de Energía y Minas, Conquista del Sur, entre otros), para encontrar en Venezuela una fuente de bauxita capaz de proveer la materia prima básica de la industria del aluminio nacional en consecuencia independizarla de suministros extranjeros. A continuación se expone un breve cronograma con la evolución histórica de la empresa:

- El año 1944 se inició la exploración en búsqueda de yacimientos de bauxita por parte del Servicio Técnico Geominero y Geología del Ministerio de Fomento en el Territorio Federal Delta Amacuro.

- Entre los años 1944 – 1951 se lograron descubrimientos de bauxita en el área de Upata. Se intensifican los esfuerzos para la búsqueda de Bauxita en Guayana.

- En el año 1970 el geólogo Armando Schwarck Anglade, ex - jefe de la división de geología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos, en un estudio realizado por la Comisión del Desarrollo del Sur (CODESUR) identificó en la serranía de Los Pijiguaos, Municipio Cedeño del Estado Bolívar, una coraza laterítica entre los ríos Suapure y Parguaza y la posible existencia de horizontes de Bauxita.

- En el periodo de 1970 hasta 1976, la Corporación Venezolana de Guayana, procedió a efectuar la evaluación del yacimiento.

- A finales de 1978 se determina que las reservas probadas alcanzan, no menos de 200 millones de toneladas métricas de bauxitas y las probables, más de 500 millones de toneladas métricas con 50% Al_2O_3 y 40% de sílice total.

- El 20 de febrero de 1979 se funda la C.V.G Bauxita Venezolana (BUAXIVEN), con el fin de desarrollar, extraer y comercializar la bauxita de Los Pijiguaos.



Generalidades de la Empresa

- En el periodo de 1979 a 1982 se realizan estudios de factibilidad técnica, económica y financiera del proyecto. También se profundizó en la navegabilidad del río Orinoco y se inició la elaboración de un proyecto preliminar de canalización conjuntamente con la evaluación en detalle de las condiciones de los probables sitios de puerto de embarque del mineral. Se inicia a su vez la campaña de optimización de los datos haciéndose retículas de perforación de 100 x 100 Mts, para evaluar las reservas explotables en un área de 16 Km², donde se extrajeron 1.000 Tn de bauxita para pruebas.

- Entre los años 1982 y 1984 se realizó una reprogramación del proyecto a fin de coincidir estratégica y conceptualmente con el enfoque de la política de inversiones que adoptó el Estado Venezolano para enfrentar y superar la coyuntura económica del proyecto.

- En el año 1986 se realizaron los primeros pasos de la explotación temprana: puesta en marcha del Terminal fluvial provisional y se envían las primeras 200 toneladas métricas de bauxita a INTERALUMINA.

- En 1987, Plan Expansión del Proyecto del Aluminio en Venezuela, reforma del Plan Maestro y el Plan de inversiones para una capacidad instalada de 6 millones de toneladas métricas al año. Se inició el Plan de Explotación Temprana, habiéndose extraído 245.193 toneladas métricas de las cuales se enviaron a INTERALUMINA 134.180 métricas.

- En el año 1994 se integran las empresas C.V.G BAUXIVEN y C.V.G INTERALUMINA, conformando la empresa C.V.G BAUXILUM, faltando solo VENALUM y la respuesta de sus accionistas japoneses. BAUXIVEN se transformó entonces en C.V.G BAUXILUM Operadora de Bauxita en Los Pijiguaos y C.V.G INTERALUMINA en C.V.G BAUXILUM Operadora de Alúmina en Puerto Ordaz, para posteriormente (año 2002) transformarse en C.V.G BAUXILUM-MINA y C.V.G BAUXILUM-PLANTA.



Generalidades de la Empresa

2.3 Ubicación Geográfica.

El yacimiento “Cerro Páez” está situado en el extremo norte de la Serranía de Los Pijiguaos, al suroeste del Municipio Manuel Cedeño, del Estado Bolívar, a 500 Km de la ciudad de Caracas y 520 Km al suroeste de Ciudad Guayana, enmarcada entre los ríos Suapure y Parguaza y a una distancia de 40 Km del Río Orinoco.

El área está comprendida entre las longitudes $66^{\circ}40'30''$ W y $66^{\circ}46'30''$ W, y las latitudes $6^{\circ}26'30''$ N y $6^{\circ}32'30''$ N. Las dimensiones aproximadas del yacimiento son de 8 Km de largo y 2 Km de ancho con una elevación promedio máxima de 686 m.s.n.m. Los poblados más cercanos son Caicara del Orinoco y Puerto Ayacucho, ambos a una distancia de 167 Km por carretera asfaltada del complejo de bauxita. El yacimiento de bauxita conforman las mesetas que coronan las Serranías de Los Pijiguaos. **(Figura 2.1.)**

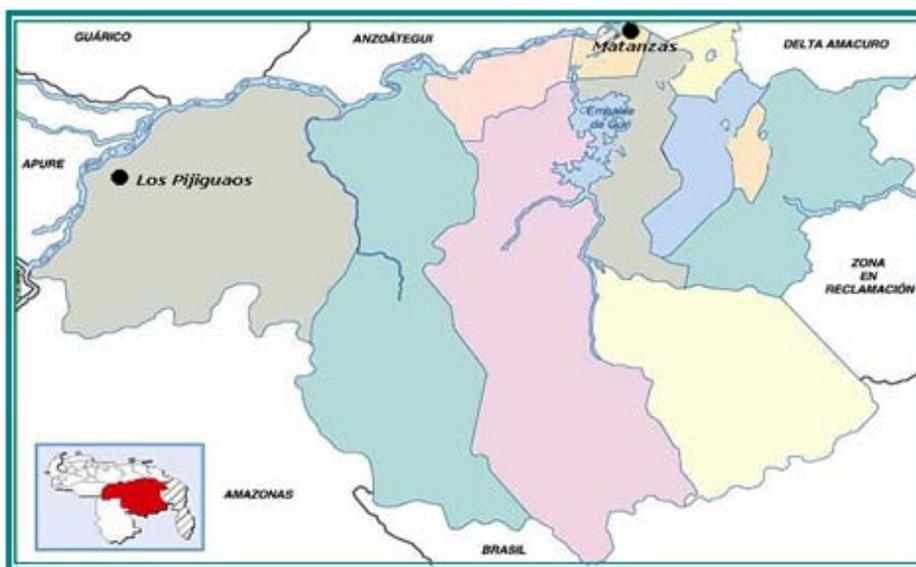


Figura 2.1. Localización del Yacimiento en Los Pijiguaos.



Generalidades de la Empresa

2.4 Misión de CVG Bauxilum.

Impulsar el crecimiento sustentable de la industria nacional, satisfaciendo la demanda de bauxita alúmina, promoviendo el desarrollo endógeno, como fuerza de transformación social y económica.

2.5 Visión de CVG Bauxilum.

Constituirnos en palanca fundamental para el desarrollo sustentable de la industria nacional, a los fines de alcanzar la soberanía productiva, con un tejido industrial consolidado y desconcentrado, con nuevas redes de asociación fundamentadas en la cogestión y la inclusión social.

2.6 Principios y Valores de la Empresa.

- **Excelencia:** obtener una calidad superior a los estándares de categoría mundial, estableciendo acciones dirigidas al mejoramiento continuo de la organización y sus trabajadores.

- **Honestidad:** conducta de sus trabajadores debe ser con sentido de justicia, responsabilidad y honradez.

- **Participación:** parte activa en el mejoramiento continuo de la gestión y procesos en pro del logro de la misión, visión y objetivo de la empresa.

- **Conciencia Ambiental:** compromiso individual y colectivo, frente a la defensa y el mejoramiento del ambiente, utilizando los recursos naturales y energéticos eficientemente y así preservarlo para las generaciones futuras.

- **Compromiso:** propiciar y fortalecer la identificación y lealtad del trabajador con la organización, para el logro de la misión, visión y objetivos de la empresa, a través del desarrollo y reconocimiento del recurso humano.



Generalidades de la Empresa

2.7 Política de Calidad, Ambiente y Seguridad.

Fomentar el desarrollo, la participación del recurso humano y el mejoramiento continuo, en los procesos de explotación de bauxita y producción de alúmina, cumpliendo con las normas de calidad, ambiente y seguridad, para satisfacer los requerimientos y expectativas de nuestros clientes, con altos niveles de rentabilidad, competitividad y responsabilidad social.

2.8 Organigrama Actual de CVG Bauxilum.

(Figura 2.2.)

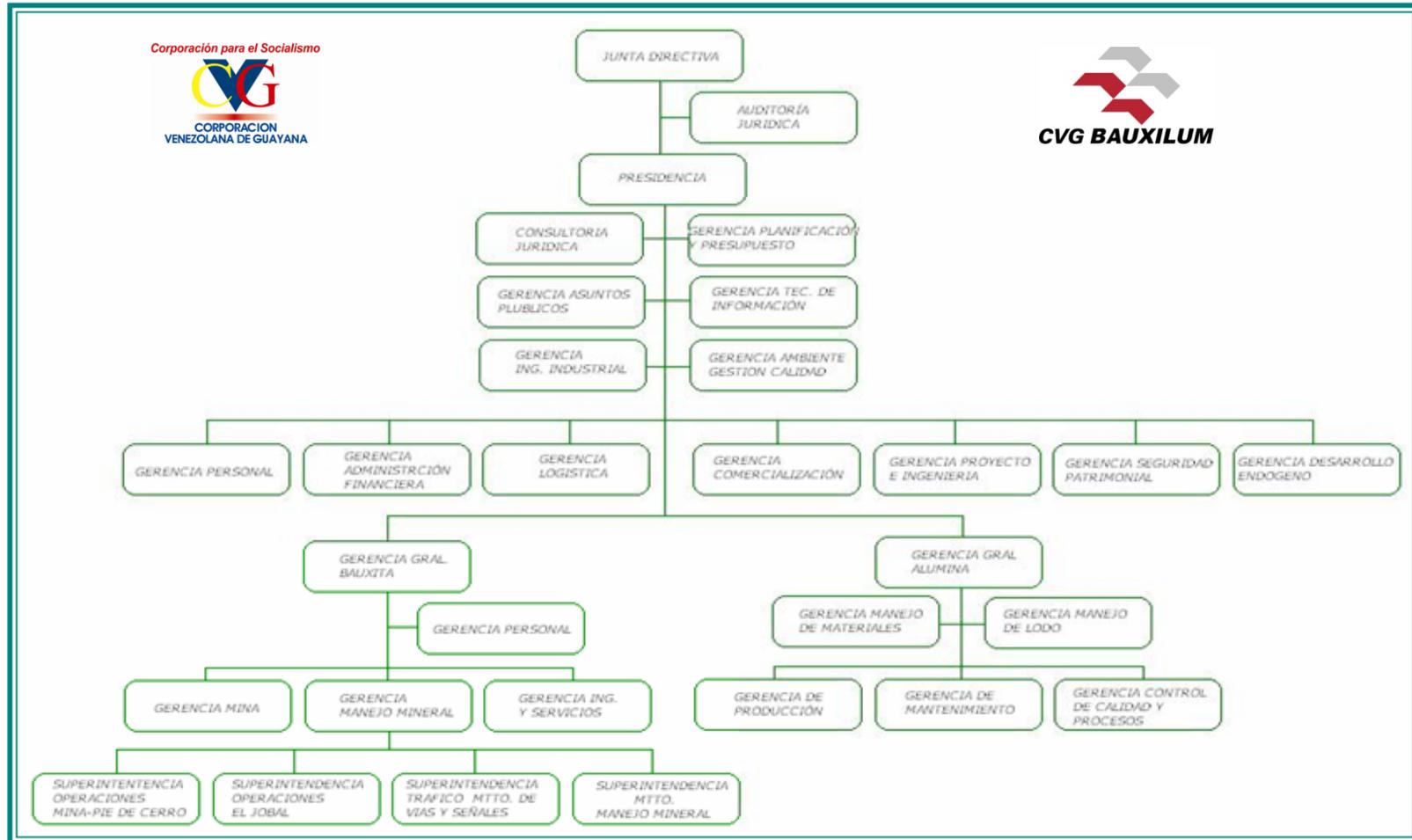


Figura 2.2. Organigrama de C.V.G. BAUXILUM



Generalidades de la Empresa

la capa vegetal, cuando la capa del suelo mineralizado es descubierto se procede a su extracción con las palas hidráulicas, las cuales cargan a los camiones roqueros que tienen una capacidad de 90 y 100 toneladas.

Estos camiones llevan el material hasta el área de trituración, una vez en esta sala se prepara el mineral a la granulometría máxima de 10 cm para su manejo y posterior transporte, debido a que este material tiene un peso nominal de 1320 a 1400 Kg/m³, Luego este mineral es llevado desde Sala de Trituración a través de la cinta transportadora C1 hasta la correa de bajada.

(Figura 2.4.)



Figura 2.4. Vista de la Mina con la capa vegetal removida (lado izquierdo). Extracción del Mineral (Centro). Molino de trituración (lado derecho). [El autor].

La correa de bajada (CV4.01) es el medio de transportar el mineral de la parte superior del yacimiento hasta Pie de Cerro, esta tiene una longitud de 4.2 Km. Y una pendiente de inclinación de aproximadamente 18°, esta correa opera con tecnología de teleférico y opera a una capacidad de 1600 tn/hr. **(Figura 2.5.)**



Generalidades de la Empresa



Figura 2.5. Vista de la correa de bajada hacia la Mina (lado izquierdo). Vista de la correa de bajada hacia Pie de Cerro (centro). Vista de la correa de bajada desde los patios de homogenización en Pie de Cerro (lado derecho). [El autor].

2.9.2 Pie de Cerro.

Pie de Cerro es el área de enlace Entre la Mina y el Jobal, a esta llega el mineral procedente de la Mina el cual desciende por la correa de bajada, el mineral es agrupado por dos apiladores que operan a 1600 Toneladas/hora en 4 (cuatro) patios de homogenización (**figura 2.6.**) los cuales poseen una capacidad de 250.000 toneladas cada uno. El mineral apilado en los patios es tomado mediante unos sistemas de recuperadores tipo puente con dos ruedas de cangilones que a trabaja a 3600 toneladas/hora y movilizados a través de cintas transportadoras hasta un silo dosificador en donde se cargan los vagones con capacidad de 90 toneladas.



Generalidades de la Empresa



Figura 2.6. Vista de Pie de Cerro desde la correa de bajada (lado izquierdo). Proceso de Apilación (centro). Proceso de recuperación (lado derecho). [El autor].

Una locomotora transporta un corte conformado por 40 vagones remolcados a través de 54 Km. de vía férrea hasta llegar a Puerto Gumilla (área de apilamiento y carga de gabarras en el Jobal). **(Figura 2.7.)**



Figura 2.7. Vista de la Locomotora Transportando el mineral bauxítico desde Pie de Cerro hasta el área El Jobal. [El autor].

2.9.3 El Jobal.

El Jobal recibe el mineral procedente del área de homogenización, para luego descargar este a través de un sistema rotario llamado volcadora de vagones (**figura 2.8.**), el cual, opera con motores de corriente continua y variadores de frecuencia; una vez desprendidos los vagones del ferrocarril, la



Generalidades de la Empresa

maquina (volcadora de vagones) se acopla en los extremos del vagón y hace girar a este 180° para descargar el mineral sobre una tolva la cual está conectada con un sistema de cintas trasportadoras que pueden llevar la bauxita a los patios de apilamiento 4 (cuatro) los cuales tienen una capacidad de 600.000 toneladas (150.000 cada patio) para luego trasladar el material directamente al muelle por otra cinta transportadora que tiene una longitud de 1.5 km y opera a 3600 toneladas/hora. Al llegar al muelle se procede a cargar las gabarras con el mineral para su trasporte a través del rio Orinoco en una travesía de tres (3) días hasta el puerto de matanza. El muelle de El Jobal es una plataforma de concreto rectangular de 10 metros de ancho por 260 metros de largo, de los cuales 220 metros corresponden al frente de carga y el resto de la extensión al puente de carga.



Figura 2.8. Volcadora de Vagones (lado izquierdo). Vagón desprendido del ferrocarril en la volcadora de vagones (centro). Sistema de cintas transportadoras (lado derecho). [El autor].

El cargador mecánico de las gabarras, lo constituye una maquinaria que se desliza por rieles de 204 m. de longitud y está dispuesto para cargar en sucesión los grupos de gabarras que alcanzan ser atracados a lo largo del



Generalidades de la Empresa

muelle. La capacidad efectiva del equipo de carga es de 3600 TM/h., siendo alimentado desde el patio de almacenamiento de El Jobal por un sistema de bandas transportadoras, usando el recuperador del patio o directamente desde el puerto de El Jobal hasta el terminal de la planta de alúmina, en Puerto Ordaz, con un recorrido de 650Km., se utilizan convoyes conformados por un empujador y trenes de 12, 15, 16 y 20 gabarras, que tienen una capacidad de 1500 o 2000 TM cada una. El transporte solo se efectúa durante el periodo de aguas altas del río Orinoco comprendido entre los meses de Mayo y Diciembre, y la operación es continua durante las 24 horas del día, y para garantizar las operaciones permanentes del transporte fluvial, se ha diseñado un canal de navegación de 100 m. de ancho a lo largo del trayecto entre El Jobal y Matanzas. Este es un canal natural que se adapta a los cambios que sufre el río año tras año, y por ende no requiere dragado para su mantenimiento. Esto constituye el proceso productivo y transporté de la Bauxita. **(figura 2.9.)**



Figura 2.9. Cargador Mecánico de gabarras (lado izquierdo). Gabarras atracadas en el muelle siendo cargadas (centro). Sistema de bandas transportadoras (lado derecho). [El autor].



Generalidades de la Empresa

2.10 Certificaciones Obtenidas.

- Norma Norven 2898 en el Producto Alúmina Calcinada Grado Metalúrgico, Marca Comercial: Bauxilum C.A Otorgada el 2 de Junio de 1992.
- Certificación del Sistema de Gestión de Calidad, bajo la Norma ISO 9001:2000, en su línea de producción “Alúmina Calcinada Grado Metalúrgico”. 26 de Enero 2005.
- Acreditación del laboratorio Otorgada el 15 de Diciembre de 1997 bajo lineamientos establecidos en la norma Covenin 2534:1994, “Requisitos Generales que permite Evaluar la Competencia de los Laboratorios de Calibración y Ensayos”, en el proceso de renovación bajo la norma Covenin 2534:2004, “Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración”.
- Declaración de cumplimiento de los requisitos establecidos por el Código PBIP (Código de Protección de los Buques e Instalación Portuaria). 30 de Junio 2004.

2.11 Descripción del Sistema Eléctrico de la Empresa.

2.11.1 Sistema de Transmisión Sur.

El sistema de transmisión sur se inicia desde la subestación San Jerónimo, perteneciente a CORPOELEC, ubicadas en las inmediaciones de la ciudad de Valle de la Pascua en el estado Guarico. De allí parte una línea en doble terna con una longitud total de 551 Kilómetros y está compuesta por más de 1300 torres de transmisión. Estas líneas alimentan cinco subestaciones de distribución denominadas Espino, Cabruta, Pijiguaos, Jobal y Puerto Páez.



Generalidades de la Empresa

2.11.2 Circuitos Principales.

El sistema eléctrico de BAUXILUM actualmente está compuesto por cuatro circuitos fundamentales, a nivel de 13.8 kV donde los tres (03) primeros circuitos están conectados a la subestación Los Pijiguaos, los cuales se mencionan a continuación:

2.11.3 Campamento, área Residencial.

Este circuito lo constituye una línea doble terna con conductor de Arvidal #4/0 AWG de aproximadamente 4 km de longitud, alimentándose a través de un disyuntor ubicado en la subestación Los Pijiguaos. El mismo, presenta una serie de derivaciones, las cuales alimentan tres áreas residenciales la Guacamaya, Trapichote y Centro Cívico.

2.11.4 La Mina, área Industrial.

Este circuito lo constituye una línea doble terna Arvidal #4/0 AWG de aproximadamente 9 km de longitud, lo cual alimenta tres (03) puntos importantes:

- Subestación de Correa de Bajada, está compuesta por dos (02) transformadores de 3 MVA de relación 13.8/4.16 kV alimentando la cabina de media tensión, centro de control de motores, fuentes de alimentación, resistencias líquidas, sistema de seguridad, cubículos de estator y rotor.

- Subestación Centro de Trituración (CORPOELEC), está compuesta por dos (02) transformadores de 3.75 MVA de relación 13.8/4.16 kV, alimentando los siguientes elementos: cabina de media tensión, centro de control de motores, panel de relés y cuadros de baterías. En esta área se realiza el proceso de trituración del material y transporte del mismo hasta la correa de bajada.

- Edificaciones, está compuesta por laboratorios, oficinas, talleres, almacenes e iluminación exterior.



Generalidades de la Empresa

2.11.5 Pie de Cerro, área Industrial.

Este circuito lo constituye una línea doble terna con conductor de Arvidal #4/0 AWG de aproximadamente 2.9 km de longitud y alimenta a los apiladores, recuperadores, cargador de vagones, cintas transportadoras, torre de transferencia, sala de control, carro de transferencia y postes para el alumbrado con una altura de 50 M de altitud.

2.11.6 El Jobal, área Industrial.

Este circuito está constituido por una línea de 115 kV de aproximadamente 52 km, alimentada desde la subestación Los Pijiguaos y llegando a la subestación El Jobal, la cual está formada por un transformador de 10 MVA con relación de transformación 115/13.8 kV alimentando tres (03) puntos importantes como lo son: el patio de almacenamiento, el puerto El Jobal y edificaciones entre las cuales tenemos: almacenes, talleres, plantas de tratamiento, medicatura, vestuarios, oficinas e iluminación exterior.



CAPITULO III MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes.

Trabajos de Grado previos fueron llevados a cabo en la universidad de oriente (UDO) y otras universidades del país, estos complementarán la investigación realizada en este proyecto.

➤ En el año 1994, Salazar Alfonso realiza la evaluación y rediseño del sistema eléctrico de CVG Bauxiven (antiguo nombre de CVG Bauxilum operadora de bauxita), este trabajo tuvo como finalidad evaluar el sistema eléctrico de la empresa a fin de minimizar las influencias adversas de este y así poder garantizar una mayor disponibilidad y continuidad. [1]

➤ En el Año 2007, Gómez Luis realiza un estudio del sistema eléctrico de potencia, mediante métodos normalizados y uso de herramientas computacionales, en el área de trituración de CVG Bauxilum. El objetivo de esta investigación era establecer una propuesta que minimizara las variaciones de tensión y mejorara las condiciones operativas del sistema, para ello se realizaron pruebas de cortocircuito, flujo de carga, comportamiento del sistema al arrancar los motores de mayor capacidad y coordinación de protecciones eléctricas. [2]

➤ En el año 2007, Lira Robert desarrolla el estudio de las perturbaciones de voltaje en el sistema de alimentación de 4160 voltios para los motores de inducción ubicados en el área de trituración de la mina de la CVG BAUXILUM. Este proyecto tuvo como finalidad determinar aquellos motores que durante su arranque contribuían con las fluctuaciones de voltajes en el sistema eléctrico de la empresa, para así poder evaluar el tipo de accionamiento eléctrico existente en el mercado, que más se adaptara a las necesidades de la carga que estos impulsan y a las condiciones del sistema de distribución existente. [3]



3.2. Sistemas de distribución industriales.

Esta área se refiere a la alimentación, en zonas definidas denominadas parques industriales, a pequeña o medianas industrias localizadas por lo general en las afueras de las ciudades o centros urbanos. Las estructuras pueden ser similares a las comerciales; sin embargo, los requisitos de continuidad varían, siendo en algunos casos no muy estrictos. Por lo general la tensión de alimentación en estas zonas es mediana por lo que el desarrollo de las redes de baja tensión es mínimo. La planeación de estos sistemas se debe considerar con gran flexibilidad ya que la expansión en estas zonas industriales es grande, en especial en áreas nuevas en países en desarrollo. En la mayoría de los casos estas estructuras son desarrolladas y operadas por compañías de distribución estables.

Los sistemas de distribución se pueden desarrollar en estructuras diversas. La estructura de la red de distribución que se adopte tanto en mediana como baja tensión depende de los parámetros que intervengan en la planeación de la red, en nuestro estudio se acentuara en estructuras radiales.

3.2.1. Red de distribución Radial.

Por definición, un sistema de operación radial es aquel en que el flujo de energía tiene una sola trayectoria de la fuente de carga, de tal manera que una falla en ésta produce interrupción en el servicio.

Ese sistema de servicio de energía eléctrica es probable el más antiguo y comúnmente usado en la distribución de energía eléctrica. Debido a su bajo costo y sencillez, las redes de distribución radial se seguirán usando, pero tratando también de mejorar sus características de operación para hacerlas más confiables. [4]



3.3. Cortocircuito.

El cortocircuito es una conexión de poca impedancia entre dos puntos en los cuales existe una diferencia de potencial, dando lugar a una corriente de intensidad muy elevada. [5]

La magnitud de la corriente que fluirá a través de un cortocircuito depende principalmente de dos factores:

Las características y el número de fuentes que alimentan al cortocircuito.

La oposición o resistencia que presente el propio circuito de distribución.

Las fuentes principales de corrientes de cortocircuito son los generadores existentes en el sistema de potencia local y la generación remota de la red que le suministra energía eléctrica (red pública), sin embargo, los motores sincrónicos y de inducción que antes de la falla representaban una carga para el sistema, en condiciones de cortocircuito, se comportan como generadores durante un tiempo relativamente corto.

La oposición que presenta el propio circuito de distribución al flujo de la corriente de cortocircuito se denomina “impedancia” en términos eléctricos y depende de la configuración del sistema eléctrico, y se calcula a partir de la impedancia de cada uno de los componentes del sistema.

Otro de los factores que influyen sobre la magnitud de la corriente de cortocircuito son el momento, tipo y ubicación de la falla.

Entre las causas más frecuentes de cortocircuitos a nivel de instalaciones comerciales e industriales podemos mencionar las debidas a la ruptura, debilitamiento del aislamiento de conductores y/o equipos y los producidos por agentes ambientales.



Los efectos de las corrientes de cortocircuitos son muy variados, pero los más importantes son el debido al efecto Joule (calentamiento de los equipos eléctricos debido a la gran circulación de corriente), esfuerzos electromecánicos en las máquinas eléctricas y destrucción física del lugar de la falla cuando se producen grandes arcos eléctricos. De los efectos de las fallas por cortocircuito, el más notorio es la interrupción del suministro eléctrico debido a la necesaria apertura del circuito eléctrico por parte de los dispositivos de protección para despejar la falla y evitar mayores daños en el sistema.

Aún cuando se diseñe muy cuidadosamente un sistema de potencia, este estará siempre expuesto al daño que puedan causar flujos de corriente en condiciones de cortocircuito tales como sobrecalentamientos y arcos eléctricos destructivos. Para asegurar que los equipos de protección puedan aislar fallas rápidamente y minimizar el daño de cada uno de los componentes del sistema de potencia y el riesgo del personal, el estudio de corrientes de cortocircuito debe ser incluido en el diseño de los sistemas de potencia y también cuando se hagan modificaciones a los sistemas existentes.

3.3.1. Características de la corriente de cortocircuito.

El proceso que ocurre en el sistema de potencia al producirse una falla causada por un cortocircuito es esencialmente de carácter transitorio. La corriente en régimen normal es una onda sinusoidal a 60 Hertz de frecuencia y amplitud constante, no así cuando sucede un cortocircuito. La forma de onda en este caso sigue teniendo una forma sinusoidal a 60 Hertz pero va decreciendo exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta su valor en régimen estacionario.

Para estudiar el sistema en este estado transitorio se divide el período de ocurrencia de la falla en una serie sucesiva de intervalos “casi



estacionarios” los cuales son el período subtransitorio, transitorio y estacionario o permanente, y se aplica el concepto de impedancia para determinar la corriente correspondiente a cada uno de estos estados o intervalos.

La aplicación del concepto de impedancia se ve plasmada en la asignación de impedancias variables con el tiempo a las máquinas rotativas las cuales son las fuentes de corriente de cortocircuito. En las máquinas rotativas de corriente alterna generalmente la impedancia puede modelarse como una reactancia inductiva debido a la naturaleza inductiva de sus arrollados, por lo que generalmente se consideran tres reactancias (X) asociadas a cada uno de los intervalos en los que se divide la falla:

La reactancia subtransitoria X_d'' que es la reactancia aparente del arrollado del estator en el instante del cortocircuito y determina el flujo de corriente en los primeros 30 ciclos (hasta $\frac{1}{2}$ segundo) aproximadamente.

La reactancia transitoria X' que determina la corriente durante el período siguiente al subtransitorio y abarca el rango de tiempo entre $\frac{1}{2}$ y 2 segundos después de la ocurrencia del cortocircuito.

La reactancia sincrónica X_d , la cual determina el flujo de corriente cuando se establece el período estacionario.

Dependiendo de la magnitud y defasaje en el tiempo entre las ondas de tensión y corriente de un sistema en el instante del cortocircuito, la corriente de falla puede presentar características de asimetría con respecto al eje normal de la corriente; en general esto ocurre cuando la onda de tensión normal se encuentra en un valor distinto a su pico máximo en el momento de ocurrencia de la falla. Para producir la máxima asimetría el cortocircuito siempre debe ocurrir cuando la onda de tensión se encuentre pasando por cero (magnitud cero). En un sistema trifásico balanceado (con tres tensiones



defasadas 120°), la máxima corriente asimétrica ocurre solamente en una de las fases del sistema (cualquiera de las tres).

La asimetría de la corriente de cortocircuito surge debido a que bajo las condiciones explicadas anteriormente, la corriente que fluye tiene dos componentes: el componente de corriente alterna (componente ac) y un componente de corriente directa (componente dc) tal como ocurre en los circuitos RL de corriente alterna. Este componente dc decrece a medida que pasa el tiempo ya que su energía se disipa en forma de calor por la resistencia del circuito (efecto Joule). Motivado a esto, la rata de decrecimiento es inversamente proporcional a la relación entre la resistencia y reactancia del circuito (X/R) (entre más baja es la relación X/R , más rápido es el decrecimiento). Por ejemplo, en sistemas de baja tensión, la relación X/R generalmente es baja (menor a 15) por lo que la componente dc decae a cero en un rango entre 1 y 6 ciclos dependiendo del caso. [6]

Como se observa en la **(figura 3.1.)**, el valor máximo de la corriente asimétrica ocurre cerca del medio ciclo a partir del instante del cortocircuito.

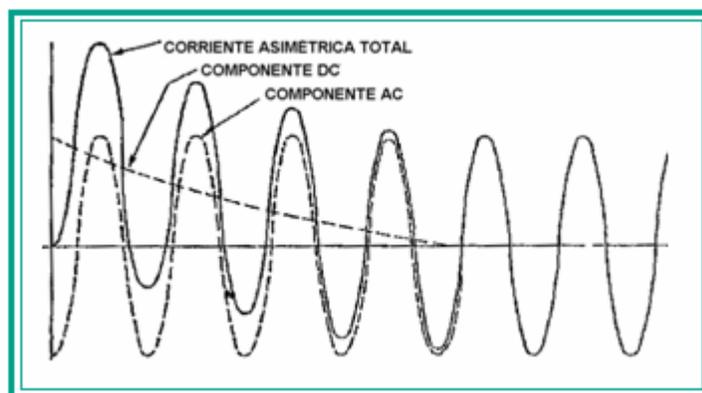


Figura 3.1. Efecto de asimetría en la corriente de cortocircuito [7]



Como se dijo anteriormente, las corrientes de cortocircuito tienen varias fuentes, las cuales contribuyen en forma diferente dependiendo de su naturaleza. La forma en que las distintas fuentes alimentan al cortocircuito se muestra en la **(figura 3.2.)**. A causa de que las corrientes de las máquinas rotativas decrecen a medida que se reduce el flujo después del cortocircuito, la corriente de cortocircuito total decae con el tiempo. Considerando solamente la parte simétrica de la corriente de cortocircuito, la magnitud es máxima en el primer medio ciclo luego del cortocircuito y de un valor más bajo unos pocos ciclos después. Nótese que el componente del motor de inducción desaparecerá completamente luego de uno o dos ciclos, exceptuando los motores más grandes en la cual se puede presentar por más de cuatro ciclos. [6]

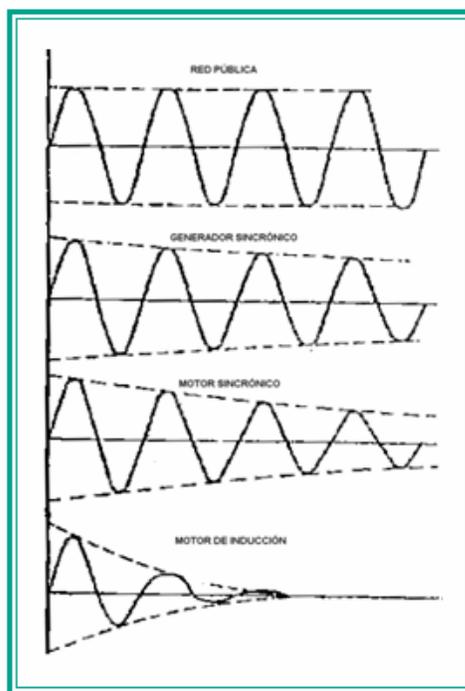


Figura 3.2. Corrientes de cortocircuito simétricas de algunas fuentes [7]



3.3.2. Cálculo de las corrientes de cortocircuito.

Existen varios métodos para calcular corrientes de corto-circuito, pero todos necesitan de una elaboración previa de un diagrama unifilar con su correspondiente diagrama de impedancias, explicados a continuación.

3.3.2.1. Diagrama Unifilar.

El diagrama unifilar es la representación del sistema a ser estudiado. Resulta de la simplificación de un sistema trifásico equilibrado como un circuito monofásico, formado por una de las tres líneas y un neutro de retorno. Otra de las simplificaciones hechas es suprimir el cierre del circuito por el neutro e indicando sus partes componentes por medio de símbolos normalizados en vez de sus circuitos equivalentes. Los planos del apéndice A son diagramas unifilares que representan el sistema eléctrico del edificio.

La finalidad de un diagrama unifilar es suministrar de manera sencilla y concisa los datos más significativos e importantes de un sistema. La información que se representa en el diagrama depende del estudio que se está realizando. Por ejemplo, para estudios de cortocircuito es fundamental representar los equipos de maniobra y protección tales como interruptores, relés y fusibles.

3.3.2.2. Diagrama de impedancias.

El diagrama unifilar debe transformarse en un diagrama de impedancias que muestre el circuito equivalente de cada componente del sistema referido al mismo lado de uno de los transformadores para estudiar el comportamiento en condiciones de carga o al presentarse un cortocircuito.

Los circuitos equivalentes para el estudio de cortocircuito de los distintos componentes del sistema son los siguientes:

- Generadores y Motores: La representación elemental de una máquina sincrónica es una fuente de tensión en serie con una impedancia. Los



motores de inducción se representan igual que las máquinas sincrónicas pero se considera su contribución al cortocircuito solo en los primeros ciclos.

- Transformadores: Generalmente se representan por su circuito equivalente “T” ignorando su rama magnetizante.

- Líneas de transmisión y Cables: El circuito equivalente a utilizar depende de la longitud de la línea, usándose el modelo “ π ” para líneas largas y medias. Las líneas y cables cortos se representan como una resistencia en serie con una inductancia.

- Cargas: Se pueden modelar como impedancias de valor constante que consumen potencia activa y reactiva. En estudios de cortocircuito se representan como circuitos abiertos.

-Sistemas externos: Se modela por el circuito equivalente de Thévenin donde la tensión equivalente depende de las tensiones internas de los generadores y la impedancia equivalente depende del resto de elementos del sistema.

El diagrama de impedancia que se describe en esta sección se denomina diagrama de secuencia positiva, ya que representan impedancias para las corrientes equilibradas de un circuito trifásico simétrico. Como se explicará más adelante, también existen diagramas de impedancias para otras secuencias (negativa y cero), siendo en esencia iguales a los de secuencia positiva pero usando otros circuitos equivalentes.

3.3.3. Sistema Por Unidad.

Para simplificar la elaboración del diagrama de impedancias y los cálculos de corrientes de cortocircuito, frecuentemente se transforman los valores reales de las variables e impedancias (Voltios, Amperios, Ohmios) a una nueva magnitud llamada “por unidad” (p.u.). Esta magnitud resulta de dividir el valor real de la variable entre un valor base o de referencia de la



misma (un valor razonable), el cual tiene una unidad igual a la del valor real resultando un número adimensional.

$$Variable_{p.u} = \frac{Variable_{Real}}{Variable_{Base}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Otro sistema usado es el valor “por ciento” (%) que es igual a 100 veces el valor por unidad.

La utilización del sistema por unidad tiene muchas ventajas, entre ellas:

- Las impedancias de las máquinas rotativas y transformadores son del mismo orden independiente del tamaño de los mismos.
- Permite detectar fácilmente los errores de cálculo.
- Se reduce el empleo de la $\sqrt{3}$ en los cálculos trifásicos.
- Se evita la referencia de cantidades de uno a otro lado de los transformadores.
- Se evita el trabajo con cantidades demasiado grandes, disminuyendo los errores en el caso de usar computadores para los cálculos.
- Los fabricantes normalmente especifican las impedancias de los equipos eléctricos en por unidad o en por ciento.

Una elección arbitraria de dos cantidades (generalmente tensión y potencia) como valores bases, fijan al mismo tiempo los demás valores base necesarios (corriente, impedancia) para elaborar el diagrama a partir de las relaciones entre ellas como por ejemplo la ley de Ohm. Las ecuaciones para la impedancia base y corriente base son las siguientes:

$$Z_{base} = \left(\frac{V_{base}^2}{S_{base}} \right) \quad \text{Ec. 3.2}$$



$$I_{base} = \left(\frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \right) \quad \text{Ec. 3.3}$$

Respetando ciertas condiciones al seleccionar los valores base (como tensión base igual a la tensión línea a línea del sistema), las leyes y relaciones eléctricas más utilizadas tales como la ley de Ohm, leyes de Kirchhoff, ley de la potencias, etc.; se cumplen igual que en un circuito monofásico de corriente alterna.

En muchos casos la impedancia en por unidad de un componente de un sistema está expresado en una base distinta que la seleccionada como base en el estudio (como en el caso de transformadores, generadores y motores), siendo necesario cambiarla a la nueva base usando la ecuación

$$Z_{p.u. \text{ nueva}} = Z_{p.u. \text{ vieja}} \cdot (V_{base \text{ viejo}} / V_{base \text{ nuevo}})^2 \cdot (S_{base \text{ nueva}} / S_{base \text{ vieja}}) \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde:

$Z_{p.u. \text{ vieja}}$ = Impedancia de placa del equipo.

$V_{base \text{ viejo}}$ = Tensión nominal del equipo.

$V_{base \text{ nuevo}}$ = Tensión base del sistema.

$S_{base \text{ viejo}}$ = Potencia nominal del equipo.

$S_{base \text{ nuevo}}$ = Potencia base del sistema.

3.3.4. Tipos de fallas por cortocircuitos en sistemas de potencia.

Se produce un cortocircuito en un sistema de potencia, cuando entran en contacto, entre sí o con tierra, conductores energizados correspondientes a distintas fases. Normalmente las corrientes de cortocircuito son muy



elevadas, entre 5 y 20 veces el valor máximo de la corriente de carga en el punto de falla. Los cortocircuitos se pueden clasificar en simétricas (balanceadas) y asimétricas (desbalanceadas). En las fallas simétricas la corriente de las tres fases del sistema son iguales en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos:

- Cortocircuito trifásico: Se ponen en contacto las tres fases en un mismo punto del sistema. Es el cortocircuito más severo en la mayoría de los casos. **(Figura 3.3.)**. [6]

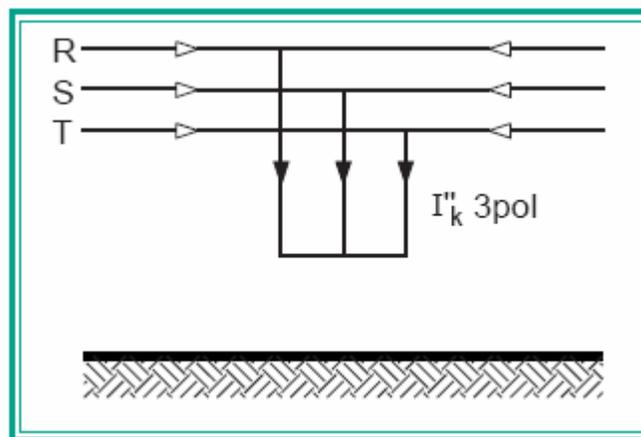


Figura 3.3. Cortocircuito Trifásico. [8]

- Cortocircuito trifásico a tierra: Se ponen en contacto las tres fases y tierra en un mismo punto del sistema. **(Figura 3.4.)**. [6]

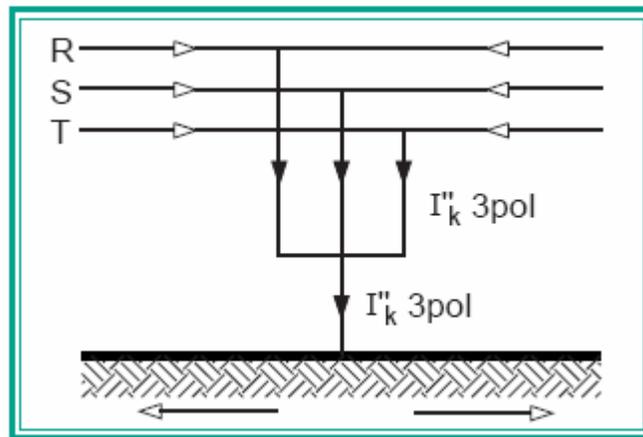


Figura 3.4. Cortocircuito Trifásico a Tierra. [8]

En las fallas asimétricas la corriente en las tres fases del sistema no son iguales en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos:

-Cortocircuito bifásico (fase a fase): Entran en contacto dos fases cualesquiera del sistema. **(Figura 3.5.). [6]**

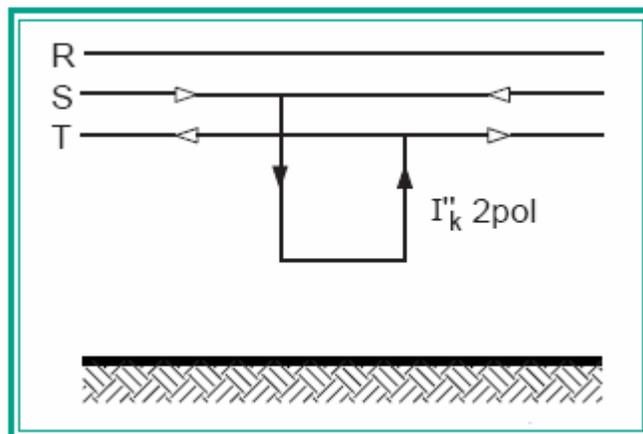


Figura 3.5. Cortocircuito Bifásico. [8]

-Cortocircuito bifásico a tierra (dos fases a tierra): Entran en contacto dos fases cualquiera y la tierra del sistema. **(Figura 3.6.). [6]**

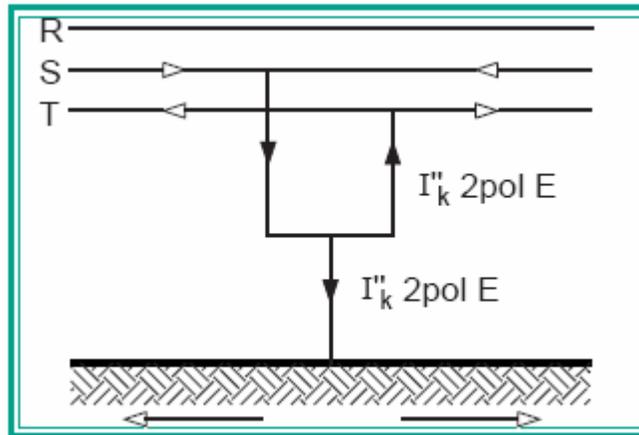


Figura 3.6. Cortocircuito Bifásico a Tierra. [8]

-Cortocircuito monofásico (fase a tierra): Ocurre al ponerse en contacto una fase cualquiera con la tierra del sistema. Es el cortocircuito más frecuente. **(Figura 3.7.). [6]**

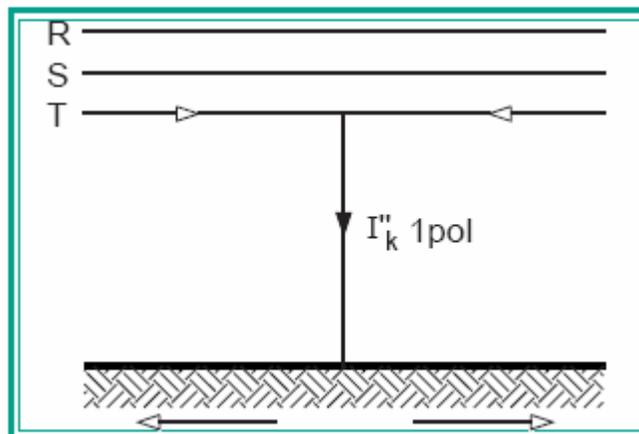


Figura 3.7. Cortocircuito Monofásico (fase a tierra). [8]

3.3.5. Métodos para el cálculo de corrientes de cortocircuito.

Existen diferentes métodos para hallar el valor de las corrientes de cortocircuito en cualquier punto de un sistema de potencia, siendo algunos el



método de reducción de mallas, el método de contribución y el método de componentes simétricas.

El método de reducción de mallas se basa en el teorema de Thévenin, modelando el sistema en el punto de falla como una fuente de tensión (voltaje Thévenin) con magnitud igual al voltaje previo a la falla en serie con una impedancia equivalente (impedancia de Thévenin vista desde el punto de falla) la cual se halla por reducción de mallas del diagrama de impedancias correspondiente. Ya con el modelo de Thévenin es muy sencillo calcular la corriente de cortocircuito que viene dada por el voltaje de Thévenin entre la impedancia de Thévenin. Este método no considera las corrientes que circulan previas a la falla, pero en la mayoría de los sistemas de potencia la aproximación es razonable.

El método de contribución es una aplicación del teorema de superposición, partiendo del cálculo de la corriente de cortocircuito que produce cada fuente individualmente sobre el punto de falla. Luego, la corriente de cortocircuito total será la suma de las distintas contribuciones individuales de cada fuente. Presenta la desventaja de ser poco práctico en el caso de existir muchas fuentes de corrientes de cortocircuito.

El método de componentes simétricas está basado en la descomposición de vectores que representan corrientes desequilibradas (fallas asimétricas) en sistemas de vectores equilibrados denominados componentes simétricos. Con esta herramienta, las fallas asimétricas se pueden estudiar de manera similar a como se estudian las fallas simétricas (trifásicas). Este método se explicara con más detalle más adelante.

Un método adicional muy usado para el cálculo utilizando computadores es empleando la matriz de impedancia de barra para



determinar las corrientes de cortocircuito. Este método se fundamenta en las propiedades que tiene esta matriz. [9]

3.3.5.1. La matriz de impedancias de barra en los cálculos de Cortocircuito.

La matriz de impedancias de barra ($\mathbf{Z}_{\text{barra}}$) es importante y muy útil para efectuar cálculos de fallas. Existen diversos métodos rápidos para desarrollar $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ a partir de una lista de elementos de impedancia. El método que se describe en esta sección es a través de la inversión de la matriz de admitancias de barra ($\mathbf{Y}_{\text{barra}}$) debido a su gran sencillez y exactitud.

Las matrices $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ y $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ son simétricas respecto a la diagonal principal y están relacionadas por $[\mathbf{Z}_{\text{barra}}] = [\mathbf{Y}_{\text{barra}}]^{-1}$. Los elementos de $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ en la diagonal principal se llaman “impedancias propias de los nodos” y los elementos fuera de la diagonal se conocen como “impedancias mutuas de los nodos”.

Para hallar la matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ se invierte la matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ por cualquier método (tal como Gauss - Jordan). Para conseguir la matriz de admitancia de barra se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se construye un diagrama de admitancias del sistema a partir del diagrama de impedancias (invirtiendo una a una cada impedancia).
2. Los nodos o puntos de interés (puntos de falla) se consideran como “barras” del sistema.
3. Cada valor de la diagonal de la matriz de admitancia es la suma de las admitancias unidas a la barra respectiva y cada elemento (i,j) fuera de la diagonal es igual al negativo (multiplicada por -1) de la admitancia que une



a las dos barras i y j . Este método se explica con detalle en la sección 7.4 del Stevenson [6].

Para una falla trifásica en la barra k , con un voltaje de prefalla igual a V_f , la corriente de cortocircuito es $I_{cc} = V_f/Z_{kk}$ donde Z_{kk} es el elemento (k,k) de la matriz Z_{barra} .

Si se desprecian las corrientes de prefalla, los voltajes de prefalla en todas las barras son iguales, por lo que la tensión en la barra m en el momento de un cortocircuito en la barra k es $V_m = (1 - Z_{mk}/Z_{kk})V_f$.

La corriente total de cortocircuito entre las dos barra n y m es

$$I_{nm} = (V_n - V_m)/Z_{nm}, \text{ donde } z_{nm} \text{ es la impedancia del elemento entre}$$

las barras n y m .

3.3.5.2. Método de componentes simétricas.

Este método se usa para estudiar fallas asimétricas en los sistemas de potencia, tales como cortocircuitos, conductores abiertos y fallas a través de impedancias. Este método se basa en un trabajo publicado por C.L. Fortescue, donde se demuestra que un sistema trifásico desequilibrado se puede descomponer en un sistema trifásico de vectores equilibrados llamados “componentes simétricas” de los valores originales. Los conjuntos equilibrados son:

1. Componentes de secuencia positiva, formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la misma secuencia de fases de los vectores originales.

2. Componentes de secuencia negativa, formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la secuencia de fases opuestas a la de los vectores originales.



3. Componentes de secuencia cero, formados por tres vectores de igual módulo y con una diferencia de fase nula.

La caída de tensión que se origina en una parte de la red por la corriente de una secuencia determinada depende de la impedancia de tal parte del circuito para la corriente de dicha secuencia. Las impedancias de un circuito o un elemento a las corrientes de distintas secuencias se suelen llamar impedancias de secuencia positiva, impedancia de secuencia negativa e impedancia de secuencia cero. Las corrientes de cualquier secuencia pueden considerarse como circulando en una red independiente formada por solamente por las impedancias a la corriente de tal secuencia, por lo tanto el análisis de una falla asimétrica en un sistema simétrico consiste en la determinación de los componentes simétricos de las corrientes desequilibradas que circulan.

El circuito equivalente monofásico formado por las impedancias a la corriente de cualquier secuencia exclusivamente, se denomina “red de secuencia” para tal secuencia. Las impedancias de secuencia de los distintos elementos que pueden conformar un sistema de potencia son las siguientes:

- Máquinas giratorias: las impedancias de las tres secuencias generalmente son diferentes, aunque no hay casi diferencia entre la magnitud de la impedancia de secuencia positiva y negativa. La impedancia de secuencia cero generalmente tiene un valor menor a las de secuencia positiva y negativa.

- Líneas y Cables: las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales. La impedancia de secuencia cero es de 2 a 3,5 veces mayor que la reactancia de secuencia positiva.

- Transformadores: se acostumbra a suponer que las impedancias de todas las secuencias son iguales, cualquiera sea el tipo de transformador.



- Cargas: las cargas conectadas en estrella o en delta suelen tener también las tres impedancias de secuencia iguales.

En cuanto a las redes de secuencia, se puede decir que las corrientes de secuencia cero circularán sólo si existe un camino de retorno por tierra (puestas a tierra) por donde pueda cerrarse el circuito. La impedancia conectada entre el neutro de una máquina y tierra sólo forma parte de la red de secuencia cero, ya que las corrientes de secuencia positiva y negativa no circularán al ser cero su suma vectorial en el neutro. Si una impedancia con valor Z_n se intercala entre el neutro y la tierra de un circuito conectado en estrella, debe colocarse una impedancia de valor $3Z_n$ entre el neutro y la barra de referencia de la red de secuencia cero.

Un circuito conectado en delta, por no disponer de camino de retorno, presenta una impedancia infinita a las corrientes de secuencia cero, aunque estas pueden circular en el interior de la delta.

Las máquinas rotativas (generadores, motores) tienen tensiones internas solamente de secuencia positiva. Las redes de secuencia negativa y cero, si se necesitan, se hallan sustituyendo las impedancias de secuencia y omitiendo las f.e.m.

La red de secuencia cero de líneas y cables se representan tal cual como su equivalente de secuencia positiva, pero cambiando los valores de la impedancia de secuencia cero. La red de secuencia negativa es igual a la de secuencia positiva.

Las redes de secuencia positiva y negativa de las cargas son iguales, sin embargo, la forma de la red de secuencia cero depende de la forma de conexión de la impedancia entre neutro y tierra. En estudios de corrientes de cortocircuito generalmente se desprecia la influencia de las cargas pasivas.



La red de secuencia negativa de transformadores es igual a la de secuencia positiva, pero las diversas combinaciones posibles de los devanados primario y secundario en estrella y delta varían la red de secuencia cero, tal como se muestra en el **anexo A**.

3.3.5.3. Cálculo de corrientes de cortocircuito asimétricas utilizando el método de componentes simétricas.

Luego de determinadas las redes de secuencia del circuito, estas se interconectan para representar los diferentes tipos de falla. Ya que se supone linealidad en las redes de secuencia, cada una de las redes puede reemplazarse por su equivalente de Thévenin, entre la barra de referencia y el punto de falla. La tensión del generador único del circuito equivalente para la red de secuencia positiva es V_f (tensión prefalla) respecto al neutro en el punto de aplicación de la falla. La impedancia Z_1 del circuito equivalente es la impedancia medida entre el punto P y la barra de referencia de la red de secuencia positiva con todas las f.e.m. internas en cortocircuito.

Como no circulan corrientes de secuencia negativa o cero antes de la ocurrencia de la falla, no aparece f.e.m. en los circuitos equivalentes de las redes de secuencia negativa o cero. Las impedancias Z_2 y Z_0 se miden entre el punto P y la barra de referencia en sus redes respectivas.

Al interconectar las redes de secuencia convenientemente y realizar los análisis correspondientes (véase capítulo 13 del Stevenson) [6], se obtienen los siguientes resultados para las distintas fallas asimétricas en un punto del sistema de potencia:

- Falla simple línea a tierra (fase a tierra):

$$I_a = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \quad I_b = I_c = 0 \quad \text{Ec. 3.5}$$



- Falla línea a línea (entre las fases b y c):

$$I_b = -I_c = \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2}, I_a = 0. \text{ Si } Z_1 = Z_2, \text{ entonces } I_b = 0.866 I_{cc3\phi} \quad \text{Ec. 3.6}$$

- Falla doble línea a tierra (entre las fases b, c y tierra):

$$I_b = -I_c = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)}, I_a = 0. \quad \text{Ec. 3.7}$$

donde:

I_a, I_b, I_c = Corrientes de cortocircuito en las fases a, b y c.

V_f = Tensión de prefalla entre fase y neutro

$I_{cc3\phi}$ = Corriente de cortocircuito trifásica

Z_1, Z_2, Z_0 = Impedancias equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero.

El método de la matriz de impedancias de barra para hallar corrientes de cortocircuito trifásicas se puede ampliar fácilmente a fallas asimétricas teniendo en cuenta que las redes de secuencia negativa y cero pueden representarse por redes equivalentes de igual manera como se hizo con las redes de secuencia positiva. El método es útil para hallar las impedancias equivalentes Z_1, Z_2 y Z_0 , representadas por las impedancias de la diagonal de la matriz Z_{barra} . Así, con la matriz de impedancias de barra para cada red de secuencia todas las características de las soluciones con un computador digital para fallas simétricas trifásicas pueden extenderse a fallas asimétricas.

[6]



3.3.6. Cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas de baja tensión.

Según el IEEE Std. 242-1986 [10], solamente se requiere calcular los valores máximos de corriente de cortocircuito simétrica para el **primer ciclo** ($\frac{1}{2}$ ciclo), ya que la componente DC decae rápidamente en los sistemas de baja tensión debido a que X/R es muy baja.

El punto de partida es la preparación de un diagrama unifilar con la identificación y datos de los elementos del sistema, tales como generadores, motores, cables, transformadores, red de suministro de energía, equipo de protección y maniobra (interruptores, relés, fusibles), etc.

El próximo paso es determinar, del diagrama unifilar, la localización y tipo de fallas a estudiar, considerando las condiciones más severas de operación como lo son interconexiones cerradas, todas las fuentes de cortocircuito, expansión del sistema a futuro, etc. Las fallas a estudiar son:

- Trifásica (con contacto directo entre los conductores): Es el estudio más común y básico en sistemas de potencia. No es muy frecuente, pero generalmente establecen los valores máximos de corriente de cortocircuito.

- Línea a línea: Las corrientes son aproximadamente un 87% del valor para la falla trifásica.

- Línea a tierra: Las corrientes son usualmente iguales o menores a la corriente trifásica debido a la alta impedancia de retorno por tierra, aunque bajo ciertas condiciones pueda ser mayor en teoría a la de falla trifásica. Sin embargo, las pruebas en sistemas reales demuestran que la corriente de falla a tierra es siempre menor a la trifásica.

- Fallas con arco: No hay contacto directo entre los conductores, la corriente circula a través de un arco eléctrico de alta impedancia y es mucho



menor a la corriente de falla con contacto directo en la misma localización. Estas fallas son muy peligrosas y difíciles de detectar. **La tabla 3.1.** muestra los multiplicadores para estimar los valores de corrientes con arco a partir de las fallas con contacto directo.

Tabla 3.1. Valores mínimos aproximados de corrientes para fallas con arco en por unidad de los valores de falla con contacto directo entre los conductores. [7]

Tipo de Falla	Tensión Nominal del Sistema		
	600 V	480 V	208 V
Trifásica	0.94	0.89	0.12
Línea a Línea	0.85	0.74	0.02
Línea a Tierra	0.40	0.38	0

Posteriormente se debe preparar un diagrama de impedancias dependiendo del tipo de falla a estudiar: si solo se estudiarán las trifásicas, sólo se requiere el diagrama de secuencia positiva; si se estudiarán las fallas asimétricas, se requiere adicionalmente el diagrama de secuencia cero y se asume el diagrama de secuencia negativa igual al de secuencia positiva. Los diagramas deben contener los valores de impedancia (resistencia y reactancia) convertidos a por unidad, la identificación de cada barra y de cada componente del sistema.

Para hacer los diagramas de impedancias se requiere determinar la impedancia de cada uno de los componentes del sistema, para lo cual se recomienda seguir las siguientes consideraciones y simplificaciones:

- Se desprecian las cargas pasivas (impedancia infinita a referencia).



- Las tensiones de las máquinas rotativas y la fuente de suministro de potencia se asumen constantes con un valor igual a la tensión nominal del sistema, con esto no se consideran las corrientes de prefalla, las cuales son despreciables.

- Cómo sólo se necesitan los valores de corrientes cortocircuito para el primer ciclo, se usarán las reactancias subtransitorias de las máquinas rotativas y demás elementos del sistema.

- Los valores de impedancia de los distintos componentes del sistema se obtienen preferiblemente de los datos de placa del fabricante, pero si no se tienen se pueden obtener de tablas que especifican valores aproximados tales como las descritas en el Capítulo IV.

- Se desprecian las impedancias de barras colectoras, interruptores y transformadores de corriente.

- Se desprecia la contribución de motores o grupos de motores de inducción con potencia menor a 50 HP, debido a su poca contribución a la corriente de cortocircuito total (**véase tabla 12 del IEEE Std. 399-1990 en el anexo B**).

-Se asume un valor de 1 por unidad para la impedancia equivalente del sistema exterior (alimentación del sistema que se está estudiando, red pública), suponiendo que las tensiones y potencias de cortocircuito bases son iguales a las tomadas para el análisis, de lo contrario esta impedancia se debe cambiar a las bases del estudio.

Finalmente, a partir de los diagramas, se hacen los cálculos de corriente de cortocircuito, bien sea a mano o con la ayuda de un computador digital. [10]



3.3.7. Potencia de Cortocircuito.

Para sistematizar el cálculo de las corrientes totales de fallo o de cortocircuito se requieren las impedancias de Thevenin entre cada uno de los nodos y el de referencia de cada una de las redes de secuencias, es decir, los elementos diagonales de las correspondientes matrices impedancias de nodo. Para evaluar las corrientes a través de los elementos conectados al fallo, en el nodo K -ésimo nodo por ejemplo, se necesitan, además, unos pocos de los elementos no diagonales Z_{ik} .

Cuando se proyecta el montaje de una industria o de una urbanización, es decir, cuando se requieren ampliaciones del sistema con el propósito de adicionarle una carga importante, generalmente se conecta a la red existente a través de una subestación cercana de acuerdo a su ubicación. Para calcular la capacidad interruptiva de los elementos de protección se necesitan las impedancias de Thevenin entre el nodo que corresponde a dicha subestación en cada una de las redes de secuencias y de referencia. Recuérdese que en estudios de cortocircuito se acostumbra a suponer que antes del fallo el sistema opera en condiciones balanceadas y, por tanto, solamente se presentan corrientes y voltajes en la red de secuencia positiva y en esta secuencia los voltajes de nodo son iguales a un valor de $1.0 \angle 0^\circ$ en tanto por uno.

En vez de suministrar las impedancias de thevenin $Z_{th}^{(0)}$ y $Z_{th}^{(1)}$ las empresas electrificadoras suministran la potencia de cortocircuito monofásica $(MVA)_{SC-1\phi}$ y trifásica $(MVA)_{SC-3\phi}$ en una subestación dada que es el total que suministra el sistema para un fallo solido del mismo tipo en dicha subestación a partir de las cuales se pueden calcular aquellas.



La justificación del algoritmo para obtenerlas se basa en la anterior definición de potencia de cortocircuito, es decir,

$$(MVA)_{SC-30} = \sqrt{3} \cdot V_{L(0)} \cdot I_{SC-30} \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$(MVA)_{SC-10} = V_{P(0)} \cdot I_{SC-10} \quad \text{Ec. 3.9}$$

donde, $V_{L(0)}$ y $V_{P(0)}$ son, respectivamente, el voltaje entre línea y el de fase en el punto de fallo antes de producirse éste, es decir, los voltajes nominales de la subestación. También Ec. 3.8 y Ec. 3.9 I_{SC-30} y I_{SC-10} son las corrientes totales a través del fallo.

Cuando se toman los voltajes base idénticos a los nominales de la subestación, es decir,

$$V_{bL} = V_{L(0)}$$

$$V_b = V_{P(0)} \quad \text{Ec. 3.10}$$

donde, V_{bL} y V_b son, respectivamente, el voltaje base entre líneas y el voltaje base monofásico y recordando que:

$$V_{L(0)} = \sqrt{3} \cdot V_{P(0)} \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$V_{bL} = \sqrt{3} \cdot V_b \quad \text{Ec.}$$

3.12

$$S_{b-30} = 3S_{b-10} = \sqrt{3} \cdot V_{bL} I_{bL} \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$S_{b-10} = V_b I_{bL} \quad \text{Ec. 3.14}$$



Marco Teórico

Dividiendo el primer miembro de la Ec. 3.8 por $S_{b-3\phi}$ y el segundo por su equivalente $\sqrt{3} \cdot V_{bL} I_{bL}$ aplicando la condición Ec. 3.10 se obtiene:

$$\hat{S}_{sc-3\phi} = \frac{(NVA)_{sc-3\phi}}{S_{b-3\phi}} = \frac{\sqrt{3} V_{L(0)} I_{sc-3\phi}}{\sqrt{3} V_{bL} I_{bL}} = \hat{I}_{sc-3\phi} = \frac{1}{\hat{Z}_{th}^{(2)}} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Similarmente dividiendo el primer miembro de la Ec. 3.9 por $S_{b-3\phi}$ y el segundo por su equivalente $\sqrt{3} \cdot V_{bL} I_{bL}$ aplicando la condición Ec. 3.10 se obtiene:

$$\hat{S}_{sc-1\phi} = \frac{(NVA)_{sc-1\phi}}{S_{b-3\phi}} = \frac{V_{p(0)} I_{sc-1\phi}}{\sqrt{3} V_{bL} I_{bL}} = \frac{V_{p(0)} I_{sc-1\phi}}{\sqrt{3} (\sqrt{3} V_b) I_{bL}} = \frac{1}{3} \frac{I_{sc-1\phi}}{I_{bL}} = \frac{1}{3} \hat{I}_{sc-1\phi} \quad \text{Ec. 3.16}$$

donde se ha hecho uso de Ec. 3.13 y se nota que la corriente total a través del fallo monofásico es una corriente de línea de una carga trifásica desbalanceada.

Para el fallo solido monofásico se tiene que:

$$\hat{I}_{sc-1\phi} = 3 I_{sc}^{a0} = 3 \frac{1}{2 \hat{Z}_{th}^{(2)} + \hat{Z}_{th}^{(0)}} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Reemplazando la Ec. 3.17 en la Ec. 3.16 se obtiene:

$$\hat{S}_{sc-1\phi} = \frac{(NVA)_{sc-1\phi}}{S_{b-3\phi}} = \frac{1}{2 \hat{Z}_{th}^{(2)} + \hat{Z}_{th}^{(0)}} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Del análisis anterior se puede extraer el siguiente algoritmo para obtener el las impedancias de Thevenin en tanto por uno a partir de las correspondientes potencia de cortocircuito monofásica y trifásica en una subestación dada:



- Elegir arbitrariamente el valor de la potencia base trifásica $S_{b-3\phi}$. Elegir como voltaje base a los correspondiente a la subestación ver la condición se la Ec. 3.10.

- Definir

$$\bar{S}_{sc-3\phi} = \frac{(MVA)_{sc-3\phi}}{S_{b-3\phi}}$$

$$\bar{S}_{sc-1\phi} = \frac{(MVA)_{sc-1\phi}}{S_{b-3\phi}}$$

Donde $S_{b-3\phi}$ es la potencia base trifásica, elegida arbitrariamente.

- De la Ec. 3.15 se obtiene

$$\bar{Z}_{ch}^{(1)} = \frac{1}{\bar{S}_{sc-3\phi}}$$

- La impedancia de secuencia positiva se obtiene a partir de la Ec. 3.18

$$\frac{1}{\bar{S}_{sc-1\phi}} = \frac{1}{2 \bar{Z}_{ch}^{(1)} + \bar{Z}_{ch}^{(0)}}$$

En la discusión anterior se entiende que tanto $\bar{Z}_{ch}^{(0)}$ como $\bar{Z}_{ch}^{(1)}$ son de naturaleza reactiva. [11]

3.4. Flujo de Carga.

En el área de Ingeniería Eléctrica, uno de los campos más relevantes lo constituye el análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). Los principales tópicos que se desarrollan son: modelación de la máquina sincrónica, regulación de tensión, cálculo de flujos de potencia, operación económica, estabilidad, entre otros.



El objetivo principal de un (SEP) es satisfacer la demanda. Como consecuencia surge el problema de por dónde debe hacerse la alimentación e incluso prever caídas de tensión, regulación de transformadores, inyección de potencia reactiva. [12]

El flujo de potencia consiste en hallar las tensiones nodales en régimen permanente, dada la configuración de un sistema eléctrico y la potencias netas complejas en cada barra del mismo. [13]

Los estudios de flujo de potencia, más normalmente llamados estudios de flujo de carga, son sumamente importantes para evaluar el funcionamiento de los sistemas de distribución, su control y planificación para expansiones futuras. Un estudio de flujo de potencia define principalmente las potencias activa y reactiva y el vector de tensión en cada barra en el sistema.

Los principios en los estudios del flujo de potencia son fáciles, pero un estudio relativo a un sistema de potencia real sólo se puede llevar a cabo con un ordenador digital. Entonces la necesidad sistemática de cálculos numéricos requiere que se ejecuten por medio de un procedimiento iterativo; dos de los normalmente más usados son el método Gauss-Seidel y el método Newton-Raphson. [12]

En la literatura del ramo existen muchísimos métodos y con herramientas computacionales para resolver el problema de flujo de carga en sistemas eléctricos. En orden de clásica importancia se pueden mencionar los siguientes: El Método de Gauss-Seidel, El Método de Newton-Raphson, El Newton Raphson Desacoplado con Jacobianos Constantes.

El Método de gauss- Seidel destaca por su simplicidad, pero se ve aquejado por el elevado número de iteraciones requeridas. Esta dificultad



trata de ser prevenida, por una variante llamada método de la matriz de impedancia nodal.

El Método de newton-Raphson es un método fundamentado sobre sólidas bases matemáticas, que vino a popularizarse en la década de los años setenta, cuando la disponibilidad de los computadores y las técnicas de manejo matricial, adquieren auge.

El Método del newton-Raphson desacoplado trata de reducir el tiempo de procesamiento del tradicional newton-Raphson, pero perdiendo confiabilidad en su tasa de convergencia.

El Método de newton-Raphson desacoplado con jacobiano constantes es la mejor opción disponible a la fecha, aun cuando todavía presenta ciertos bemoles en su convergencia.

3.4.1. Inyección de Corriente.

Se ha hablado de que la inyección fundamental en la barra es su inyección de corriente. Cuando se habla de inyección nodal debe entenderse inyección nodal neta. La palabra neta significa generación local menos carga local. En la práctica la generación y las cargas de un sistemas eléctrico se definen en MVA, MW y MVAR en lugar de amperios y voltios.

Atendiendo a la identificación de los consumos mediante unidades de potencia eléctrica, en la nomenclatura tradicional de los sistemas de potencia se distinguen tres tipos de nodos:

Los nodos PQ, también llamados nodos de carga, son aquellos donde se especifican las Z inyecciones netas de potencias activas y reactivas P neta Q neta. Estos nodos son los más abundantes en un sistema de potencia pudiendo comprender más de un 90% del conjunto de nodos. Por cierto, considerando que cargas reales y generaciones existen en muy pocos nodos, es muy común que la inyección neta comprenda P y Q nulos.



Al ser P y Q datos, que quedan como incógnitas en estos nodos las cantidades V (modulo de la tensión) y θ (ángulo de la tensión nodal), los cuales se miden con respecto a la referencia (puntos neutros) de tensiones.

Nodos PV, En estos nodos se especifican como datos la inyección neta activa P y la magnitud (modulo) de la tensión nodal V, permaneciendo como incógnitas las dos restantes cantidades Q y θ .

Estos nodos tradicionalmente están ligados a puntos de generación activa, por lo cual también se conocen como nodos de generación. Se destaca que al especificar como dato el modulo V, significa que hay algún control de tensión actuando con precisión, que permite asegurar que el valor numérico predefinido se va a mantener por lo menos para el instante de tiempo al cual pertenecen el resto de los datos.

La manera típica de mantener un control de voltaje es mediante de la manipulación de la potencia reactiva inyectada, lo cual, en un generador sincrónico se hace ajustando adecuadamente la corriente de excitación.

El nodo de referencia, ha sido ya justificado por dos razones:

Porque existen problemas de inestabilidad numérica en los cálculos digitales, causando problemas de redondeo que puedan conducir a la divergencia matemática.

Porque en los sistemas de potencia es imposible conocer antes del resultado del flujo de carga, las pérdidas de potencias complejas en el Sistema de transmisión, por lo cual se seleccionara un nodo de generación para suministrar el total de dichas pérdidas, permaneciendo exclusivamente como datos del modulo V y el ángulo θ de dicho modulo. [13]

3.4.2. Métodos para la obtención del Flujo de Carga.

- Gauss-seidel.



➤ Newton-Raphson.

3.4.2.1. Método de Gauss-Seidel.

Sea la matriz

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Entonces A tiene diagonal estrictamente dominante si en cada renglón el valor absoluto del elemento diagonal es mayor que la suma de los valores absolutos de los elementos fuera de la diagonal.

$$|a_{ii}| > |a_{i1}| + |a_{i2}| + \dots + |a_{i,i-1}| + |a_{i,i+1}| + \dots + |a_{in}| = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}| \quad \text{Ec. 3.20}$$

Para $i = 1, 2, \dots, n$

Teorema

Considerar un sistema de n ecuaciones con n incógnitas, es decir se tiene una matriz de coeficientes A cuadrada. Si el valor absoluto del elemento de la diagonal de cada renglón de A es más grande que la suma de los valores absolutos de los otros elementos de tal renglón entonces el sistema tiene una solución única. Los métodos iterativos de Jacobi y de Gauss-Seidel convergerán a la solución sin importar los valores iniciales.



3.4.2.2. Limitaciones Del Método De Gauss-Seidel.

La eliminación Gaussiana es un método finito y puede ser usado para resolver cualquier sistema de ecuaciones. El método de Gauss-Seidel converge solo para sistemas de ecuaciones especiales.

3.4.2.3. Eficiencia Del Método De Gauss-Seidel.

La eficiencia de un método es una función del número de operaciones aritméticas (suma, resta, multiplicación y división) involucradas en cada método. Para un sistema de n ecuaciones con n incógnitas, donde la solución es única. La eliminación Gaussiana involucra $(4n^3 + 9n^2 - 7n)/6$ operaciones aritméticas. El método de Gauss-Seidel requiere $2n^2 - n$ operaciones aritméticas por iteración. Para valores grandes de n la eliminación Gaussiana requiere aproximadamente $2n^3/3$ operaciones aritméticas para resolver el problema, mientras que Gauss-Seidel requiere aproximadamente $2n^2$ operaciones aritméticas por iteración. Por lo tanto si el número de iteraciones es menor o igual que $n/3$, el método iterativo requiere pocas operaciones aritméticas.

3.4.3. Método de Newton-Raphson.

Este método consiste de proporcionar un X_i inicial de aproximación a la raíz analítica r en seguida se evalúa la función en X_i obteniendo se $f(X_i)$ se traza una recta tangente que intercepta en X_{i+1} al eje de las X . A este punto se le llama raíz nueva de aproximación a la r .

Algoritmo:

- 1) Dada una función $f(X)=0$ Obtener la Primera y Segunda derivada.
- 2) Elegir un valor inicial X_0 . Este valor inicial debe cumplir con el criterio de convergencia:
- 3) Obtener una nueva aproximación evaluando la formula general del método ($X_{n+1}=X_n - f(X_n)/f'(X_n)$).



4) Evaluar la aproximación relativa ($| (X_{n+1} - X_n) / X_{n+1} | < \text{Tolerancia}$).

Tenemos la fórmula de Newton-Raphson. Además, existe un estudio de la convergencia del método, en donde $G(x)$ se acota, teniendo la fórmula de convergencia como:

$$f(\varphi) = f(x_0) + f'(x_0)(\varphi - x_0) = 0 \quad \text{Ec. 3.21}$$

Cabe señalar que el método de Newton-Raphson es convergente en forma cuadrática, es decir, que el número de cifras decimales correctos se duplica aproximadamente en cada iteración, o el error es aproximadamente proporcional al cuadrado del error anterior.

La ventaja de este método es que, al ser un método iterativo, éste entrega una sucesión, resoluciones aproximadas, convergiendo más rápidamente al valor buscado y se usan menos operaciones aritméticas. [14]

3.5. Compensación de Reactivos.

El factor de potencia se define como el cociente de la relación de la potencia activa entre la potencia aparente; esto es:

$$FP = \frac{P}{S} \quad \text{Ec. 3.21}$$

Comúnmente, el factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo, El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo; Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

Existen distintos tipos de potencias, las cuales son:

La potencia efectiva o real, es la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo, su unidad es WATT y su símbolo es la letra P.



La potencia reactiva, es la encargada de generar el campo magnético que requieren para su funcionamiento los equipos inductivos como los motores y transformadores su unidad es VAR y su símbolo es la letra Q.

La potencia aparente, es la suma geométrica de las potencias efectiva y reactiva (**figura 3.8.**); es decir:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{Ec. 3.22}$$

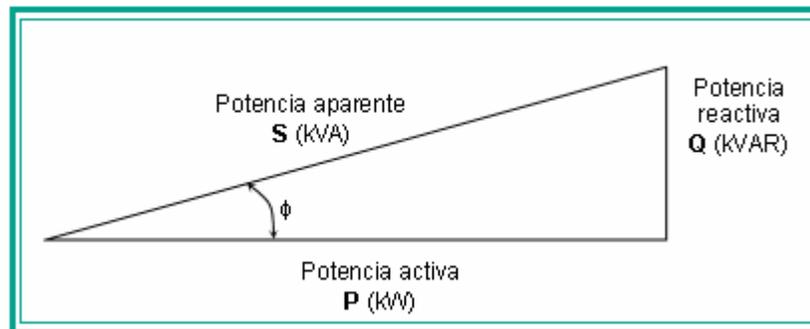


Figura 3.8. Triángulo de potencias electricas [15]

De este triángulo se obtienen las siguientes expresiones:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad \text{Ec. 3.23}$$

$$\tan \phi = \frac{Q}{P} \quad \text{Ec. 3.24}$$

Las cargas inductivas que se encuentran en una industria, además de requerir potencia activa, demandan un suministro de potencia reactiva para su funcionamiento, lo cual, como vimos en capítulos anteriores, ocasiona un bajo factor de potencia.



Sin embargo, la demanda de potencia reactiva se puede reducir mediante la conexión de capacitores en paralelo con la carga de bajo factor de potencia. Dependiendo de la cantidad de reactivos que entregan los capacitores, se reduce parcial o totalmente la potencia reactiva tomada de la red eléctrica, en consecuencia aumenta el FP. A este proceso se le denomina compensación del factor de potencia (**figura 3.9.**).

Una cuestión importante, es determinar el valor de la potencia reactiva del capacitor que se necesita para la compensación del factor de potencia.

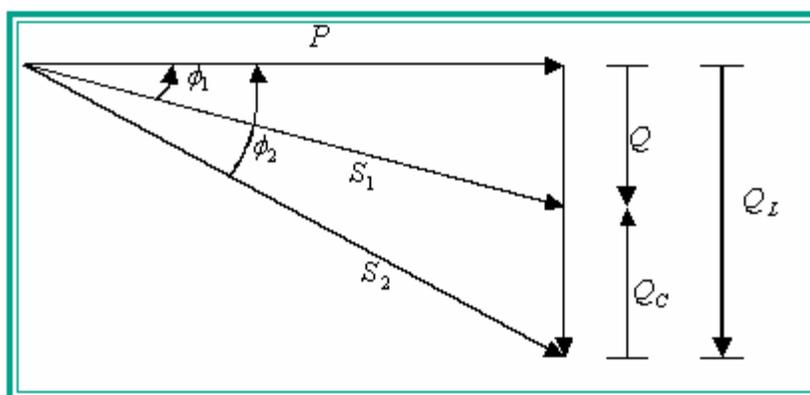


Figura 3.9. Representación gráfica de la compensación del factor de potencia [15]

Donde:

Q_L es la demanda de reactivos de un motor y S_2 la potencia aparente correspondiente.

Q_C es el suministro de reactivos del capacitor de compensación.

La compensación de reactivos no afecta el consumo de potencia activa, por lo que P es constante



Marco Teórico

Como efecto del empleo de los capacitores, el valor del ángulo ϕ_2 se reduce a ϕ_1 , del mismo modo, la potencia aparente S_2 también disminuye, tomando el valor de S_1 .

Finalmente, al disminuir la demanda de reactivos, se incrementa el factor de potencia ($\text{Cos } \phi_1 > \text{Cos } \phi_2$).

Problemas técnicos generados por bajo factor de potencia:

- Mayor consumo de corriente.
- Aumento de las pérdidas en conductores.
- Sobrecarga de transformadores, generadores y líneas de distribución.
- Incremento de las caídas de voltaje.
- Problemas económicos generados por bajo factor de potencia:

- Incremento de la facturación eléctrica por mayor consumo de corriente.

- Penalización de hasta un 120 % del costo de la facturación.
- Beneficios técnicos en los equipos por mejorar el factor de potencia:
- Disminución de las pérdidas en conductores.
- Reducción de las caídas de tensión.

- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.

- Incremento de la vida útil de las instalaciones.

Beneficios económicos:

- Reducción de los costos por facturación eléctrica.
- Eliminación del cargo por bajo factor de potencia.



- Bonificación de hasta un 2.5 % de la facturación cuando se tenga factor de potencia mayor a 0.9

Métodos para compensar el FP, La finalidad de corregir el factor de potencia es reducir o aún eliminar el costo de energía reactiva en la factura de electricidad. Para lograr esto, es necesario distribuir las unidades capacitivas, dependiendo de su utilización, en el lado del usuario del medidor de potencia.

Existen varios métodos para corregir o mejorar el factor de potencia, entre los que destacan la instalación de capacitores eléctricos o bien, la aplicación de motores sincrónicos que finalmente actúan como capacitores.

3.5.1. Tipos de Compensación de Reactivos.

Los condensadores pueden estar en tres niveles o configurados de tres formas, de manera tal que dependiendo de la configuración, cada una tiene ventajas y desventajas. Las configuraciones para la compensación de reactivos más utilizadas son:

3.5.1.1 Compensación Global.

Este tipo de configuración se basa en colocar los condensadores a la salida de la fuente que suministra la energía, suprimiendo las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva, ajustando la necesidad real de la instalación a KW al contrato de la potencia aparente **(figura 3.10.)**. [15]

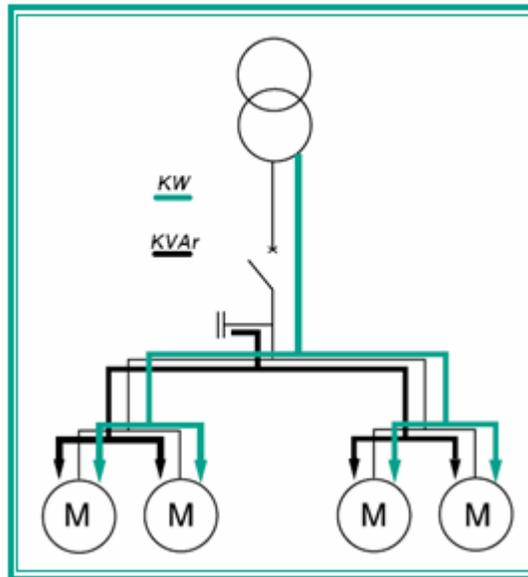


Figura 3.10. Compensación Global. [16]

3.5.1.2. Compensación parcial o en grupo.

Es aconsejable compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas, cuando éstas se conectan simultáneamente y demandan potencia reactiva constante, o bien cuando se tienen diversos grupos de cargas situados en puntos distintos (figura 3.11.) [15]

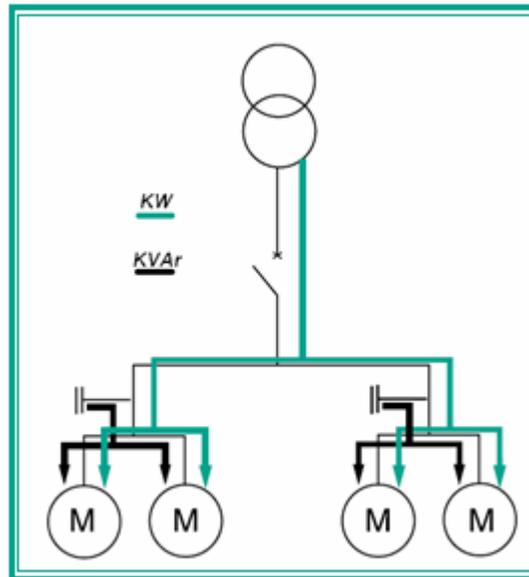


Figura 3.11. Compensación Parcial o en Grupo. [16]

3.5.1.3. Compensación individual.

La compensación individual se refiere a que cada consumidor de potencia inductiva se le asigna un capacitor que suministre potencia reactiva para su compensación. La compensación individual es empleada principalmente en equipos que tienen una operación continua y cuyo consumo inductivo es representativo (**figura 3.12.**). [15]

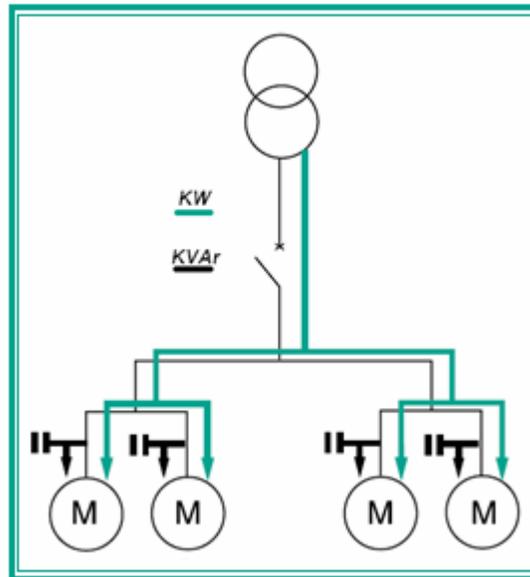


Figura 3.12. Compensación Individual. [16]

3.5.1.4. Compensación central con banco automático.

Este tipo de compensación ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia ya que la potencia total del banco de capacitores se instala en la acometida, cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales, suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación.

La potencia total del banco de capacitores se divide en varios bloques que están conectados a un regulador automático de energía reactiva, que conecta y desconecta los bloques que sean necesarios para obtener el factor de potencia previamente programado en dicho regulador.



3.5.1.5. Compensación combinada.

La compensación mixta o combinada de potencia reactiva, se refiere a la combinación de dos o más métodos para corregir el factor de potencia. [15]

3.5.2. Métodos para el cálculo de la energía reactiva necesaria para realizar la compensación.

Hoy en día existen varios métodos para realizar el cálculo de la capacidad de la batería de condensadores, para compensar la demanda de reactivos de un sistema y así corregir el factor de potencia trayendo consigo muchas ventajas. Los cálculos varían dependiendo de la operación del sistema y las necesidades presentes para realizar la compensación. A continuación se presentan unas series de cálculos de la potencia reactiva dependiendo de datos conocidos:

3.5.2.1. A través del recibo es de la compañía eléctrica.

El cálculo de la potencia a través del recibo es solamente un método aproximado pero muy práctico para el cálculo de baterías. Generalmente proporciona resultados aceptables, pero en el caso que existan regímenes de funcionamiento muy dispares o no se conozcan las horas de funcionamiento, los resultados pueden ser insatisfactorios.

Partiendo de los datos obtenidos del recibo encontramos:

La energía activa total en KWh y la energía reactiva total en KVAh calculamos la $Tg\theta$ siendo el inverso del factor de potencia en la cual está operando el sistema antes de la compensación.

$$Tg\theta_1 = \frac{KVARh}{KWh} \quad \text{Ec. 3.25}$$



Donde $Tg\theta_1$ representa el factor de potencia actual antes de la corrección.

Luego se calcula $Tg\theta_2$ que representa el factor de potencia al cual se quiere corregir el actual:

$$Tg\theta_2 = Tg(\cos^{-1}\theta_2) \quad \text{Ec. 3.26}$$

Donde $\cos^{-1}\theta_2$ representa la función inversa del factor de potencia deseado. Entonces mediante la siguiente expresión calculamos los KVAR necesarios para realizar la corrección del factor de potencia:

$$Q = \frac{KWh}{T} (Tg\theta_1 - Tg\theta_2) \quad \text{Ec. 3.27}$$

Donde T es la cantidad de horas de trabajo en el tiempo de medición.

3.5.2.2. A partir de la potencia en kW y del Cos θ de la instalación.

La **tabla 3.2.** nos da, en función del $\cos\theta$ de la instalación antes y después de la compensación, un coeficiente a multiplicar por la potencia activa para encontrar la potencia de la batería de condensadores a instalar.

En la **tabla 3.2.** se aprecia un ejemplo para seleccionar el factor de corrección para corregir un factor de potencia de 0.70 a 0.95, el factor con el cual se multiplica la potencia en kW será por 0.6915 obteniendo la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.

$$Q_{necesarios} = P_{kW} \cdot (\text{factor de correccion}) \quad \text{Ec. 3.28}$$



Tabla 3.2. Factor de multiplicación en función del $\cos \theta$ antes y después de la corrección. [16]

Por Corregir	Potencia del condensador en KVAR a instalar por KW de carga para elevar el factor de potencia ($\cos \phi$) a:								
$\cos \phi$	0.87	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
0.55	0.9518	1.0342	1.0629	1.0925	1.1233	1.1555	1.1898	1.2268	1.2679
0.56	0.9127	0.9951	1.0238	1.0535	1.0842	1.1165	1.1508	1.1878	1.2288
0.57	0.8748	0.9572	0.9859	1.0155	1.0463	1.0785	1.1128	1.1498	1.1909
0.58	0.8378	0.9202	0.9489	0.9785	1.0093	1.0416	1.0758	1.1128	1.1539
0.59	0.8018	0.8842	0.9129	0.9425	0.9733	1.0055	1.0398	1.0768	1.1179
0.60	0.7666	0.8490	0.8777	0.9073	0.9381	0.9704	1.0046	1.0417	1.0827
0.61	0.7323	0.8147	0.8434	0.8730	0.9038	0.9361	0.9703	1.0074	1.0484
0.62	0.6988	0.7812	0.8099	0.8395	0.8703	0.9025	0.9368	0.9738	1.0149
0.63	0.6660	0.7484	0.7771	0.8067	0.8375	0.8697	0.9040	0.9410	0.9821
0.64	0.6339	0.7163	0.7450	0.7746	0.8054	0.8376	0.8719	0.9089	0.9500
0.65	0.6024	0.6848	0.7135	0.7431	0.7739	0.8062	0.8404	0.8775	0.9185
0.66	0.5716	0.6540	0.6827	0.7123	0.7431	0.7753	0.8096	0.8466	0.8877
0.67	0.5413	0.6237	0.6524	0.6820	0.7128	0.7451	0.7793	0.8163	0.8574
0.68	0.5115	0.5939	0.6226	0.6523	0.6830	0.7153	0.7496	0.7866	0.8276
0.69	0.4823	0.5647	0.5934	0.6230	0.6538	0.6860	0.7203	0.7573	0.7984
0.70	0.4535	0.5359	0.5646	0.5942	0.6250	0.6573	0.6915	0.7285	0.7696
0.71	0.4251	0.5075	0.5362	0.5658	0.5966	0.6289	0.6631	0.7002	0.7412
0.72	0.3971	0.4795	0.5082	0.5379	0.5686	0.6009	0.6352	0.6722	0.7132
0.73	0.3695	0.4519	0.4806	0.5102	0.5410	0.5733	0.6075	0.6446	0.6856
0.74	0.3422	0.4246	0.4533	0.4829	0.5137	0.5460	0.5802	0.6173	0.6583
0.75	0.3152	0.3976	0.4263	0.4559	0.4867	0.5190	0.5532	0.5903	0.6313
0.76	0.2884	0.3708	0.3995	0.4292	0.4600	0.4922	0.5265	0.5635	0.6045
0.77	0.2619	0.3443	0.3730	0.4026	0.4334	0.4657	0.4999	0.5370	0.5780
0.78	0.2356	0.3180	0.3467	0.3763	0.4071	0.4393	0.4736	0.5106	0.5517
0.79	0.2094	0.2918	0.3205	0.3501	0.3809	0.4131	0.4474	0.4844	0.5255
0.80	0.1833	0.2657	0.2944	0.3240	0.3548	0.3870	0.4213	0.4583	0.4994
0.81	0.1573	0.2397	0.2684	0.2980	0.3288	0.3610	0.3953	0.4323	0.4734
0.82	0.1313	0.2137	0.2424	0.2720	0.3028	0.3351	0.3693	0.4063	0.4474
0.83	0.1053	0.1877	0.2164	0.2460	0.2768	0.3091	0.3433	0.3803	0.4214
0.84	0.0792	0.1616	0.1903	0.2199	0.2507	0.2830	0.3173	0.3543	0.3953
0.85	0.0530	0.1354	0.1641	0.1937	0.2245	0.2568	0.2911	0.3281	0.3691



3.5.3. Compensación Fija y Automática.

Cuando tenemos calculada la potencia reactiva necesaria para realizar la compensación, se nos presenta la posibilidad de elegir entre una compensación fija y una compensación automática.

3.5.3.1. Compensación Fija.

Es aquella en la que suministramos a la instalación, de manera constante, la misma potencia reactiva.

Debe utilizarse cuando se necesite compensar una instalación donde la demanda reactiva sea constante. Es recomendable en aquellas instalaciones en las que la potencia reactiva a compensar no supere el 15% de la potencia nominal del transformador (S_n).

3.5.3.2. Compensación Variable o Automática.

Es aquella en la que suministramos la potencia reactiva según las necesidades de la instalación.

Debe utilizarse cuando nos encontremos ante una instalación donde la demanda de reactiva sea variable. Es recomendable en las instalaciones donde la potencia reactiva a compensar supere el 15% de la potencia nominal del transformador (S_n). [16]



Marco Teórico



Descripción del Sistema bajo Estudio

CAPITULO IV DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO

4.1. Antecedentes.

La red de transmisión Sur de CADAFE es una red a 115 kV supervisada sólo localmente, alimentada desde la S/E San Gerónimo 400/115 kV, cuya longitud alcanza 538 km desde la S/E San Gerónimo hasta la S/E Puerto Ayacucho. Las principales cargas de esta red son S/E Puerto Ayacucho, la cual es residencial y comercial y la **S/E Los Pijiguaos**, en la cual se tienen algunos circuitos de carga residencial (Campamento y Pijimori) y algunos circuitos de carga industrial variable que conforman la operadora de Bauxita en Los Pijiguaos (Mina y Pie de Cerro). Esta red posee para el control de tensiones un reactor de 10 MVAR en la S/E Cabruta 115 kV, dos reactores de 10 MVAR en la S/E Los Pijiguaos 115 kV y dos bancos de condensadores de 6 MVAR en la S/E Puerto Ayacucho 13.8 kV.

Adicionalmente, para el control de tensiones en esta red, se dispone de reguladores de tensión automáticos en los transformadores 115/13.8 kV de la S/E Los Pijiguaos y la S/E Puerto Ayacucho. El controlador automático de tensión de los transformadores de la S/E Los Pijiguaos permite mantener la tensión en $14.43 \text{ kV} \pm 1\%$ (1.03 p.u – 1.06 p.u). El controlador automático de tensión de los transformadores de la S/E Puerto Ayacucho no está operativo.

4.2. Subestación Eléctrica Los Pijiguaos.

La subestación está conformada por dos transformadores de potencia de iguales características (**ver tabla 4.1**), estos están conectados en configuración estrella – estrella con el neutro sólidamente aterrado. La subestación pertenece al sistema de transmisión sur y recibe la alimentación a través de una línea de transmisión de doble terna, que viene desde la subestación Cabruta, con un nivel de tensión de 115 kV y aislada a 230 kV.



Descripción del Sistema bajo Estudio

Tabla 4.1. Placa del Transformador S/E Los Pijiguaos.

Transformador S/E Los Pijiguaos	
Marca	Pauwels trafo Belgium
Tipo	ORF 20/230
Nº	88.2.4034
Potencia Nominal	16/20 MVA
Frecuencia	60 Hz
Enfriamiento	ONAN/ONAF
Fases	3
Calentamiento del Cobre	55 °C
Grupo	YnYn0
Normas	IEC 76/1976
Relación	(115/13.8) kV
Servicio	Continuo
Fabricación	1988
Icc	10*In
Tiempo de Cortocircuito	2 Seg
Aislamiento	A.T = 550/230 kV

Las mediciones realizadas por la empresa EDELCA filial de CORPOELEC, abarcaron la medición de la tensión de la S/E Los Pijiguaos de 115 kV durante un lapso de 39 días, de esta medición se corroboró que dicha tensión presenta problemas de calidad al variar ésta dentro del rango comprendido entre 102 kV y 127 kV.



Descripción del Sistema bajo Estudio

Las excursiones de tensión registradas mayores a 125 kV son poco frecuentes permaneciendo la tensión alta la mayor parte del tiempo entre 120 kV y 125 kV. Por su parte, la tensión mínima permanece la mayor parte del tiempo entre 105 kV y 110 kV. Estos valores superan los rangos recomendados de operación entre 109 y 121 kV equivalente $\pm 5\%$ con respecto a la tensión nominal.

Es conveniente denotar que el registrador colocado por EDELCA no tenía una tasa de muestreo en el tiempo que le permitiera medir variaciones rápidas de la tensión.

La barra de salida de 13.8 kV, está protegida por un interruptor de potencia ubicado entre la salida de los transformadores y dicha barra (**Ver tabla 4.2.**). Esta barra de salida está dividida para que cada transformador llegue a una barra independiente, las dos barras de salida están enlazadas por medio de un interruptor de potencia el cual posee las mismas características del interruptor de entrada a las barras.



Descripción del Sistema bajo Estudio

Tabla 4.2. Interruptor de Potencia de entrada a la Barra de 13.8 kV.

<i>Interruptor de Potencia Subestacion Los Pijiguaos</i>		
<i>Marca: ABB</i>	<i>IEC - 56.1</i>	<i>Nº: MB015743</i>
<i>Tipo: SFAS/6</i>		<i>Masa: 205 kg.</i>
<i>Intensidad Nominal en Servicio Continuo: 1600 Amperios</i>		
<i>Frecuencia: 50/60 Hz</i>	<i>Tensión: 17.5 kV</i>	
<i>Intensidad Nominal en Servicio durante 3 seg: 23 kA</i>		
<i>Tensión Soportada al Impulso ATM: 95 kV</i>		
<i>Tensión de cierre: 55 ms</i>	<i>Tiempo de Apertura 70 ms</i>	
<i>A la Tensión de 17.5 kV</i>		
<i>Poder de Corte: 20 kA</i>	<i>Poder de Cierre: 50 kA</i>	

La barra correspondiente al transformador 1, alimenta a los circuitos de Pie de Cerro, La Mina, Pijiguaos y un circuito de reserva, mientras que la barra que corresponde al transformador 2, alimenta a los circuitos Campamento, Pijimori y tres circuitos de reserva. Todos los circuitos de salida poseen interruptores de protección de iguales características, (**Ver tabla 4.3.**).



Descripción del Sistema bajo Estudio

Tabla 4.3. Interruptor de Potencia de cada uno de los Circuitos de salida de la S/E Los Pijiguaos.

<i>Interruptor de Potencia Subestacion Los Pijiguaos</i>		
<i>Marca: ABB</i>	<i>IEC - 56.1</i>	<i>Nº: MB00694</i>
<i>Tipo: SFAS/6</i>		<i>Masa: 208 kg.</i>
<i>Intensidad Nominal en Servicio Continuo: 630 Amperios</i>		
<i>Frecuencia: 50 / 60 Hz</i>		<i>Tensión: 17.5 kV</i>
<i>Intensidad Nominal en Servicio durante 3 seg: 23 kA</i>		
<i>Tensión de cierre: 60 ms</i>	<i>Tiempo de Apertura 70 ms</i>	
<i>A la Tensión de 17.5 kV</i>		
<i>Poder de Corte: 20 kA</i>	<i>Poder de Cierre: 50 kA</i>	

4.3 Sistema de Distribución del Área de Producción Pie de Cerro.

El Circuito eléctrico Pie de Cerro es alimentado desde la S/E Los Pijiguaos a través de un transformador de potencia de 20 MVA y relación de transformación de 115 / 13.8 kV, entregándole al circuito un nivel de voltaje a la salida de 14.4 kV y Potencia de Cortocircuito en la barra de 13.8 kV de la subestación de 107 MVA Trifásico y 47 MVA monofásico datos suministrados por la empresa EDELCA (**anexo C**).

Este Circuito se caracteriza por poseer un esquema de distribución radial, constituido por cincuenta y dos (52) postes y tres (03) estructuras de 35 ft de altura, siendo el tendido eléctrico una doble terna con conductor Arvidal # 4/0 (**tabla 4.4.**), con una longitud del troncal principal de 2.93 Km, con ocho (08) derivaciones y dos (02) subestaciones eléctricas identificadas en la empresa como S/E 05UB01 y S/E 05UB02.



Descripción del Sistema bajo Estudio

Tabla 4.4. Parámetros Eléctricos del Conductor.

<i>Parámetros Eléctricos del Conductor</i>						
Calibre	$R^+ (\Omega/KM)$	$X^+ (\Omega/KM)$	$B^+ [(1/\Omega)/KM]$	$R^o (\Omega/KM)$	$X^o (\Omega/KM)$	$B^o [(1/\Omega)/KM]$
ARV. # 4/0	0.26764	0.41572	$0.3954 \cdot 10^{-3}$	0.44405	0.21098	$0.1657 \cdot 10^{-3}$

La línea de transmisión está conformada por postes de paso y amarre con las siguientes características:

- Poste Tubular de acero de 13.7 metros.
- Crucetas dobles H.G de 2.44 metros.
- Pletinas de 71 centímetros.
- Aisladores de espigas.
- Palillos.
- Abrazaderas 4T-7-7 ½”.
- Barra de tierra copperweld.
- Fundación sencilla $R_c = 150 \text{ kg/m}^2$.
- Conector de tierra a poste.

El Circuito eléctrico actualmente opera a un factor de potencia (f.p) igual a 0.75, encontrándose a lo largo del circuito puntos de transformación de diferentes capacidades para la alimentación de distintas zonas dentro del área de Pie de Cerro como son: Almacenes, talleres, plantas de tratamiento, medicatura, vestuarios, oficinas y alumbrado exterior, etc (**tabla 4.5.**).



Descripción del Sistema bajo Estudio

Tabla 4.5. Transformadores de Distribución de Pie de Cerro.

Transformadores de Distribución en Pie de Cerro			
Carga	Capacidad (KVA)	Conexión	Impedancia (%)
Alumbrado	1 x 10	Δ - Y_0	1.9
Alumbrado	1 x 10	Δ - Y_0	1.9
Alumbrado	1 x 10	Δ - Y_0	1.9
Almacén	3 x 25	Δ - Y_0	2.1
Almacén	3 x 25	Δ - Y_0	2.1
Alumbrado	1 x 10	Δ - Y_0	1.9
Taller Vía Ferrea	3 x 50	Δ - Y_0	1.8
Taller Central	3 x 50	Δ - Y_0	1.8
Taller Central	3 x 167	Δ - Y_0	2
Servicio de Agua	3 x 75	Δ - Y_0	2
Alumbrado	1 x 10	Δ - Y_0	1.9
Servicio Especial	3 x 37.5	Δ - Y_0	2
S/E Gasoil	3 x 25	Δ - Y_0	2.1
Comedor	3 x 10	Δ - Y_0	1.9
Alumbrado	1 x 10	Δ - Y_0	1.9
Edif. Gerencia	3 x 37.5	Δ - Y_0	2
Servicio Especial	3 x 37.5	Δ - Y_0	2

4.3.1. Subestación 05UB01.

Esta subestación es alimentada a través de una derivación en doble terna de la línea de 13.8 kV que supe de energía al área de Pie de Cerro.

Está constituida por dos (02) transformadores principales de potencia, identificados en la empresa como Transformador 01BFT01 y 01BFT02, cuyas capacidades fueron especificadas con base a la estimación de las cargas que se iban a conectar en ella. Estos transformadores tienen una relación de transformación de 13.8 / 0.48 kV, conexión delta-estrella y una capacidad nominal de 1.5 MVA cada uno.



Descripción del Sistema bajo Estudio

Ambos transformadores de potencia sirve, en operación normal, el grupo de carga que le fue asignado. En la **tabla 4.6.** se listan las cargas pertenecientes a cada transformador.

Tabla 4.6. Distribución de carga de los transformadores de potencia de la S/E 05UB01.

<i>Transformador 01BFT01</i>	
CV 5.06-1	160 Kw
L.FCV 5.06-1	0.3 Kw
CV 5.06-2	160 Kw
L.FCV 5.06-2	0.3 Kw
CV 5.14-1	160 Kw
L.FCV 5.14-1	0.3 Kw
CV 5.14-2	160 Kw
L.FCV 5.14-2	0.3 Kw
<i>Transformador 01BFT02</i>	
CV 5.10-1	160 Kw
L.FCV 5.10-1	0.3 Kw
CV 5.10-2	160 Kw
L.FCV 5.10-2	0.3 Kw
CV 5.11-1	160 Kw
L.FCV 5.11-1	0.3 Kw
CV 5.11-2	160 Kw
L.FCV 5.11-2	0.3 Kw

Todas estas cargas de alimentan de la barra de 0.48 kV perteneciente a cada transformador. La conexión de cada motor a la barra se hace por medio de interruptores de baja tensión con corriente nominal de 4 y 400 A para los levanta frenos y las cintas transportadoras respectivamente. Las barras y las salidas de los circuitos se encuentran en celdas, una en 13.8 kV y otra en 0.48 kV, que están instalados dentro del área física de la



Descripción del Sistema bajo Estudio

subestación 05UB01. En este grupo de paneles también se ubican las unidades de medida, control, protección y maniobras de los circuitos asociados a esta subestación.

También en la barra de 13.8 kV de la subestación 05UB01 se encuentra conectados dos (02) transformadores de 0.4 MVA, adicionales a los transformadores de potencia de 1.5 MVA ya antes mencionados. Estos transformadores suplen de energía a los dos apiladores del sistema de producción de Pie de Cerro identificados en la empresa como ST 5.03 y ST 5.05, cada uno de estos equipos poseen en su estructura una cabina de media tensión la cual está compuesta por un transformador en seco de 400 kVA en conexión delta-estrella con una relación de 13.8 kV a 0.48 kV, del lado de baja tensión este transformador alimenta una serie de motores y dispositivos que permiten el funcionamiento de dicho equipo. **(Ver tabla 4.7.)**



Descripción del Sistema bajo Estudio

Tabla 4.7. Carga asociada a los Transformadores de los Apiladores ST 5.03 y 5.05.

Carga del Transformador del ST 5.03	
Mec. Traslación 8*5.5 Kw	Mec. Traslación 8*5.5 Kw
Mec. giro de brazo 2*4 Kw	Mec. giro de brazo 2*4 Kw
L.F Mec. giro de brazo 2*0.2 Kw	L.F Mec. giro de brazo 2*0.2 Kw
Mec. Levanta Brazo 2*19.2 Kw	Mec. Levanta Brazo 2*19.2 Kw
L.F Mec. Levanta Brazo 0.12 Kw	L.F Mec. Levanta Brazo 0.12 Kw
Correa de Brazo 132 Kw	Correa de Brazo 132 Kw
L.F Correa de Brazo 0.33 Kw	L.F Correa de Brazo 0.33 Kw
Sist. Lubricación 0.25 Kw	Sist. Lubricación 0.25 Kw
Vent. Sala Tx 0.55 Kw	Vent. Sala Tx 0.55 Kw
Cable de Potencia 2.2 Kw	Cable de Potencia 2.2 Kw
Vent. Cable de Potencia 0.18 Kw	Vent. Cable de Potencia 0.18 Kw
Cable de Control 1.7 Kw	Cable de Control 1.7 Kw
Vent. Cable de Control 0.18 Kw	Vent. Cable de Control 0.18 Kw

Carga del Transformador del ST 5.05	
Mec. Traslación 8*5.5 Kw	Mec. Traslación 8*5.5 Kw
Mec. giro de brazo 2*4 Kw	Mec. giro de brazo 2*4 Kw
L.F Mec. giro de brazo 2*0.2 Kw	L.F Mec. giro de brazo 2*0.2 Kw
Mec. Levanta Brazo 2*19.2 Kw	Mec. Levanta Brazo 2*19.2 Kw
L.F Mec. Levanta Brazo 0.12 Kw	L.F Mec. Levanta Brazo 0.12 Kw
Correa de Brazo 132 Kw	Correa de Brazo 132 Kw
L.F Correa de Brazo 0.33 Kw	L.F Correa de Brazo 0.33 Kw
Sist. Lubricación 0.25 Kw	Sist. Lubricación 0.25 Kw
Vent. Sala Tx 0.55 Kw	Vent. Sala Tx 0.55 Kw
Cable de Potencia 2.2 Kw	Cable de Potencia 2.2 Kw
Vent. Cable de Potencia 0.18 Kw	Vent. Cable de Potencia 0.18 Kw
Cable de Control 1.7 Kw	Cable de Control 1.7 Kw
Vent. Cable de Control 0.18 Kw	Vent. Cable de Control 0.18 Kw

4.3.2. Subestación 05UB02.

Esta subestación al igual que la 05UB01, está alimentada a través de una derivación del troncal principal del circuito en doble terna que atraviesa toda el área de Pie de Cerro para la distribución de la energía. Está constituida por dos (02) transformadores de potencia, identificados en la empresa como Transformador 01BFT04y 01BFT085. Estos transformadores tienen una relación de transformación de 13.8 / 0.48 kV, conexión delta-estrella y una capacidad nominal de 0.63 MVA cada uno.



Descripción del Sistema bajo Estudio

Esta subestación es parte importante dentro del proceso ya ella sirve la energía a una serie de cargas en su gran mayoría motores; partiendo de los dos (02) transformadores de 0.63 MVA, la **tabla 4.8.** muestra la carga asociada a estos.

Tabla 4.8. Distribución de carga de los transformadores de potencia de la S/E 05UB02.

<i>Transformador 01BFT04 (630 KVA)</i>
<i>CV 5.02 185 Kw</i>
<i>L.F CV 5.02 0.3 Kw</i>
<i>Transformador 01BFT05 (630 KVA)</i>
<i>CV 5.04 185 Kw</i>
<i>L.F CV 5.04 0.3 Kw</i>
<i>TC-5.17 (Mov. Rapido 4*5.5 Kw y Mov Lento 4*0.55 Kw)</i>

De la barra de 13.8 kV de la subestación 05UB02 se alimentan dos (02) transformadores en seco de 0.8 MVA cada uno, en conexión delta-estrella con una relación de 13.8 / 0.48 kV.

Cada uno estos transformadores son utilizados para suplir de energía un conjunto de motores que conforman cada recuperador, estos recuperadores son identificado en la empresa como RC 5.08 y RC 5.12, cada uno de estos equipos poseen dentro de su estructura una cabina de media tensión la cual contiene los dispositivos de medida, protección y maniobra, incluyendo a el transformador seco de 800KVA, el cual alimenta una serie de motores que permiten el funcionamiento de dicho equipo. **(Ver tabla 4.9.)**



Descripción del Sistema bajo Estudio

Tabla 4.9. Carga asociada al Transformador del Recuperador RC 5.12.

<i>Recuperador RC 5.12</i>	
<i>Equipo</i>	<i>(KW)</i>
<i>Mecanismo de Traslación.</i>	<i>12x5.5 kW</i>
<i>Correa Transversal.</i>	<i>45 kW</i>
<i>L.F Correa Transversal.</i>	<i>0.25 kW</i>
<i>Rueda de Cangilones 1.</i>	<i>132 kW</i>
<i>L.F Rueda de Cangilones 1.</i>	<i>0.33 kW</i>
<i>Rueda de Cangilones 2.</i>	<i>132 kW</i>
<i>L.F Rueda de Cangilones 2.</i>	<i>0.33 kW</i>
<i>Sist. Lubric. Rueda Cang.1</i>	<i>2x0.25 kW</i>
<i>Sist. Lubric. Rueda Cang.2</i>	<i>2x0.25 kW</i>
<i>Vent. Sala TX.</i>	<i>0.55 kW</i>
<i>Trolley 1.</i>	<i>45 kW</i>
<i>L.F Trolley 1.</i>	<i>0.25 kW</i>
<i>Trolley 2.</i>	<i>45 kW</i>
<i>L.F Trolley 2.</i>	<i>0.25 kW</i>
<i>Cable de Potencia.</i>	<i>2.2 kW</i>
<i>Vent. Cable de Potencia.</i>	<i>0.125 kW</i>
<i>Cable de Control.</i>	<i>1.15 kW</i>
<i>Vent. Cable de Control.</i>	<i>0.045 kW</i>

Al igual que el recuperador RC 5.12, el recuperador RC 5.05 tiene la misma carga asociada para su funcionamiento.



CAPITULO V MARCO METODOLOGICO

5.1 Metodología para la realización en formato digital del plano eléctrico y civil del área de producción de Pie de Cerro en C.V.G. Bauxilum-Mina.

Debido a la presencia de información dispersa y desactualizada sobre los parámetros eléctricos que conforman y describen el comportamiento del sistema eléctrico de Pie de Cerro, se llevo a cabo una serie de pasos sistematizados aunado con técnicas de recolección de datos, para la realización en formato digital del plano eléctrico y civil del área de producción de Pie de Cerro (**ver imagen satelital anexo D**), obteniendo una información concreta y agrupada del sistema eléctrico, haciendo más fácil la comprensión de este, para aplicar metodologías de estudios necesarios para la mejora del sistema eléctrico de la empresa. A continuación se describen una serie de pasos empleados que permitieron la realización del plano en formato digital:

1. Recolección de planos del sistema eléctrico y civil del área en estudio.
2. Verificar la ingeniería de detalles para la construcción del sistema eléctrico de Pie de Cerro.
3. Recolectar información técnica sobre los equipos eléctricos conectados al sistema, como transformadores, apiladores, motores, recuperadores y conductores utilizados en el circuito, etc.
4. Se Realizo el recorrido del sistema eléctrico de Pie de Cerro verificando y tomando apuntes de la carga instalada, puntos de transformación, longitud del circuito y aspectos estructurales que



Marco Metodológico

5. conforman una red eléctrica; todo esto ayudado con un GPS con el cual obtuvimos las coordenadas reales de todos los postes de alta tensión que conforman el circuito así como los puntos de transformación.
6. Utilizando el programa Google Earth junto con el software del GPS, obtuvimos la distancia y ubicación real del circuito eléctrico de Pie de Cerro.
7. Revisamos las imágenes en digital formato TIF (**anexo E**), facilitadas por el departamento de Ingenierías y Proyectos de la empresa, el cual contiene la ingeniería de detalles de las obras civiles de cada una de las áreas de la empresa, específicamente Pie de Cerro.
8. Utilizando la herramienta computacional Autocad 2007, se procedió a dibujar el plano eléctrico y civil del área de Pie de Cerro con toda su información detallada y actualizada. (**Anexo F**)

5.2 Metodología empleada para los estudios Eléctricos.

La metodología utilizada para el estudio del sistema eléctrico de Pie de Cerro, fue la propuesta por las prácticas recomendadas del IEEE para la protección y coordinación de sistemas de potencias industriales y comerciales (IEEE Std. 242-2001). Esta propuesta se basa en una serie de pasos que sirven de guía para llevar en forma organizada y concreta el análisis de coordinación de protecciones, las cuales unos de sus pasos contempla el estudio de cortocircuito y flujo de carga; es por esto que se tomo esta estándar como metodología. Estos pasos se describen a continuación:



Marco Metodológico

1. Se desarrolló el diagrama unifilar completo del sistema eléctrico de Pie de Cerro, donde se especificaron los equipos de potencia y su protección. **(Anexo G)**
2. Se determinaron las condiciones de operación normal y las otras posibles condiciones que podría adquirir el sistema resultando cuatro (04).
3. Se determinó el flujo de carga en todo el sistema para las cuatro (04) condiciones de operación. Los valores arrojados por este análisis se utilizaron para determinar el comportamiento del sistema.
4. Se determinaron las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito a medio ciclo tanto para falla trifásica como para falla monofásica.

Para el estudio de compensación de energía reactiva, se tomaron en cuenta la facturación del año 2008, donde se detalla la potencia aparente, activa y reactiva consumida por mes junto al factor de potencia de operación mensual, para esta área de producción.

5.3. Metodología para el Estudio de Niveles de Cortocircuitos.

Este estudio se realizó utilizando la herramienta computacional **Power Station Etap 5.03 (anexo H)**, con la ayuda del módulo "Short-Circuit Analysis". Esta herramienta brinda la posibilidad de calcular los niveles de cortocircuito mediante la norma americana ANSI y la norma IEC, utilizando esta última para el estudio.

El módulo del programa para el estudio de corriente de cortocircuito contempla el análisis de cortocircuito trifásico, bifásico, monofásico a tierra y bifásico línea-tierra. Estos análisis los brinda el programa para tres periodos de tiempo en que se necesita conocer de cortocircuito: medio ciclo, 1.5 ciclos y 30 ciclos.



5.3.1. Metodología del Cálculo de los Niveles de Cortocircuito.

A continuación, se realizaron los cálculos teóricos para determinar los niveles de cortocircuito en cada una de las barras del sistema, aplicando el método de la MVA, que consiste en hallar la potencia de cortocircuito trifásico y monofásico reflejando todas las potencia del sistema a la barra a la cual se quiere determinar la falla, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La potencia de cortocircuito entregada por la empresa de suministro CADAPE en la barra de 13.8 kV a la salida de la Subestación es de 106 MVA en trifásico y 47 MVA en monofásico.
2. Para el cálculo de la potencia por separado de cada motor, se utiliza una reactancia sub-transitoria del 20%.
3. Se mostrara un cálculo para falla monofásica y otro para falla trifásica, ilustrando así el procedimiento que se utilizo con todas las barras del sistema.

5.3.1.1. Cálculos de la potencia de los equipos que contribuyen al fallo.

Para el cálculo de las corrientes de fallas en cada una de las barras presentes en el área bajo estudio, se construyo el **Diagrama de Potencia (ver figura 5.1.)**, el cual contiene la potencia total en MVA, en cada una de las barras del sistema.

Partiendo del diagrama unifilar de Pie de Cerro, se tomaron en cuenta las características del grupo de motores que conforman los apiladores y recuperadores así como los que accionan las cintas transportadoras. Para el cálculo de la potencia de cada uno de los equipos eléctricos, se tomo es cuenta la siguiente fórmula:



Marco Metodológico

$$S_{(MVA)} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N}{X_d''}$$

Ec. 5.1.

Donde:

$S_{(MVA)}$: Es la potencia del equipo en MVA.

V_N : Es el voltaje nominal de operación.

I_N : Es la corriente nominal de operación.

X_d'' : Es la reactancia sub-transitoria, será en 20% para los motores.

- Comenzando con la S/E 05UB01 tenemos que:
 - Para el apilador ST 5.03 en 480 V:

$$S_{(Mec.Traslación)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 9.1 \text{ A}}{0.2} \cdot 8 = 0.326 \text{ MVA}$$

$$S_{(Mec.Giro de Brazo)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 7 \text{ A}}{0.2} \cdot 2 = 0.0582 \text{ MVA}$$

$$S_{(L.F Mec.giro de brazo)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.40 \text{ A}}{0.2} \cdot 2 = 0.0333 \text{ MVA}$$

$$S_{(Mec.Levanta Brazo)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 41 \text{ A}}{0.2} \cdot 2 = 0.3409 \text{ MVA}$$

$$S_{(L.F Mec.Levanta brazo)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.45 \text{ A}}{0.2} = 0.0019 \text{ MVA}$$

$$S_{(Correa de Brazo)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 110 \text{ A}}{0.2} = 0.4573 \text{ MVA}$$



Marco Metodológico

$$S_{(L.F \text{ corra de brazo})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 1.15 \text{ A}}{0.2} = 0.0048 \text{ MVA}$$

$$S_{(Sist. Lubricación)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.73 \text{ A}}{0.2} = 0.0030 \text{ MVA}$$

$$S_{(Vent. sala Tx)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 1.09 \text{ A}}{0.2} = 0.0045 \text{ MVA}$$

$$S_{(Mot. cable de potencia)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 8.2 \text{ A}}{0.2} = 0.0341 \text{ MVA}$$

$$S_{(Vent. cable potencia)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.65 \text{ A}}{0.2} = 0.0027 \text{ MVA}$$

$$S_{(Cable Control)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 2.7 \text{ A}}{0.2} = 0.0112 \text{ MVA}$$

$$S_{(Vent. cable control)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.2 \text{ A}}{0.2} = 0.0012 \text{ MVA}$$

$$S_{(total ST 5.03)} = \sum (S_{\text{Conectadas a la Barra de 0.48 kV del ST 5.03}}) = 1.2557 \text{ MVA}$$

- Para el apilador ST 5.05 en 480 V:

El apilador ST 5.03 es idéntico al ST 5.05, por consiguiente este apilador tendrá la misma carga del apilador anterior ya descrito, es decir, tenemos que:

$$S_{(total ST 5.05)} = S_{(total ST 5.03)} = 1.2557 \text{ MVA}$$

- Para el Transformador 01BFT01 (1.5 MVA) en 480 kV:

$$S_{(CV 5.10-1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 299 \text{ A}}{0.2} = 0.9519 \text{ MVA}$$



Marco Metodológico

$$S_{(LF\ CV\ 5.10-1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 1.15\ A}{0.2} = 0.0048\ MVA$$

$$S_{(CV\ 5.10-2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 299\ A}{0.2} = 0.9519\ MVA$$

$$S_{(LF\ CV\ 5.10-2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 1.15\ A}{0.2} = 0.0048\ MVA$$

$$S_{(CV\ 5.11-1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 299\ A}{0.2} = 0.9519\ MVA$$

$$S_{(LF\ CV\ 5.11-1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 1.15\ A}{0.2} = 0.0048\ MVA$$

$$S_{(CV\ 5.11-2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 299\ A}{0.2} = 0.9519\ MVA$$

$$S_{(LF\ CV\ 5.11-2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 1.15\ A}{0.2} = 0.0048\ MVA$$

$$S_{(total\ 01BFT01)} = \sum (S_{Conectadas\ a\ la\ Barra\ de\ 0.48\ kV\ del\ 01BFT01}) = 3.8268\ MVA$$

- Para el Transformador 01BFT02 (1.5 MVA) en 480 V:

La carga asociada al transformador 01BFT02 es igual a la carga que se encuentra conectada al transformador 01BFT01, entonces tenemos que:

$$S_{(total\ 01BFT02)} = S_{(total\ 01BFT01)} = 3.8268\ MVA$$

- Para la Barra de 13.8 kV:

Para este caso, en esta barra se encuentran conectados cuatro (04) transformadores, el cual de determino la potencia de cada uno con la siguiente expresión:



Marco Metodológico

$$S_{(MVA)} = \frac{S_N}{Z\%}$$

Ec. 5.2.

Donde:

$S_{(MVA)}$: Es la potencia suministrada por transformador.

S_N : Es la potencia nominal del transformador.

$Z\%$: Es la impedancia de cortocircuito.

Tenemos que:

$$S_{(TX-01BFT01)} = \frac{1.5 \text{ MVA}}{0.06323} = 24.0770 \text{ MVA}$$

$$S_{(TX-01BFT02)} = \frac{1.5 \text{ MVA}}{0.06323} = 24.0770 \text{ MVA}$$

$$S_{(TX-ST 5.03)} = \frac{0.4 \text{ MVA}}{0.04} = 10 \text{ MVA}$$

$$S_{(TX-ST 5.03)} = \frac{0.4 \text{ MVA}}{0.04} = 10 \text{ MVA}$$

- Para el conductor:

Para calcular la potencia entregada por el conductor al momento de una falla, se deben tomar en cuenta la tensión de operación, longitud del conductor y la impedancia del conductor dependiendo del material de fabricación. De la siguiente expresión tenemos que:

$$S_{(Conductor)} = \frac{(13.8 \text{ kV})^2}{(Z \cdot L)}$$

Ec. 5.3.

Donde:



Marco Metodológico

Z : Reactancia del conductor, en este caso es **0.4946** Ω/kM por ser el calibre del conductor 4/0 de aluminio.

L : Longitud del conductor desde el alimentador hasta la carga, para este caso tenemos 0.8318 kM.

$$S_{(\text{Conductor 4/0})} = \frac{(13.8 \text{ kV})^2}{(0.4946 \Omega/\text{kM}) \cdot (0.8318 \text{ kM})} = 463.1762 \text{ MVA}$$

• Para la S/E 05UB02 tenemos que:

- Para el recuperador RC 5.12 en 480 V:

$$S_{(\text{Recuperación})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 9.1 \text{ A}}{0.2} \cdot 12 = 0.4539 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Correa Transversal})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 68 \text{ A}}{0.2} = 0.2827 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{L.F Correa Transversal})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.45 \text{ A}}{0.2} = 0.0019 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Rueda Cangilones 1})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 193 \text{ A}}{0.2} = 0.8023 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{L.F Rueda Cangilones 1})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 1.15 \text{ A}}{0.2} = 0.0048 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Rueda Cangilones 2})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 193 \text{ A}}{0.2} = 0.8023 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{L.F Rueda Cangilones 2})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 1.15 \text{ A}}{0.2} = 0.0048 \text{ MVA}$$



Marco Metodológico

$$S_{(\text{Lubric. Rueda Cangilones 1})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.74 \text{ A}}{0.2} \cdot 2 = 0.0062 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Lubric. Rueda Cangilones 2})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.74 \text{ A}}{0.2} \cdot 2 = 0.0062 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Vent. sala Tx})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 1.09 \text{ A}}{0.2} = 0.0045 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Trolley 1})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 73 \text{ A}}{0.2} = 0.3035 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{LF Trolley 1})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.45 \text{ A}}{0.2} = 0.0019 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Trolley 2})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 73 \text{ A}}{0.2} = 0.3035 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{LF Trolley 2})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.45 \text{ A}}{0.2} = 0.0019 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Mot.cable Potencia})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 8.2 \text{ A}}{0.2} = 0.0341 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Vent.Cable Potencia})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.8 \text{ A}}{0.2} = 0.0033 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Cable Control})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 2.7 \text{ A}}{0.2} = 0.0112 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Vent.Cable Control})} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480 \text{ V} \cdot 0.3 \text{ A}}{0.2} = 0.0012 \text{ MVA}$$

$$S_{(\text{Total RC 5.12})} = \sum (S_{\text{Conectadas a la Barra de 0.48 kV del RC 5.12}}) = 3.0302 \text{ MVA}$$



Marco Metodológico

- Para el Recuperador RC 5.08 en 480 V:

El Recuperador RC 5.08 es idéntico al RC 5.12, por consiguiente este Recuperador tendrá la misma carga del recuperador anterior ya descrito, es decir, tenemos que:

$$S_{(total\ RC\ 5.08)} = S_{(total\ RC\ 5.12)} = 3.0302\ MVA$$

- Para el Transformador 01BFT04 (630 kVA) en 480 kV:

$$S_{(CV\ 5.02)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 263\ A}{0.2} = 1.0933\ MVA$$

$$S_{(LF\ CV\ 5.02)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 1.15\ A}{0.2} = 0.0048\ MVA$$

$$S_{(total\ 01BFT04)} = \sum (S_{Conectadas\ a\ la\ Barra\ de\ 0.48\ kV\ del\ 01BFT04}) = 1.0981\ MVA$$

- Para el Transformador 01BFT05 (630 kVA) en 480 kV:

$$S_{(CV\ 5.04)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 263\ A}{0.2} = 1.0933\ MVA$$

$$S_{(LF\ CV\ 5.04)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 1.15\ A}{0.2} = 0.0048\ MVA$$

$$S_{(TC- 5.17)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 480\ V \cdot 11.5\ A}{0.2} = 0.0478\ MVA$$

$$S_{(total\ 01BFT05)} = \sum (S_{Conectadas\ a\ la\ Barra\ de\ 0.48\ kV\ del\ 01BFT05}) = 1.1459\ MVA$$

- Para la Barra de 13.8 kV:



Marco Metodológico

Para este caso, en esta barra se encuentran conectados cuatro (04) transformadores, el cual de determino la potencia de cada uno con la siguiente expresión:

$$S_{(MVA)} = \frac{S_N}{Z\%}$$

Donde:

$S_{(MVA)}$: Es la potencia suministrada por transformador.

S_N : Es la potencia nominal del transformador.

$Z\%$: Es la impedancia de cortocircuito.

Tenemos que:

$$S_{(Tx\ 01SFT04)} = \frac{0.63\ MVA}{0.04} = 15.75\ MVA$$

$$S_{(Tx\ 01SFT03)} = \frac{0.63\ MVA}{0.04} = 15.75\ MVA$$

$$S_{(Tx\ RC\ 5.12)} = \frac{0.8\ MVA}{0.05} = 16\ MVA$$

$$S_{(Tx\ ST\ 3.08)} = \frac{0.8\ MVA}{0.05} = 16\ MVA$$

- Para el conductor:

Para calcular la potencia entregada por el conductor al momento de una falla, se deben tomar en cuenta la tensión de operación, longitud del conductor y la impedancia del conductor dependiendo del material de fabricación. De la siguiente expresión tenemos que:



Marco Metodológico

$$S_{(Conductor)} = \frac{(13.8 \text{ kV})^2}{(Z \cdot L)}$$

Donde:

Z : Reactancia del conductor, en este caso es $0.4946 \text{ } \Omega/\text{kM}$ por ser el calibre del conductor 4/0.

L : Longitud del conductor desde el alimentador hasta la carga, para este caso tenemos 2.19 kM .

$$S_{(Conductor 4/0)} = \frac{(13.8 \text{ kV})^2}{(0.4946 \Omega/\text{kM}) \cdot (2.19 \text{ kM})} = 175.8166 \text{ MVA}$$

Una vez calculadas las Potencias suministrada por cada una de las maquinas eléctricas y conductores, se procede a realizar el diagramas de potencia. **(Ver Figura 5.1.)**

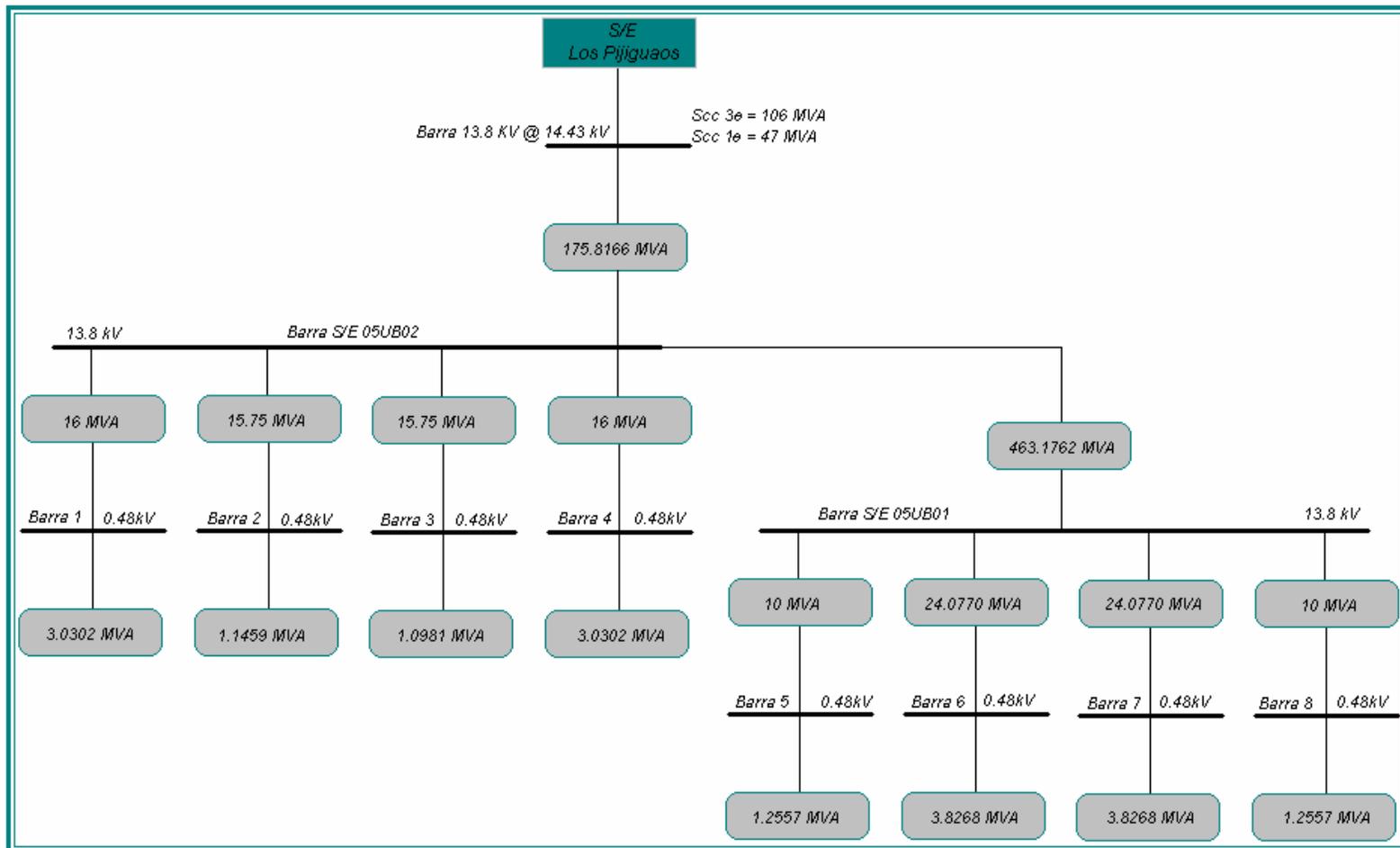


Figura 5.1. Diagrama de Potencia del Circuito Eléctrico de Pie de Cerro.



Marco Metodológico

5.3.1.2. Cálculos Teóricos para una falla Trifásica en barras de 0.48 y 13.8 kV.

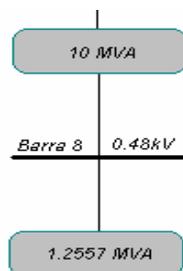
1. Calculo de Falla Trifásica en barra de 0.48 kV:

Una vez obtenido el diagrama de potencia, se procede a realizar los cálculos de las falla en las distintas barras del sistema. Para esto se va reflejando las potencias a la barra a la cual se quiere calcular la potencia de cortocircuito, simplificando las potencias, sabiendo q las cargas en serie se suman y en paralelo se aplica la siguiente fórmula para obtener la potencia equivalente:

$$S_{equivalente} = \frac{S_1 + S_2}{S_1 + S_2} \quad \text{Ec. 5.4.}$$

Supongamos que queremos determinar la corriente de cortocircuito en la **Barra 1**, reflejamos todas las cargas hacia dicha barra de la siguiente forma:

• Comenzamos con la S/E 05UB01 reflejando primero el grupo de cargas a la barra de 13.8 kV:

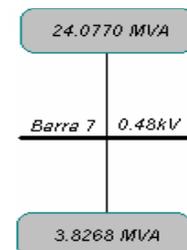


Estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq8} = \frac{10 * 1.2557}{10 + 1.2557} = 1.1155 \text{ MVA}$$

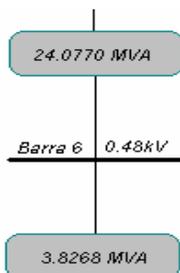
Al igual que la anterior, estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq7} = \frac{24.0770 * 3.8368}{24.0770 + 3.8268} = 3.3020 \text{ MVA}$$





Marco Metodológico



Estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq6} = \frac{24.0770 * 3.8368}{24.0770 + 3.8268} = 3.3020 \text{ MVA}$$

Al igual que la anterior, estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq5} = \frac{10 * 1.2557}{10 + 1.2557} = 1.1155 \text{ MVA}$$



• Una vez de haber reflejado las cargas a la barra de 13.8 kV, estas se encuentran en serie, es decir, a la misma tensión. Se realiza la suma y el resultado de esta será la carga equivalente en la barra de 13.8 kV de la S/E 05UB01:

$$S_{Eq \text{ bus } 13.8 \text{ kV en S/E 05UB01}} = S_{eq5} + S_{eq6} + S_{eq7} + S_{eq8} = 8.8350 \text{ MVA}$$

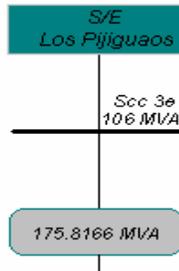
• Esta potencia equivalente en la barra de 13.8 kV de la S/E 05UB01 está en serie con la potencia del conductor, ya que están al mismo nivel de tensión, la suma de estas dos potencias resulta una potencia reflejada a la barra de 13.8 kV de la S/B 05UB02, donde se encuentra el grupo de cargas asociados a la **Barra 1** donde se quiere hallar la potencia de falla:

$$S_{reflejada1} = S_{Eq \text{ bus } 13.8 \text{ kV en S/E 05UB01}} + S_{conductor 4/0} = 472.0112 \text{ MVA}$$

• Luego se procede a reflejar la carga del conductor que viene de la S/E Los Pijiguaos con la potencia de cortocircuito entregada por esta:



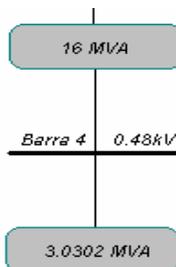
Marco Metodológico



Estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{reflejada2} = \frac{106 * 175.8166}{106 + 175.8166} = 66.1301 \text{ MVA}$$

- Luego se procede a reflejar el grupo de carga de la S/E 05UB02 a la barra de 13.8 kV, excepto el grupo de carga donde se encuentra la Barra 1, donde queremos hallar la falla:

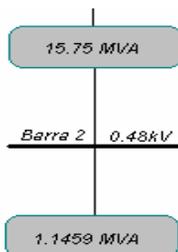
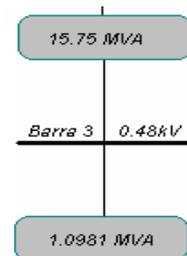


Estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq4} = \frac{16 * 3.0302}{16 + 3.0302} = 2.5477 \text{ MVA}$$

Al igual que la anterior, estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq3} = \frac{15.75 * 1.0981}{15.75 + 1.0981} = 1.0265 \text{ MVA}$$



Estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq2} = \frac{15.75 * 1.1459}{15.75 + 1.1459} = 1.0680 \text{ MVA}$$

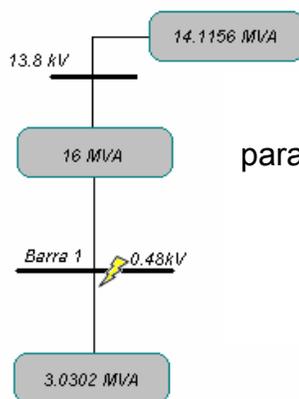
$$S_{reflejada3} = S_{eq4} + S_{eq3} + S_{eq2} = 4.6422 \text{ MVA}$$



Marco Metodológico

• Una vez reflejadas todas las cargas, observamos que las tres cargas reflejadas están en serie, resultando la suma de estas tres carga toda la carga reflejada en la barra de 13.8 kV de la S/E 05UB02 para el cálculo de la potencia de cortocircuito en la barra 1:

$$S_{\text{Resultante}} = S_{\text{resultante1}} + S_{\text{resultante2}} + S_{\text{resultante3}} = 14.1156 \text{ MVA}$$

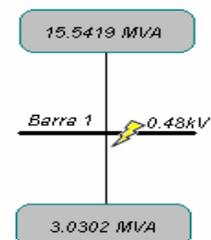


Las cargas 14.1156 y 16 MVA se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_1 = \frac{16 * 14.1156}{16 + 14.1156} = 15.5419 \text{ MVA}$$

Estas dos cargas se encuentran en serie, y la suma de las dos resulta la potencia de cortocircuito en la **Barra 1**:

$$S_{\text{ccBarra1}} = 15.5419 + 3.0302 = 18.5721 \text{ MVA}$$



La Corriente de cortocircuito será igual a:

$$I_{\text{ccBarra1}_{30}} = \frac{18.5721}{\sqrt{3} * 0.48} = 22.34 \text{ kA}$$

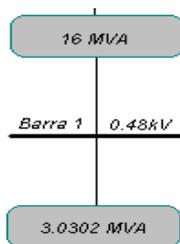
2. Calculo de falla trifásica en barra de 13.8 kV:

Para el cálculo de la potencia de cortocircuito en barra de 13.8 kV es igual al procedimiento empleado para barra de 0.48 kV ya antes descrito.



Marco Metodológico

Por ejemplo, para determinar la Potencia de cortocircuito en la Barra de 13.8 kV de la S/E 05UB02, se debe reflejar toda la carga a esa barra. Ya se tiene gran parte del procedimiento de reflejar las cargas a la barra de 13.8 kV; solo faltaría reflejar el grupo de carga donde se encuentra la Barra 1 y sumárselo a la $S_{reflejada3}$ y luego continuar con el procedimiento del cálculo:

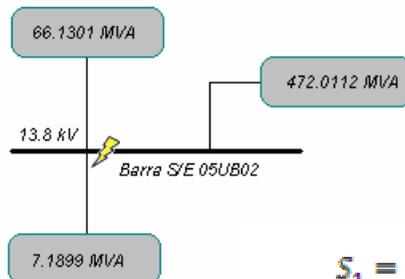


Estas cargas se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_{eq1} = \frac{16 \times 3.0302}{16 + 3.0302} = 2.5477 \text{ MVA}$$

$$S_{reflejada3} = S_{eq4} + S_{eq3} + S_{eq2} + S_{eq1} = 7.1899 \text{ MVA}$$

Tenemos que:

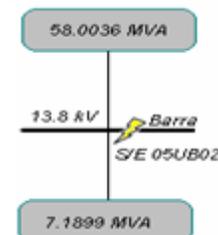


Las cargas 66.1301 y 472.0112 MVA se encuentran en paralelo, calculamos su equivalente de la siguiente forma:

$$S_1 = \frac{66.1301 \times 472.0112}{66.1301 + 472.0112} = 58.0036 \text{ MVA}$$

Estas dos cargas se encuentran en serie, y la suma de las dos resulta la potencia de cortocircuito en la **Barra de 13.8 kV de la S/E 05UB02**:

$$S_{ccBarra\ 13.8kV} = 58.0036 + 7.1899 = 65.1935 \text{ MVA}$$





La Corriente de cortocircuito será igual a:

$$I_{ccBarra13.8kV} = \frac{65.1935}{\sqrt{3} * 13.8} = 2.7275 \text{ kA}$$

5.3.1.3. Cálculos Teóricos para una falla Monofásica en barras de 0.48 y 13.8 kV.

Una vez obtenido los valores de la potencia de cortocircuito trifásico el proceso de hallar las potencias de cortocircuito monofásico es más simple, ya que la potencia de cortocircuito viene dada por la siguiente expresión:

$$S_{cc_{1\phi}} = 3(S_{connectBus} \parallel S_{cc_{3\phi}} \parallel S_{cc_{2\phi}}) \quad \text{Ec. 5.5.}$$

Donde:

$S_{cc_{1\phi}}$: Es la potencia de cortocircuito monofásica.

$S_{connectBus}$: Es la sumatoria de las potencias conectadas directamente a la barra donde se quiere determinar la potencia de cortocircuito monofásico.

$S_{cc_{3\phi}}$: Es la potencia de cortocircuito trifásica reflejada hacia la barra donde se quiere conocer el fallo.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo calcular la potencia de cortocircuito monofásica en la **Barra 1** a 0.48 kV y en la **Barra de la S/E 05UB02** a 13.8 kV, ya que de éstas hemos calculado anteriormente sus potencias de cortocircuito trifásico:

1. Para la barra de 0.48 kV (**Barra 1**):

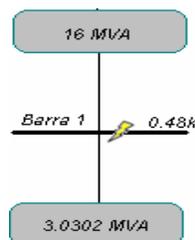
Ya conocemos la potencia de cortocircuito trifásico de la **Barra 1** que es:

$$S_{ccBarra1_{3\phi}} = 18.5721 \text{ MVA}$$



Marco Metodológico

Nos ubicamos en el grupo de cargas conectadas a la Barra 1, y así realizamos la suma de estas y obtenemos $S_{conectBus1}$.



Para el cálculo de la potencia de cortocircuito monofásica con la suma de estas cargas obtendremos la carga conectada directamente en la Barra 1:

$$S_{conectBus1} = 16 + 3.0302 = 19.0302 \text{ MVA}$$

Entonces la potencia de cortocircuito monofásico será:

$$S_{cc_{1\phi}} = 3(19.0302 \parallel 18.5721 \parallel 18.5721) = 18.7223 \text{ MVA}$$

La corriente de cortocircuito monofásica en esta barra será:

$$I_{cc_{Bus1_{1\phi}}} = \frac{18.7223}{\sqrt{3} \cdot 0.48} = 22.5194 \text{ kA}$$

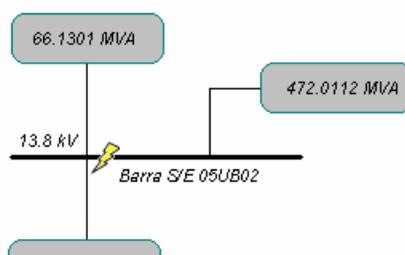
2. Para la Barra 13.8 kV de la S/E 05UB02:

Ya conocemos la potencia de cortocircuito trifásico de la **Barra de 13.8 kV de la S/E 05UB02** que es:

$$S_{cc_{Bus13.8kV_{3\phi}}} = 65.1935 \text{ MVA}$$

Nos ubicamos en el grupo de cargas conectadas a la **Barra de 13.8 kV de la S/E 05UB02**, y así realizamos la suma de estas y obtenemos $S_{conectBus13.8kV}$.

Tenemos que:



Para el cálculo de la potencia de cortocircuito monofásica con la suma de estas cargas obtendremos la carga conectada directamente en la Barra 1:



$$S_{connectBus13.8kV} = 66.1301 + 7.1899 + 472.0112 = 545.3312 M$$

Entonces la potencia de cortocircuito monofásico será:

$$S_{cc_{10}} = 3(545.3312 || 65.1935 || 65.1935) = 92.2743 MVA$$

La corriente de cortocircuito monofásica en esta barra será:

$$I_{CC_{Bus13.8kV_{10}}} = \frac{92.2743}{\sqrt{3} \cdot 0.48} = 3.8604 kA$$

5.4 Metodología para el Estudio de Flujo de Carga.

Esta parte del estudio se realizó con la ayuda del módulo de flujo de carga "Load Flow Analysis" de la herramienta computacional Power Station Etap 5.03. Esta herramienta brinda la posibilidad de hacer corrida de flujo de carga mediante tres métodos numéricos. El método que se consideró y se utilizó para los cálculos fue el Newton-Raphson.

Las consideraciones más importantes que se tomaron en cuenta para el estudio de flujo de carga fueron las siguientes:

- Se tomarán en cuenta las variaciones de tensión en la barra de 115 kV de la S/E Los Pijiguaos (**anexo I**), las cuales fueron arrojadas por las mediciones realizadas por EDELCA, filial de CORPOELEC. Los Niveles tomados en cuenta se presentan en la **tabla 5.1**.



Tabla 5.1. Niveles de tensión en la barra de 115 kV de la S/E Los Pijiguaos, para el estudio de Flujo de Carga.

<i>Niveles de Tensión de la S/E Los Pijiguaos en la barra de 115 kV para el estudio de Flujo de Carga</i>	
102 kV	<i>Variación de tensión mas baja registrada en el periodo de medicion.</i>
105 kV	<i>Limite de voltaje minimo donde se mantenía la variación por debajo del -5% permitido.</i>
109 kV	<i>Valor minimo de tensión dentro de las condiciones de operacion del $\pm 5\%$</i>
115 kV	<i>Valor de tensión Ideal de operación.</i>
121 kV	<i>Valor maximo de tensión dentro de las condiciones de operación del $\pm 5\%$</i>
125 kV	<i>Limite de voltaje maximo donde se mantenía la variación por arriba del +5%</i>
127 kV	<i>Variación de tensión mas alta registrada en el periodo de medición</i>

- El voltaje nominal utilizado fue el voltaje de cada barra. Para ello se ajusto la interfaz del programa la opción voltaje nominal en 100%.
- Para el sistema de distribución de Pie de Cerro se tomo un factor de potencia igual a 0.75.
- El valor de la caída de tensión máxima permitida fue del 5%.

Así mismo, se realizo el estudio de Flujo de Carga en cuatro casos de operación (**ver tabla 5.2.**) que puede tomar el sistema, en cada caso tomando en cuenta las variaciones de la subestación a nivel de 115 kV.



Tabla 5.2. Configuraciones de operación del Sistema Eléctrico de Pie de Cerro para el estudio de Flujo de Carga

Configuraciones de operación del Sistema Eléctrico de Pie De Cerro para el Estudio de Flujo de Carga

<p>CASO # 1</p> <p><i>Operación a Plena Carga</i></p>	<p><i>El sistema opera en las distintas variaciones de tensión que presenta la S/E Los Pijiguaos a nivel de 115 kV , bajo demanda máxima.</i></p>
<p>CASO # 2</p> <p><i>Con un solo transformador en la S/E Los Pijiguaos</i></p>	<p><i>Se abre el interruptor principal de uno de los transformadores de la S/E Los Pijiguaos y se cierra el enlace de barra, operando con un solo Transformador bajo plena carga.</i></p>
<p>CASO # 3</p> <p><i>Con un solo transformador en la S/E 05UB01</i></p>	<p><i>Se abre el interruptor principal de uno de los transformadores de la S/E 05UB01 y se cierra el enlace de barra, operando con un solo Transformador bajo plena carga.</i></p>
<p>CASO # 4</p> <p><i>Con un solo transformador en la S/E 05UB02</i></p>	<p><i>Se abre el interruptor principal de uno de los transformadores de la S/E 05UB02 y se cierra el enlace de barra, operando con un solo Transformador bajo plena carga.</i></p>

5.5. Metodología para el estudio de Compensación de Energía Reactiva.

Para este estudio se tomaron en cuenta los requerimientos exigidos por la empresa, el cual solicitaban una compensación de energía reactiva partiendo de que el banco de capacitores resultante fuese colocado a la entrada del área de Pie de Cerro, ya que es un sitio estratégico para realizar maniobras, dado que en ese sitio hay personal laborando las 24 horas del día



Marco Metodológico

que pueden informar de cualquier eventualidad de emergencia en cuanto compensación y variación del factor potencia se trata. Por estos antecedentes se realiza una **Compensación Global**, que consiste en colocar las baterías de condensadores a la entrada del circuito.

Este estudio se realizó con la ayuda de la herramienta computacional ETAP 5.03, el cual realiza la corrida de compensación basándose en tres (03) principios:

- Mantener la caída de tensión dentro de los límites tolerables.
- Corrección del factor de potencia.
- Ambos principios.

Este simulador arroja el resultado de la compensación tomando en cuenta los puntos o barras donde deberían colocarse los condensadores para una compensación más óptima, siendo la sumatoria de estas energías suministradas por los condensadores la necesaria para compensar todo el sistema en estudio.

Aunado a la simulación, se realizaron los cálculos teóricos tomando en cuenta los periodos de operación de la empresa y los requerimientos de esta basándose en una compensación global por lo antes ya descrito.

5.5.1. Consideraciones tomadas en cuenta para el estudio de Compensación de Energía Reactiva.

Para este estudio se tomó en cuenta el periodo de operación de la empresa, específicamente en el área de Pie de Cerro, resultando dos periodos de operación las cuales se describen a continuación:

1. Periodo de Mantenimiento:

Este periodo comienza a partir del mes de enero de cada año con una duración variable de cuatro (04) hasta seis (06) meses máximo, dependiendo



Marco Metodológico

de la temporada de invierno, el cual el río Orinoco es navegable para transportar la bauxita hasta el puerto de matanzas en Puerto Ordaz.

En este periodo la demanda de carga no es máxima, ya que gran parte de los equipos, cabe mencionar motores eléctricos, se encuentran en mantenimiento para comenzar el periodo de producción de cada año.

Para este periodo solo hay un turno de trabajo o de operación de ocho (08) horas diarias.

2. Periodo de Producción:

Una vez concluido el periodo de mantenimiento, siendo influyente la estación de invierno hasta hacerse navegable el río Orinoco, el cual determina el comienzo del periodo de producción de una duración de seis (06) a ocho (08) meses dependiendo de la permanencia del periodo de mantenimiento.

En este periodo para el área de producción Pie de Cerro, la demanda de carga es máxima, ya que se encuentra en operación todo el conjunto de motores que conforman los apiladores y los recuperadores adicionales a otras cargas de importancias.

Cabe destacar que para este periodo la jornada de trabajo consta de tres (03) turnos de ocho (08) horas cada uno, siendo la sumatorias de estas 24 horas de operación los 7 días de la semana con demanda máxima.

5.5.2. Metodología del cálculo del estudio de Compensación de Reactivos.

Partiendo de los periodos de operación de la empresa y los requerimientos hechos por esta de realizar una compensación global, se realizaron los cálculos teóricos de la energía reactiva necesaria para elevar el factor de potencia a 0.95, tomando en cuenta la facturación detallada del año



Marco Metodológico

2008, donde describe los KVAr/h y KW/h consumidos en cada mes a un factor de potencia determinado.

Planteada la situación de realizar una compensación global se estableció el tiempo de duración de los periodos de operación, tomando seis (06) meses para el periodo de mantenimiento siendo de igual duración el periodo de producción, variando las horas de operación tomadas en cuenta para la compensación. Dado esto, se realizó el cálculo de la energía reactiva necesaria para el periodo de mantenimiento y la requerida para el periodo de producción, para realizar una compensación a partir de una configuración del banco de condensadores de tal forma que se pueda inyectar o sacar carga reactiva manualmente por medio de interruptores dependiendo del periodo de operación que se encuentra la empresa en un momento determinado.

Tomando en cuentas estas observaciones se realiza el cálculo a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{E}{T \cdot PF} \sin(\arccos(PF)) \quad \text{Ec. 5.6.}$$

Donde:

E: Potencia activa en kW/h

T: Tiempo de duración del periodo de operación mensual dado en horas. Siendo para el periodo de mantenimiento 240 horas y 730 para el periodo de producción.

PF: Factor de potencia; depende de la Q calculada real o corregida.

Con esta ecuación se realiza el cálculo de la de la energía reactiva real del sistema siendo el factor de potencia el más bajo registrado en la facturación, tomando en cuenta la máxima carga consumido dependiendo del



Marco Metodológico

periodo de operación; luego se calcula con la misma expresión la energía reactiva necesaria a un factor de potencia deseado, en este caso es de 0.95 para la demanda máxima.

La diferencia de estas Q calculadas, será la potencia necesaria en KVAR para realizar la compensación, corrigiendo así el factor de potencia.

$$\Delta Q = Q_{actual} - Q_{corregido} \quad \text{Ec. 5.7.}$$



Marco Metodológico



Resultados de los Estudios

CAPITULO VI RESULTADO DE LOS ESTUDIOS

6.1. Resultado del estudio de Cortocircuito.

A continuación se presentan los resultados del estudio de cortocircuito, que permitieron conocer los valores de los niveles de las potencias y corrientes de cortocircuito tanto trifásicas como monofásicas existentes en las barras del sistema eléctrico de Pie de Cerro.

Entre los aspectos más importantes tomados en cuenta que pudieron ser evaluados después del estudio, fueron las capacidades de interrupción de los dispositivos de protección instalados en las subestaciones eléctricas pertenecientes al sistema estudiado. Este estudio tomo en cuenta el análisis de corrientes de cortocircuito trifásica y monofásica, la **tabla 6.1.** muestra los valores de potencia y corriente de cortocircuito trifásica y monofásica.



Resultados de los Estudios

Tabla 6.1. Resultado de los cálculos teóricos de Cortocircuito.

<i>Resultados del Cálculo Teórico de Cortocircuito</i>				
<i>Barras</i>	<i>Sc_c 30</i>	<i>I_{cc} 30</i>	<i>Sc_c 10</i>	<i>I_{cc} 10</i>
<i>Barra 1</i>	18.5721 MVA	22.34 kA	18.7223 MVA	22.52 kA
<i>Barra 2</i>	16.4529 MVA	19.81 kA	15.9062 MVA	19.13 kA
<i>Barra 3</i>	16.4052 MVA	19.73 kA	16.5502 MVA	19.91 kA
<i>Barra 4</i>	18.5721 MVA	22.34 kA	18.7223 MVA	22.52 kA
<i>Barra 5</i>	10.0239 MVA	12.06 kA	10.4034 MVA	12.51 kA
<i>Barra 6</i>	21.6751 MVA	26.07 kA	23.4175 MVA	28.17 kA
<i>Barra 7</i>	21.6751 MVA	26.07 kA	23.4175 MVA	28.17 kA
<i>Barra 8</i>	10.0239 MVA	12.06 kA	10.4034 MVA	12.51 kA
<i>S/E 05UB01 (13.8 kV)</i>	72.2971 MVA	3.02 kA	480.8462 MVA	4.22 kA
<i>S/E 05UB02 (13.8 kV)</i>	65.1935 MVA	2.73 kA	545.3312 MVA	3.86 kA

Cabe destacar que las barras enumeradas están a un nivel de tensión de 0.48 kV, pertenecientes a los recuperadores y apiladores. El método utilizado para el cálculo es confiable ya que los resultados están cercanos a los arrojados por el simulador. **(Ver tabla 6.2.)**



Resultados de los Estudios

Tabla 6.2. Resultados de Las corrientes de cortocircuito arrojados por el simulador ETAP 5.03.

<i>Resultados de los Niveles de Cortocircuito arrojados por El simulador ETAP 5.03</i>				
<i>Barras</i>	<i>Icc 30 (kA) Simetrica</i>	<i>Icc 30 (kA) Asimetrica</i>	<i>Icc 10 (kA) Simetrica</i>	<i>Icc 10 (kA) Asimetrica</i>
<i>Barra 1</i>	18.487	23.449	18.394	23.956
<i>Barra 2</i>	16.181	19.435	16.736	20.027
<i>Barra 3</i>	16.306	19.550	16.822	20.136
<i>Barra 4</i>	18.487	23.449	18.394	23.956
<i>Barra 5</i>	12.522	14.378	12.469	12.602
<i>Barra 6</i>	26.426	27.435	26.830	27.368
<i>Barra 7</i>	26.426	27.435	26.830	27.368
<i>Barra 8</i>	11.224	12.826	11.213	11.313
<i>S/E 05UB01 (13.8 kV)</i>	4.263	4.420	2.238	4.826
<i>S/E 05UB02 (13.8 kV)</i>	3.664	3.794	1.914	3.956

Es importante destacar que los valores teóricos de las corrientes de cortocircuito están más cercanos a los valores de las corrientes asimétricas tanto trifásicas como monofásicas arrojadas por el simulador. Los valores mostrados en la **tabla 6.2.** son expuesto en el diagrama unifilar (**ver figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6.**).

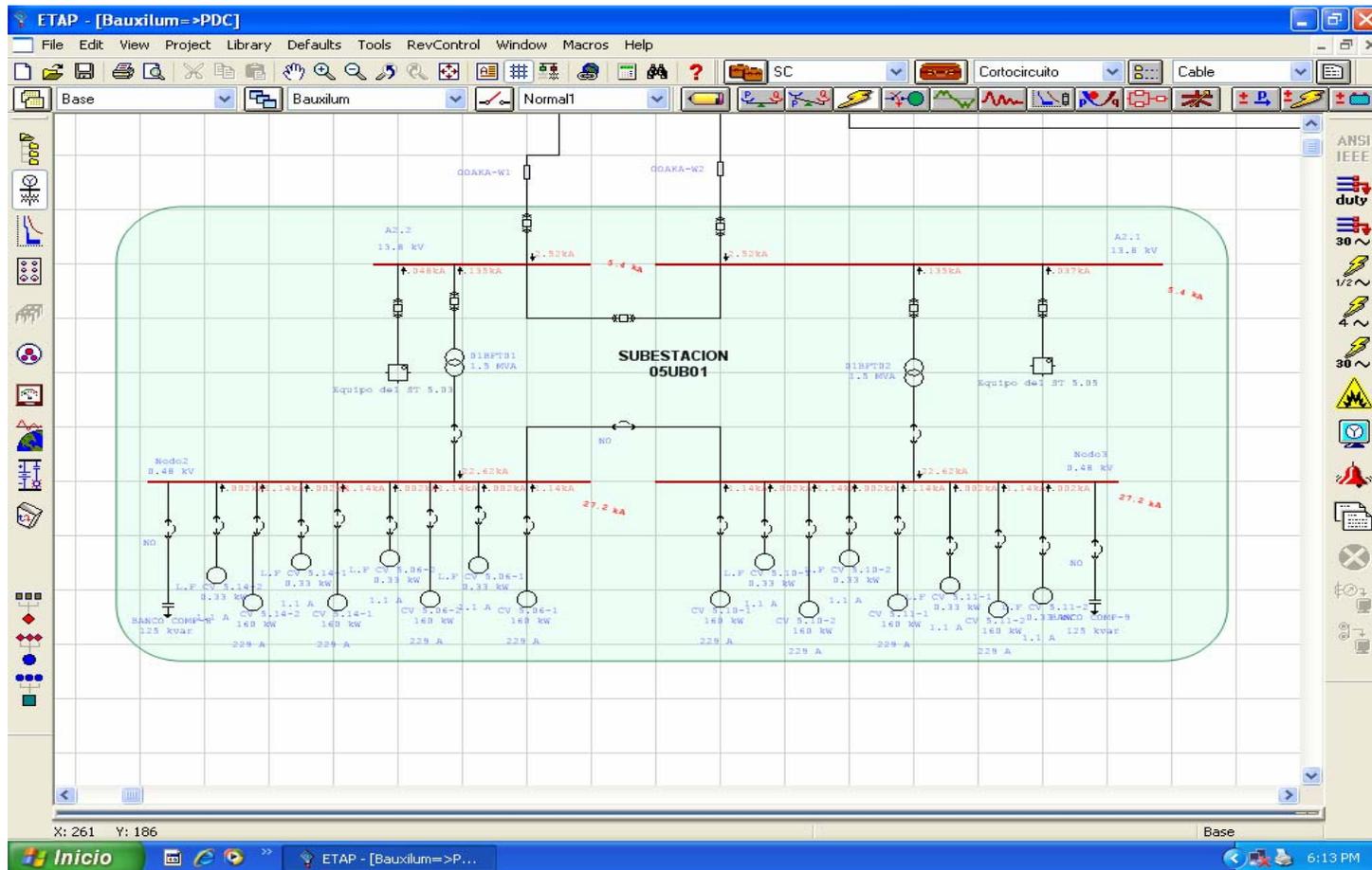


Figura 6.1. Resultados de los niveles de Cortocircuito trifásico en la S/E 05UB01.

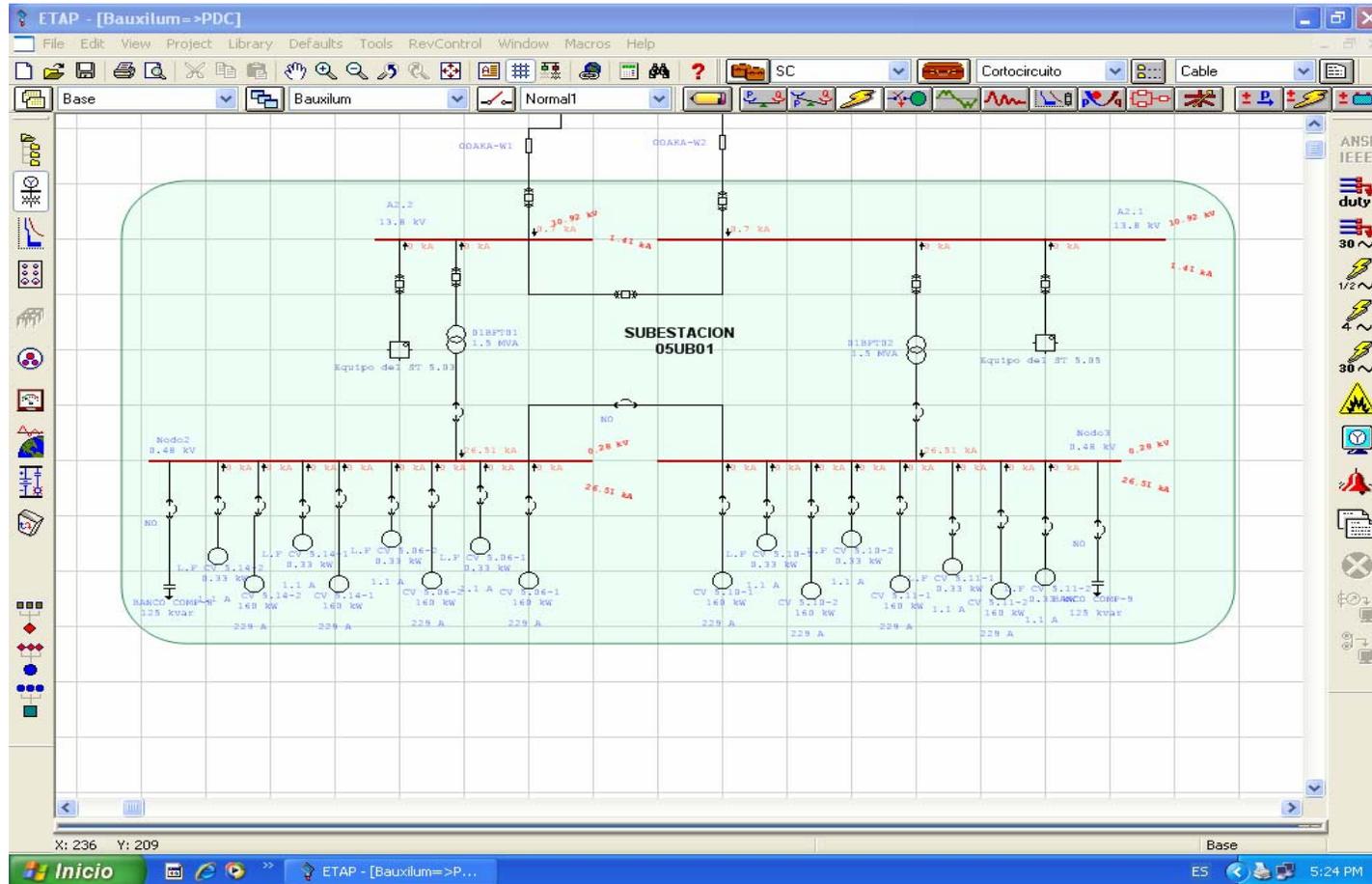


Figura 6.2. Resultados de los niveles de Cortocircuito monofásico en la S/E 05UB01.

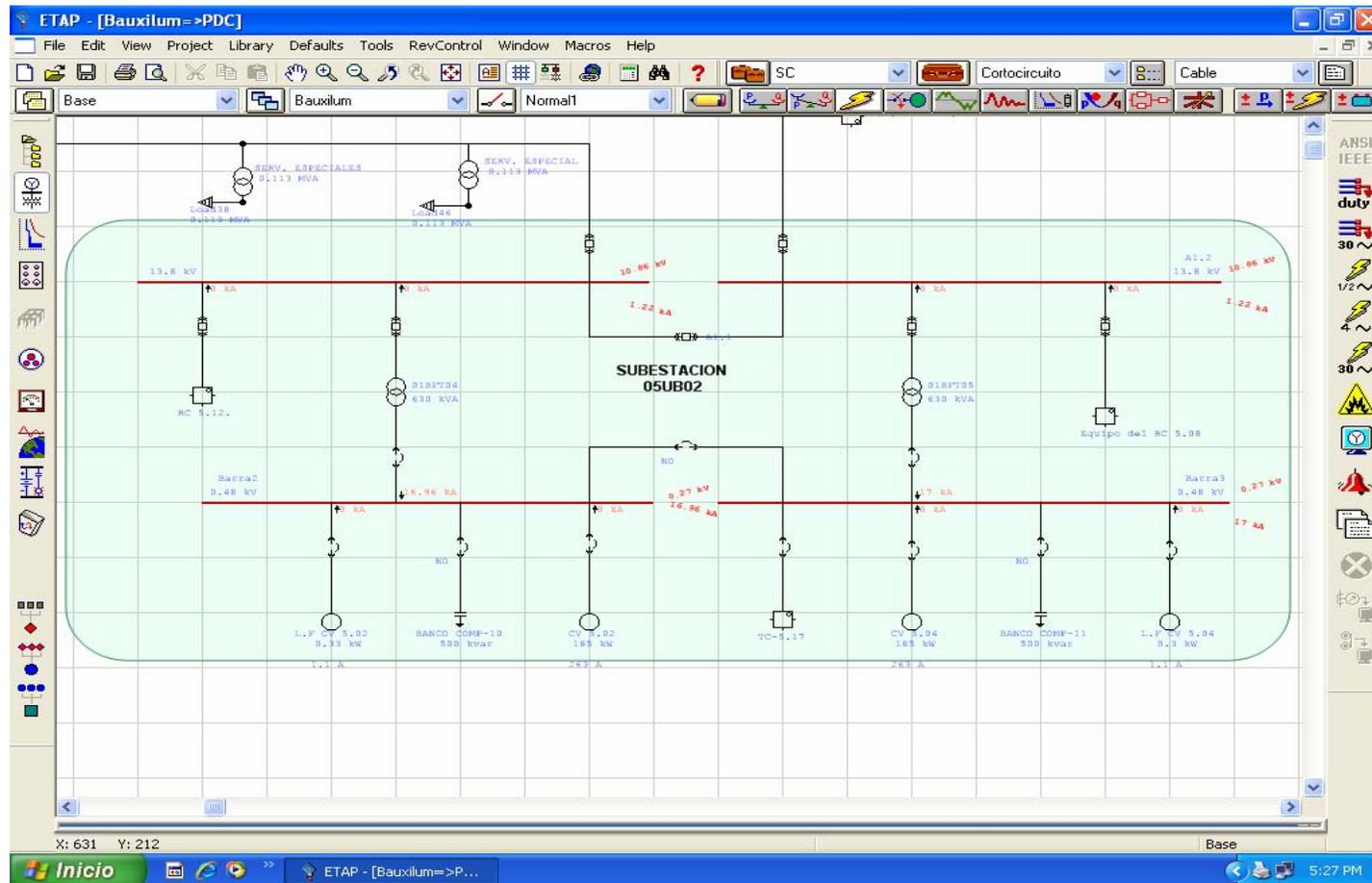


Figura 6.4. Resultados de los niveles de Cortocircuito monofásico en la S/E 05UB02.

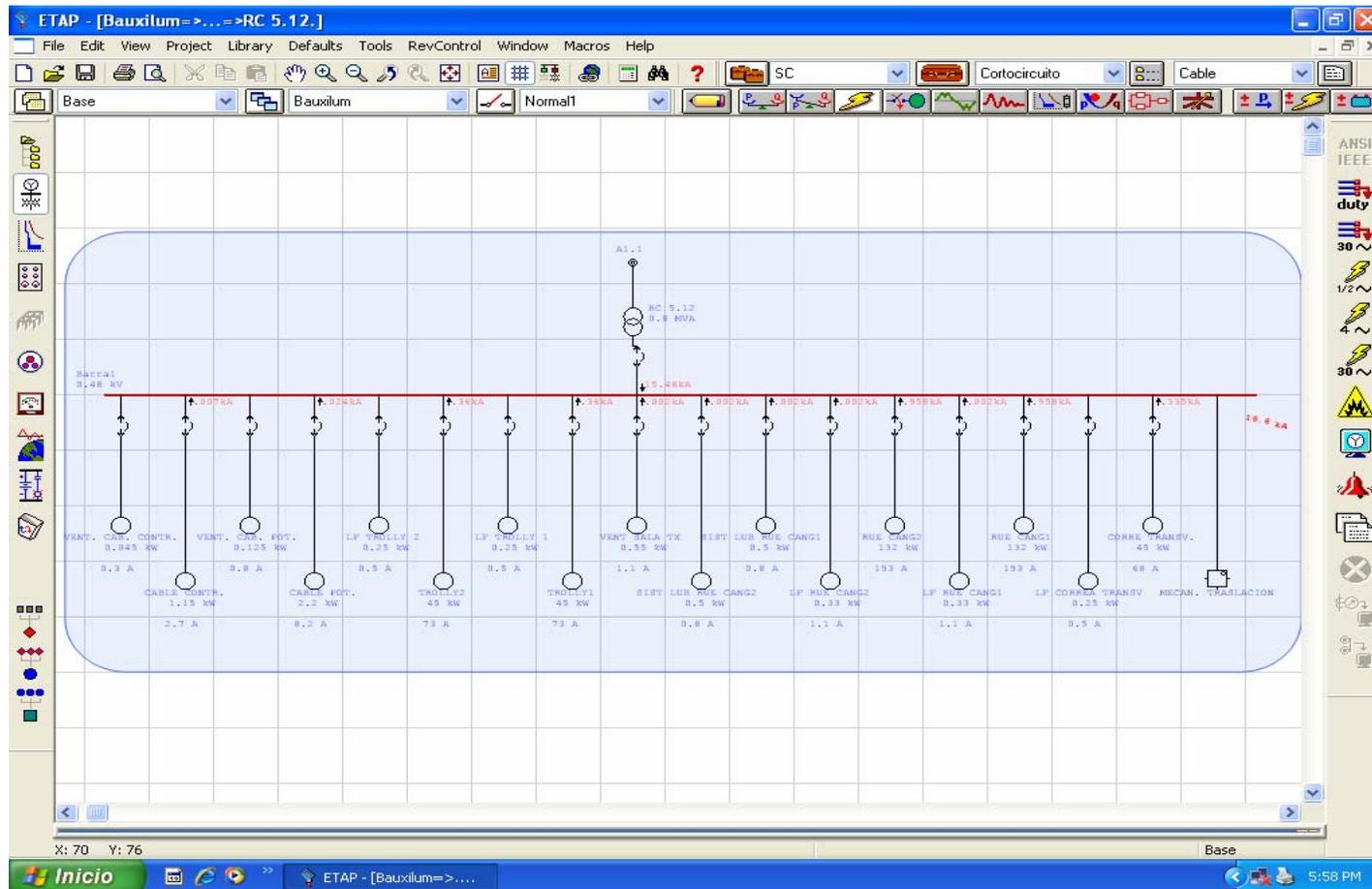


Figura 6.5. Resultados de los niveles de Cortocircuito trifásico del RC 5.12.

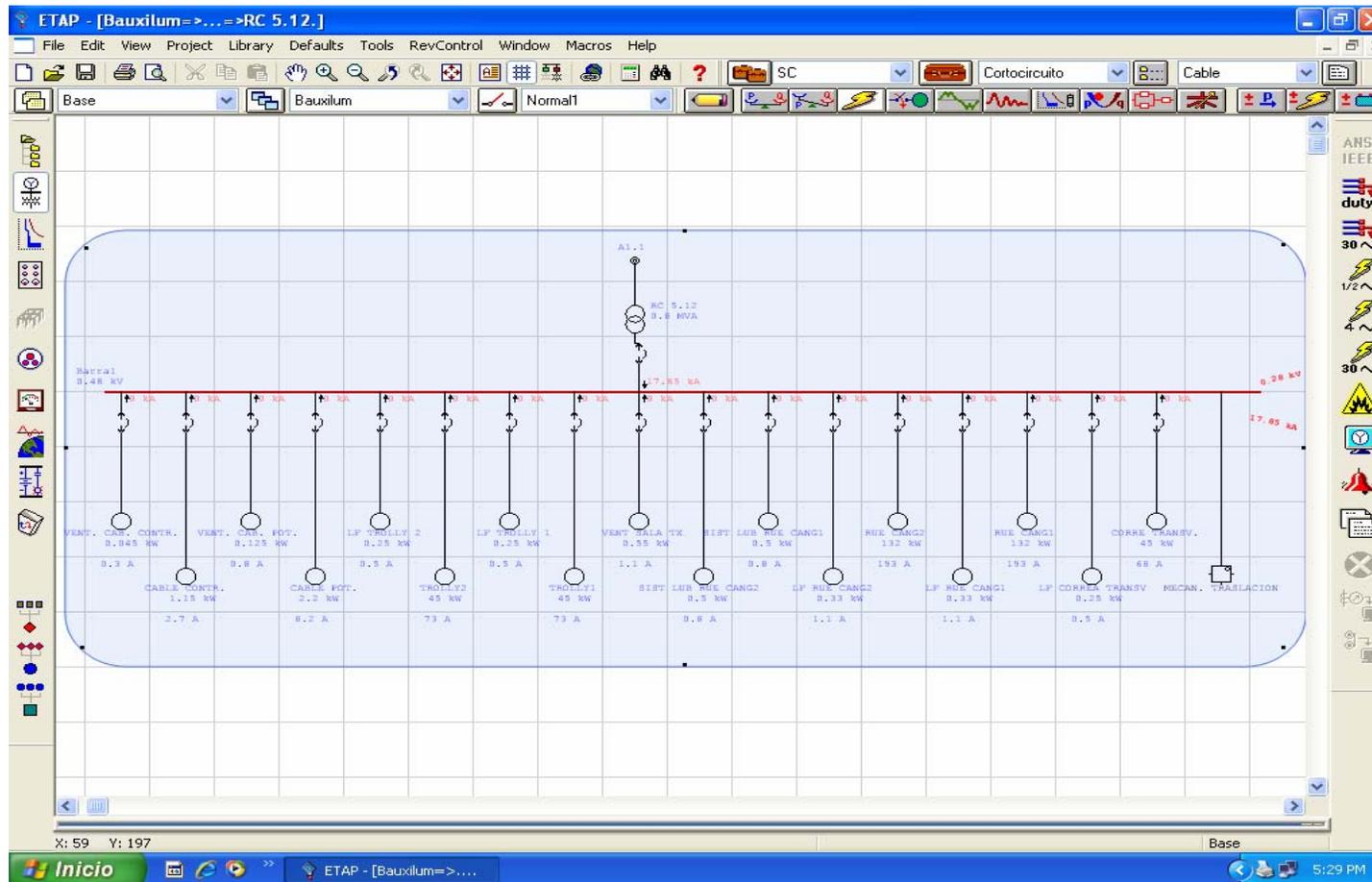


Figura 6.6. Resultados de los niveles de Cortocircuito monofásico del RC 5.12.



Resultados de los Estudios

6.2 Resultados del estudio de Flujo de Carga.

Para este estudio, el aspecto de mayor importancia fue determinar el comportamiento del sistema basados en las variaciones que presenta la subestación Los Pijiguaos a nivel de 115 kV. En primer lugar, se deseaba conocer la distribución de la carga del sistema eléctrico de Pie de Cerro tanto para operación normal y otras posibles operaciones que puede tomar el sistema eléctrico.

En la **tabla 6.3.** se puede apreciar que para el caso # 1, los perfiles de tensión en barra tomando en cuenta la variación de tensión en la S/E Los Pijiguaos a nivel de 115 kV, en algunos casos estos porcentajes arrojados violan los rangos planteados por la **ANSI C84.1 – 2006** tomados en cuenta para la corrida del flujo de carga en el simulador, estos rangos de voltaje plantea un rango máximo de variación marginal del 105% y una variación crítica del 105.8 % y un rango mínimo de variación de 95% la tensión nominal.

Para el caso # 1 la **tabla 6.3.** se puede apreciar que para una variación de voltaje 102 kV y 105 kV en la barra de 115 kV de la S/E Los Pijiguaos, todas las barras presentan una tensión por debajo del valor tolerable por la norma ANSI siendo este un rango mínimo del 95%. El valor de voltaje mínimo arrojado por el simulador para la variación de 102 kV es de 86.612% tomando este valor la Barra 1 y la Barra 4, estando conectadas a estas un conjunto maquinas eléctricas en su mayoría motores que expuestos a estas bajas tensiones en un periodo considerable, serian perjudiciales para el equipo. Para la variación de 109 kV el valor mínimo presentado en las barras es de 89.711% para la Barra 1 y Barra 4 conectados los RC 5.12 y RC 5.08.

Cuando en la Barra de Alta tensión de la S/E Los Pijiguaos presenta un voltaje de 115 kV siendo este el valor ideal, todas las barra del sistema en



Resultados de los Estudios

estudio presentan un tensión dentro de la normativa ya planteada, siendo el valor mínimo de 99.861% en la Barra 2 y Barra 3 y el máximo arrojado es de 102.619% en la barra de 13.8 kV de la S/E 05UB02 la cual están conectadas un grupo de carga considerable. Las otras variaciones tomadas en cuentas por encima de 115 kV para este caso # 1 los valores superan el rango crítico de 105.8% siendo el valor más alto de 114.274% para una variación de tensión de 127 kV.

Es importante destacar que para este caso la carga asociada a los transformadores no superaba su capacidad nominal, y las corrientes de estos tanto para el primario como para el secundario, estaban dentro de los límites tolerables de su corriente nominal.

Tabla 6.3. Resultados del estudio de flujo de carga CASO # 1.

Resultados para el CASO #1 "Demanda Maxima con variaciones en la barra de 115 kV en la S/E Los Pijiguaos Valores de la tensión en barra en porcentaje (%)										
Voltaje (kV)	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 8	S/E 05UB01	S/E 05UB02
102	86.612	88.483	88.483	86.612	87.008	87.013	87.013	87.431	89.536	89.810
105	89.711	91.512	91.512	89.711	90.090	90.097	90.097	90.774	92.529	92.794
109	93.805	95.520	95.520	93.805	94.162	94.171	94.171	94.551	96.494	96.748
115	99.861	101.464	101.464	99.861	100.191	100.201	100.554	100.554	102.380	102.619
121	105.866	107.372	107.372	105.866	106.173	106.184	106.184	106.514	108.236	108.463
125	109.839	111.288	111.288	109.859	110.132	110.145	110.145	110.461	112.121	112.340
127	111.818	113.240	113.240	111.818	112.105	112.118	112.118	112.427	114.058	114.274

Para el CASO #2 se toma en cuenta solo un transformador 20 MVA en la S/E Los Pijiguaos operando estando cerrado el enlace de barra, determinando los niveles de tensión de las barras del sistema bajo estudio observando el comportamiento de los transformadores especialmente el de la S/E los Pijiguaos, ya que de allí se alimentan dos áreas dentro de la producción de la empresa (Mina y Pie de Cerro) además del área residencial



Resultados de los Estudios

(Campamento) donde se encuentra el bloque de apoyo dentro del diagrama de flujo del proceso de producción; además conectadas a esta barra se encuentra el circuito Pijimori, que surte de energía las poblaciones cercanas a la empresa.

Para este caso # 2, los valores de voltaje en las barras del sistema en estudio (**ver tabla 6.4.**) con un voltaje de 115 kV solo las Barra 2, 3, 8 y la de las S/E 05UB01 y 05UB02 están dentro de los valores permitidos pero nunca llegando a su tensión de operación normal. Para una variación de 121 kV los valores entran el rango de tensión recomendado por la norma ANSI superando los rangos de tensión permitidos en barra para las variaciones de 125 y 127 kV.

Es importante resaltar que para este caso el transformador de la subestación presenta sobrecarga cerca de 50%, específicamente con una tensión de 115 kV, es por esto que se realizó otra corrida pero sin el circuito Pijimori (Poblaciones), tomando esta alternativa como medida de contingencia sin detener la producción de la empresa, arrojando aun así una sobrecarga pero de 8.455% pudiendo cubrir esta demanda operando el transformador con ventilación forzada.



Resultados de los Estudios

Tabla 6.4. Resultados del estudio de flujo de carga CASO # 2.

Resultados del CASO # 2 "Sin un transformador de 20 MVA con enlace de barra en la S/E los Pijiguaos" con variaciones dadas Valores de la tensión en barra en porcentaje (%)										
Voltaje (kV)	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 8	S/E 05UB01	S/E 05UB02
102	81.648	83.645	83.645	81.648	82.076	82.078	82.078	82.528	84.760	85.050
105	84.650	86.569	86.569	84.650	85.058	85.063	85.063	85.063	87.645	87.925
109	88.608	90.433	90.433	88.608	88.993	88.3999	88.999	89.406	91.463	91.463
115	94.468	96.170	96.170	94.468	94.822	94.831	94.831	95.207	97.137	97.389
121	100.236	101.834	101.834	100.236	100.565	100.575	100.575	100.927	102.746	102.746
125	104.059	105.594	105.594	104.059	104.373	104.384	104.384	104.721	106.473	106.703
127	105.962	107.467	107.467	105.962	106.269	106.280	106.280	106.610	108.330	108.557

Para los casos restante CASO # 3 (ver tabla 6.5.) y CASO # 4 (ver tabla 6.6.) , los resultados son parecidos a lo del CASO # 1, dado a que la carga desconectada del sistema en estudio afecta a solo dos de las barras donde se puede apreciar que en las Barras 2 y 3 la tensión está por debajo de la tensión nominal pero no violando el rango mínimo de la norma ANSI planteado anteriormente.

Para estos casos directamente relacionados con el proceso dentro del área en estudio, en el caso # 3 el transformador no puede operar con la nueva carga agregada con en el enlace cerrado, ya que este se sobrecargaría, de igual forma sucede para el caso # 4. Los perfiles de tensión están en buen rango para una variación a 115 kV, lo adverso a estos casos planteados es que el proceso de producción dentro del área en estudio disminuiría pero no completamente, haciendo uso de otras contingencias fuera de las eléctricas.



Resultados de los Estudios

Tabla 6.5. Resultados del estudio de flujo de carga CASO # 3.

Resultados para el CASO # 3 "Sin un transformador en la S/E 05UB01 con enlace de barra" y variaciones dadas a nivel de 115 kV Valores de la tensión en barra en porcentaje (%)										
Voltaje (kV)	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 8	S/E 05UB01	S/E 05UB02
102	87.633	89.480	89.480	87.633	87.741	84.959	84.959	88.161	90.247	90.792
105	90.625	92.406	92.406	90.625	90.792	88.064	88.064	91.133	93.150	93.675
109	94.588	96.288	96.288	94.588	94.686	92.161	92.161	95.072	97.005	97.506
115	100.474	102.067	102.067	100.474	100.565	98.221	98.221	100.926	102.745	103.215
121	106.325	107.824	107.824	106.325	106.409	104.220	104.220	106.750	108.468	109.910
125	110.204	111.647	111.647	110.204	110.284	108.186	108.186	110.612	112.270	112.696
127	112.138	113.555	113.555	112.138	112.216	110.161	110.161	112.538	114.167	114.586

Tabla 6.6. Resultados del estudio de flujo de carga CASO # 4.

Resultados para el CASO # 4 "Sin un transformador en la S/E 05UB02 con enlace de barra" y variaciones dadas a nivel de 115 kV Valores de la tensión en barra en porcentaje (%)										
Voltaje (kV)	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 8	S/E 05UB01	S/E 05UB02
102	87.281	87.760	87.760	87.284	88.072	88.078	88.078	88.489	90.568	90.456
105	90.274	90.731	90.731	90.274	91.042	91.050	91.050	91.445	93.456	93.337
109	94.234	94.669	94.669	94.234	94.980	94.989	94.989	95.365	97.291	97.164
115	100.114	100.520	100.520	100.114	100.834	100.844	100.844	101.195	103.009	102.865
121	105.960	106.340	106.340	105.960	106.657	106.669	106.669	106.997	108.711	108.555
125	109.936	110.201	110.201	109.836	110.520	110.533	110.533	110.848	112.501	112.337
127	111.768	112.127	112.127	111.768	112.447	112.460	112.460	112.768	114.394	114.225



Resultados de los Estudios

6.3. Resultados del estudio de Compensación de Reactivos.

El estudio de la compensación de la energía reactiva se baso en el cálculo de la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia del área en estudio, apoyados mediante los valores arrojados por el simulador obteniendo los requerimientos necesarios para una óptima compensación.

Los cálculos se realizaron según los requerimientos de la empresa, partiendo de la factura del año 2008 (ver tabla 6.7.) y siguiendo la metodología planteada, se calculo los valores de los capacitores para el periodo de mantenimiento como para el de producción.

Tabla 6.7. Facturación de la energía consumida por la empresa en el año 2008.

Mes	E (KWH)	Q (KVARH)	S (KVAH)	P (KW)	Q (KVAR)	S (KVA)	PF
Ene	457,121.0	300,433.0	547,009.7	1,202	742.808858	1,413	0.8507
Feb	307,564.0	118,578.0	360,773.2	1,094	822.99757	1,369	0.855
Mar	71,040.0	60,720.0	93,453.7	280	239.324324	368	0.760
Abr	248,194.0	136,918.0	283,455.1	961	347.797355	1,022	0.8756
May	96,051.0	6,111.0	96,245.2	1,025	806.096148	1,304	0.7860
Jun	453,100.0	286,974.0	536,333.6	1,229	740.799568	1,435	0.8564
Jul	558,272.1	489,272.2	742,330.8	1,631	457	1,694	0.9630
Ago	213,272.5	181,908.9	280,314.1	1,192	1,290	1,756	0.6786
Sep	482,999.4	439,090.4	652,754.8	1,317	1,162	1,756	0.7500
Oct	476,726.7	388,908.6	615,238.4	1,129	1,088	1,568	0.7200
Nov	489,272.2	413,999.5	640,923.4	1,255	1,138	1,694	0.7407
Dic	294,817.8	238,363.4	379,123.5	1,066	972	1,443	0.7391



Resultados de los Estudios

Se realizó el cálculo de la energía reactiva necesaria para corregir el factor de potencia del sistema bajo estudio a 0.95. El valor del banco calculado es de 576.46 KVAR, normalizando a 600 KVAR, siendo esta la energía necesaria para compensar el sistema eléctrico de Pie de Cerro en demanda máxima, aumentando el factor de potencia a 0.95 (**ver tabla 6.8.**).

Tabla 6.8. Resultado del cálculo de la energía reactiva para el periodo de producción.

ACTUAL	827.827084	KVAR
CORREGIDO	251.363232	KVAR
NECESARIO	576.463853	KVAR
APROX.	600	KVAR

Para el periodo de mantenimiento tomando en cuenta la facturación del mes de enero hasta junio, la energía reactiva calculada es de 329.40 KVAR normalizando este valor a 350 KVAR (**ver tabla 6.9.**).

Tabla 6.9. Resultado del cálculo de la energía reactiva para el periodo de mantenimiento.

ACTUAL	535.225902	KVAR
CORREGIDO	205.819735	KVAR
NECESARIO	329.406167	KVAR
APROX.	350	KVAR

Partiendo de los resultados obtenidos mediante el cálculo, se puede decir que lo necesario para la compensación del sistema estará conformada por un banco de capacitor de 600 KVAR de dos paso, siendo el primer paso permanente de 350 KVAR requerido para el periodo de mantenimiento y el segundo paso sería de 250 KVAR, este entraría en operación comenzando el



Resultados de los Estudios

periodo de producción, siendo la sumatoria de ambos de 600 KVAR. De esta forma evitaríamos la sobre compensación para el periodo de mantenimiento.

Los resultados arrojados por el simulador Etap 5.03 están planteados de igual forma para realizar la corrección del factor de potencia, este realiza una compensación combinada. La **tabla 6.10.** muestra los las barras con el valor del banco de capacitor necesario para una compensación mas optima.

Tabla 6.10. Resultado de la energía reactiva arrojados por el simulador ETAP 5.03

Barras	KVAR/Banco	Nivel de voltaje (kV)
Barra 1	100	0.48
Barra 3	100	0.48
Barra 4	100	0.48
Barra 5	100	0.48
Barra 7	100	0.48
Barra 8	100	0.48
BusDistrib.	100	13.8

Cabe resaltar que la sumatoria de los KVAR necesarios según el simulador es de 700 KVAR, es decir, 100 KVAR por encima del valor calculado, siendo 600 KVAR para baja tensión y 100 KVAR para la 13.8 kV, esto debido a que la metodología para realizar una compensación combinada es diferente a compensar de manera global, dado que para la combinada se toman en cuenta otros factores, como grupo de cargas importantes, la compensación comienza desde aguas abajo viendo el comportamiento del sistema hasta llegar a aguas arriba, descartando la facturación del consumo del sistema.

En la actualidad hay empresas fabricantes de banco de capacitores para compensar y diferentes niveles de tensión según la necesidad del



Resultados de los Estudios

cliente. Para determinar el tipo de compensación a instalar bancos estáticos o automáticos se deben de tomar en cuentas muchos factores técnicos como económicos, cumpliendo con la necesidad planteada.



Conclusiones y Recomendaciones

CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones.

- Los dispositivos de protección instalados soportan las corrientes de cortocircuito que se puedan producir.
- El sistema eléctrico de Pie de Cerro opera dentro de los rangos permitidos por la norma ANSI C84.1 – 2006 sin ocurrir variaciones en la S/E Los Pijiguaos fuera de los rangos tolerables del $\pm 5\%$.
- Para el Caso #2 el transformador de 20 MVA no cubre con la demanda, por estar sobrecargado en un 50%. Si se realiza la maniobra de abrir el circuito Pijimori, el transformador aun continua sobrecargado pero solo en un 8.455%, pero el transformador si puede cubrir esta carga si se opera con ventilación forzada.
- Las variaciones en la S/E los Pijiguaos afectan directamente al sistema eléctrico de Pie de Cerro ocasionando fluctuaciones del voltaje, además de estas fluctuaciones en el sistema, también se encuentra presente los bajos voltajes de corta duración, que consisten en la reducción de la magnitud del voltaje seguida de una recuperación luego de un corto periodo de tiempo.
- La compensación de energía reactiva se llevo a cabo tomando en cuenta dos periodos de operación de la empresa, ya que la demanda de carga reactiva varía dependiendo el periodo de operación, evitando de esta manera la sobre compensación del sistema, específicamente en el periodo de mantenimiento.
- La compensación realizada por el simulador ETAP 5.03, presentó una compensación combinada, en el cual se compensaba de dos diferentes maneras, reflejándose una compensación parcial a nivel de 0.48 kV para el conjunto de motores que conforman los apiladores y recuperadores, y una compensación global de 100



Conclusiones y Recomendaciones

- KVAR a nivel de 13.8 kV para optimizar la compensación y con ello corregir el factor de potencia, para disminuir la caída de tensión.

7.2 Recomendaciones.

- Realizar el estudio de coordinación de protecciones a partir de los estudios de cortocircuito y flujo de carga, tomando en cuentas las variaciones de voltajes, así como sus fluctuaciones de corta duración.
- Realizar una metodología de contingencias, en caso que el sistema eléctrico opere en condiciones de emergencia.
- Realizar un estudio de confiabilidad del sistema, para aplicar algunas metodologías en pro de mejorar la operación del sistema eléctrico.
- Realizar una compensación combinada, ya que ésta aporta mejores ventajas tanto técnicas como económicas a diferencia de la compensación global.
- Evaluar el tipo de compensación a colocar tanto la estática como la automática, partiendo de las condiciones de operación actual, incluyendo la presencia de bajos voltajes de corta duración ya que los bancos de capacitores son vulnerables a estos eventos si no cuentan con un sistema de protección adecuado.



Conclusiones y Recomendaciones

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] A. Salazar, “**Evaluación y Rediseño del Sistema Eléctrico de Bauxiven**”. Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad de Oriente, Venezuela. (Julio de 1994).
- [2] L. Gómez, “**Estudio del Sistema Eléctrico de Potencia, Mediante Métodos Normalizados y uso de Herramientas Computacionales, en el Área de Trituración de CVG Bauxilum**”. Tesis de grado, Departamento de electricidad, UNEXPO, Venezuela. (Diciembre de 2007).
- [3] R. Lira, “**Estudio de las Perturbaciones de Voltaje en el Sistema de Alimentación de 4160 Voltios por los Motores de Inducción Ubicados en el Área de Trituración de las Minas de CVG Bauxilum en los Pijiguaos Estado Bolívar**”. Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad de Oriente, Venezuela. (Noviembre de 2007).
- [4] R Espinosa, “**Sistemas de Distribución**”. 1ra Edición, Editorial Limusa, México, (1990).
- [5] J García, “**Instalaciones Eléctricas en media, y baja tensión**”. 1ra Edición, Editorial Paraninfo, España, (1999).
- [6] STEVENSON, WILLIAM JR, “**Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia**”. 2da Edición, Mc Graw – Hill, México, (1994).
- [7] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practices for Electric Power Systems in Commercial Buildings**. IEEE Std. 241 (1990).
- [8] CUADERNO TECNICO N° 158 SCHNEDER ELECTRIC ESPAÑA S.A, **Cálculo de corrientes de cortocircuito**. Versión Española, (septiembre 2000).
- [9] S. Martínez, “**Estudio para la reducción de la frecuencia de interrupción en el sistema eléctrico del edificio “Petróleos de Venezuela”**”. Tesis de grado, Departamento de electricidad, Instituto



Bibliografía

Universitario Politécnico de las Fuerzas Armadas Nacionales, Venezuela. (Mayo 1997).

[10] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practices for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems**. IEEE Std. 242 (1986).

[11] A. Acosta, “**Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia**”. (1ra Edición) Publicado en la Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica. (Julio 1991).

[12] J. Pérez Retamales, “**Flujo de Potencia Óptimo con Programación Cuadrática Secuencial**”. Tesis para optar al grado de Magister en gerencia de operaciones. Departamento de ingeniería industrial. Universidad de Chile. (Octubre de 2001).

[13] J. Bermúdez, “**Análisis de Flujo de Carga en Sistemas Eléctricos de Potencia**”. (VERSION B) Publicado en la Universidad Simón Bolívar, Departamento de Conversión y Transporte de Energía. (Enero 1994).

[14] Y. Crespo, “**Estudio de Factibilidad técnica para la instalación de generación distribuida mediante grupo electrógeno Guascor en la Subestación El Rincón Estado Anzoátegui**”. Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad de Oriente, Venezuela. (Mayo de 2008).

[15] Telergia “**Factor de Potencia, conocimientos básicos importantes para tener en cuenta en la carga de un Site/Radiobase de Telecomunicaciones y para el optimo funcionamiento de la planta eléctrica Grupo Electrónico**” <http://www.telergia/Factor de Potencia, conocimientos básicos importantes para tener en cuenta en la carga de un Site/Radiobase de Telecomunicaciones y para el optimo funcionamiento de la planta eléctrica Grupo Electrónico.htm> (3 de Junio de 2008).



Bibliografía

- [16] MANUAL DEL ELECTRICISTA SCHNEIDER ELECTRIC S.A, “Compensación de Energía Reactiva”. (Capitulo 2), Versión Española. (Febrero 2003).



Bibliografía

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

TÍTULO	Estudio de Cortocircuito, Flujo de Carga y Compensación de Reactivos del Circuito Eléctrico de Producción de Pie de Cerro en CVG BAUXILUM Los Pijiguaos, Municipio Cedeño-Estado Bolívar
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
JULIO CÉSAR VELÁSQUEZ DUCAYIN	CVLAC: 16.068.688 E MAIL:Julio.vducayin@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

CORTOCIRCUITO

FLUJO DE CARGA

COMPENSACIÓN

REACTIVOS

BAUXILUM

ESTUDIO

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Eléctrica

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo describe los estudios de Cortocircuito, Flujo de Carga y Compensación de Reactivos para el sistema eléctrico de Pie de Cerro perteneciente a C.V.G Bauxilum-Mina ubicada en Los Pijiguaos estado Bolívar. La metodología utilizada fue la propuesta por las prácticas recomendadas de la IEEE Std. 242 "Protección y coordinación de sistemas eléctricos industriales y comerciales", junto a esta metodología se utilizó para los cálculos de cortocircuito el método de los MVA calculando la potencia de cortocircuito.

Se realizó el levantamiento del sistema eléctrico para así conocer detalladamente la carga instalada del circuito en estudio y familiarizarse con los criterios utilizados por C.V.G Bauxilum-Mina para la realización de proyectos dibujando y actualizando el sistema eléctrico utilizando la herramienta computacional Autocad 2007.

Posteriormente, se realizó el estudio de Cortocircuito en las distintas condiciones de operación, permitiendo conocer los niveles de las corrientes de cortocircuitos en cada una de las barras del sistema, para que la empresa aplique metodologías en un futuro a corto o mediano plazo para mejorar las condiciones del sistema.

A continuación, se realizó el estudio de flujo de carga completo tomando en cuenta las distintas condiciones de operación que puede tomar el sistema bajo estudio, permitiendo conocer la distribución de la carga del circuito eléctrico de Pie de Cerro, así como las corrientes de operación de los equipos de potencia.

Por último, se llevó a cabo el estudio de Compensación de Reactivos permitiendo determinar la carga reactiva necesaria para mejorar las condiciones de operación del sistema y corregir el factor de potencia.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
SUAREZ, LUIS	AS	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
ESCALANTE, SANTIAGO	JU	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
RODRIGUEZ, PEDRO	JU	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

09	03	30
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:
ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.JULIOVELASQUEZ.DOC	APPLICATION/MSWORD

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D
E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r
s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:
INGENIERO ELECTRICISTA

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:
PREGRADO

ÁREA DE ESTUDIO:
INGENIERÍA ELÉCTRICA

INSTITUCIÓN:
UNIVERSIDAD DE ORIENTE NUCLEO ANZOÁTEGUI

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO:

Los trabajos son propiedad exclusiva de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento expreso del Consejo de Núcleo respectivo, quien participará al Consejo de Universidades.

Julio Cesar Velásquez Ducayin

AUTOR

Prof. Luis Suarez

TUTOR

Prof. Pedro Rodríguez

JURADO

Prof. Santiago Escalante

JURADO

Prof. Verena Mercado

POR LA SUBCOMISION DE TRABAJO DE GRADO