



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

## **“ESTUDIOS DE COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES POR MÉTODOS COMPUTARIZADOS APLICADOS A LA CENTRAL TÉRMICA TRINITARIA”**

**INFORME DE MATERIA DE GRADUACIÓN**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIZACIÓN POTENCIA**

Presentado por:

**PEDRO ROBERTO AGUIRRE MARRET  
LEONARDO MARCELO LÓPEZ CÁCERES  
JOSÉ MANUEL ZAMBRANO CAÑIZARES**

Guayaquil - Ecuador  
Año: 2012

## AGRADECIMIENTO

A nuestro Señor Dios Todopoderoso, por bendecirnos y habernos dado la sabiduría y la fortaleza para que nos fuera posible alcanzar este triunfo y sueño anhelado.

A nuestros padres, por su amor, apoyo, dedicación, comprensión y confianza que nos ayudan a ser mejores personas cada día de nuestras vidas.

A nuestro director de tesis, Ing. Juan Saavedra, por su apoyo y guía durante todo el tiempo de realización de la tesis. A nuestros profesores, quienes aportaron con sus conocimientos y experiencias, en nuestra formación durante toda nuestra carrera profesional.

A la Central Térmica Trinitaria, que nos abrió sus puertas para proporcionarnos con amabilidad y gentileza, importante información técnica para el desarrollo de la tesis.

***“Nunca dejes de dar las gracias, aunque la confianza te haga pensar que sobran”***

## **DEDICATORIA**

### **Pedro Aguirre M.**

Dedico este trabajo a mi familia, a mis padres que me supieron apoyar en todo momento y siempre estuvieron conmigo, este trabajo es un esfuerzo compartido.

### **Leonardo López C.**

Dedico este proyecto de tesis a Dios por acompañarme en cada paso que doy dándome fortaleza para continuar; a mis padres, en especial a la memoria de mi padre Severo López, quienes me han apoyado, brindado su cariño y confianza a lo largo de mi vida siendo los pilares fundamentales de apoyo en todo momento.

### **José Zambrano C.**

Dedico este trabajo a mi madre, Yolanda, por tu amor, apoyo y por nunca dejar de confiar en mí, te quiero mucho madre; a mi esposa, María Carmen, por tu amor, paciencia y comprensión, te amo mucho cielo; a mi angelito Nicolás, eres lo más bello que Dios me ha dado en mi vida, te amo mucho hijo mío.

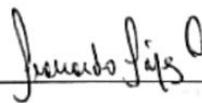
## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este informe final de graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)



Pedro Aguirre M.



Leonardo López C.

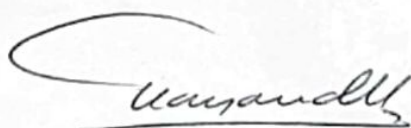


José Zambrano C.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Saavedra', is positioned above a horizontal line.

Ing. Juan Saavedra  
Profesor de la Materia de Graduación

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Layana', is positioned above a horizontal line.

Ing. José Layana  
Profesor Delegado por la Unidad Académica

## **RESUMEN**

El presente estudio abarca el análisis del sistema eléctrico de la Central Térmica Trinitaria, se realizó el estudio de Flujo de Potencia para determinar el estado actual del sistema y verificar que el Generador sea capaz de suplir toda la carga conectada a sus barras sin contar con la aportación del Sistema Nacional Interconectado S.N.I.; adicionalmente, se realizó el estudio de cortocircuito para conocer las corrientes máximas y mínimas de falla que circulan por el sistema eléctrico con la finalidad de determinar, el ajuste correcto de las protecciones eléctricas de la Central.

## ÍNDICE GENERAL

### INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO 1

|                                                                 |          |
|-----------------------------------------------------------------|----------|
| <b>DESCRIPCIÓN DE LAS INTALACIONES.....</b>                     | <b>1</b> |
| 1.1 Insumos principales usados en la Central.....               | 2        |
| 1.2 Datos técnicos principales del Generador.....               | 4        |
| 1.3 Datos técnicos principales de la Turbina.....               | 7        |
| 1.4 Datos técnicos principales del Sistema de Excitación.....   | 9        |
| 1.5 Datos técnicos principales del Transformador Principal..... | 9        |
| 1.6 Principio de operación de la Central.....                   | 12       |

### CAPÍTULO 2

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA.....</b>                 | <b>14</b> |
| 2.1 Criterios Adoptados para el Estudio.....          | 14        |
| 2.1.1 Flexibilidad Operacional.....                   | 14        |
| 2.1.2 Niveles de Confiabilidad.....                   | 14        |
| 2.1.3 Niveles de Sobrecarga.....                      | 15        |
| 2.1.4 Regulación de Voltaje.....                      | 15        |
| 2.2 Análisis de Casos.....                            | 15        |
| 2.3 Datos del Sistema.....                            | 16        |
| 2.3.1 Diagrama unifilar.....                          | 16        |
| 2.3.2 Datos de barras de carga.....                   | 16        |
| 2.3.3 Datos de líneas y conductores.....              | 17        |
| 2.3.4 Datos de Transformadores de Fuerza.....         | 19        |
| 2.4 Resultados de los Estudios de Flujo de Carga..... | 20        |
| 2.4.1 Casos Base.....                                 | 20        |
| 2.4.1.1 Carga de conductores.....                     | 21        |
| 2.4.1.2 Voltajes en barras.....                       | 22        |

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 2.4.1.3 Carga de los Transformadores.....  | 23 |
| 2.5 Conclusiones del Estudio de Flujo..... | 23 |

### **CAPÍTULO 3**

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO.....</b>                          | <b>25</b> |
| 3.1 Alcance de los Estudios de Corto Circuito.....             | 26        |
| 3.2 Datos del Sistema.....                                     | 27        |
| 3.2.1 Impedancia de los Generadores.....                       | 27        |
| 3.2.2 Impedancias Equivalentes en el Punto de Entrega de SNI.. | 27        |
| 3.2.2.1 MVA de Corto Circuito.....                             | 28        |
| 3.2.2.2 Impedancias Equivalentes.....                          | 28        |
| 3.2.3 Datos de Conductores.....                                | 29        |
| 3.3 Datos de Transformadores de Fuerza.....                    | 29        |
| 3.4 Resultados de los Estudios de Corto Circuito.....          | 29        |
| 3.4.1 Caso Base.....                                           | 29        |
| 3.4.1.1 Corriente de Falla en cada Barra.....                  | 30        |
| 3.4.1.2 Capacidad de Interrupción.....                         | 32        |
| 3.5 Conclusiones y Recomendaciones.....                        | 32        |

### **CAPÍTULO 4**

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES.....</b>                    | <b>34</b> |
| 4.1 Esquema de Protecciones.....                                | 35        |
| 4.1.1 Relés de Protección de la Central Térmica Trinitaria..... | 35        |
| 4.1.1.1 Relés de Protección para el Generador.....              | 35        |
| 4.1.1.2 Relés de Protección para el Transformador.....          | 35        |
| Principal.                                                      |           |
| 4.1.1.3 Relés de Protección para el Transformador.....          | 36        |
| de Servicios Auxiliares.                                        |           |
| 4.2 Ajuste y Coordinación de las Protecciones.....              | 36        |
| 4.2.1 Protecciones del Generador.....                           | 36        |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1.1 Relé Diferencial del Generador (87 G).....        | 36 |
| 4.2.1.1.1 Datos Técnicos del Relé Tipo RADHA.....         | 39 |
| 4.2.1.1.2 Ajustes del relé tipo RADHA.....                | 42 |
| 4.2.1.2 Relé de secuencia negativa del Generador.....     | 43 |
| (46 G).                                                   |    |
| 4.2.1.2.1 Datos técnicos del relé tipo RARIB 2.....       | 49 |
| 4.2.1.2.2 Ajustes del relé tipo RARIB 2.....              | 49 |
| 4.2.1.3 Relé de pérdida de excitación de Generador.....   | 54 |
| (40 G).                                                   |    |
| 4.2.1.3.1 Datos técnicos del relé tipo RAGPC.....         | 58 |
| 4.2.1.3.2 Ajustes del relé tipo RAGPC.....                | 58 |
| 4.2.1.4 Relé de retorno de energía del Generador.....     | 62 |
| (32 G).                                                   |    |
| 4.2.1.4.1 Datos técnicos del relé tipo RXPE 40.....       | 66 |
| 4.2.1.4.2 Ajustes del relé tipo RXPE 40.....              | 67 |
| 4.2.1.5 Relé de sobretensión del Generador (59 G).....    | 68 |
| 4.2.1.5.1 Datos técnicos del relé tipo RXEG 21.....       | 70 |
| 4.2.1.5.2 Ajustes del relé tipo RXEG 21.....              | 70 |
| 4.2.1.6 Relé de mínima tensión del Generador (27 G).....  | 72 |
| 4.2.1.6.1 Datos técnicos del relé tipo RXEG 21.....       | 72 |
| 4.2.1.6.2 Ajustes del relé tipo RXEG 21.....              | 73 |
| 4.2.1.7 Relé de baja frecuencia del Generador (81 G)..... | 74 |
| 4.2.1.7.1 Datos técnicos del relé tipo RXFE 4.....        | 76 |
| 4.2.1.7.2 Ajustes del relé tipo RXFE 4.....               | 76 |
| 4.2.1.8 Relé de desequilibrio de tensiones (60 G).....    | 77 |
| 4.2.1.8.1 Datos técnicos del relé tipo RXBA 4.....        | 78 |
| 4.2.1.8.2 Ajustes del relé tipo RXBA 4.....               | 80 |
| 4.2.1.9 Relé de falla a tierra estator 100% (64 SG).....  | 81 |
| 4.2.1.9.1 Datos técnicos del relé tipo RAGEA.....         | 85 |
| 4.2.1.9.2 Ajustes del relé tipo RAGEA.....                | 86 |
| 4.2.1.10 Relé de impedancia del Generador (21 G).....     | 89 |

|                                                                               |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.1.10.1 Datos técnicos del relé tipo RAKZB.....                            | 91         |
| 4.2.1.10.2 Ajustes del relé tipo RAKZB.....                                   | 92         |
| 4.2.2 Protecciones del Transformador Principal.....                           | 96         |
| 4.2.2.1 Relé Diferencial Generador-Transformador.....<br>(87 GT).             | 96         |
| 4.2.2.1.1 Datos Técnicos del Relé Tipo RADSBB.....                            | 101        |
| 4.2.2.1.2 Ajustes del Relé Tipo RADSBB.....                                   | 102        |
| 4.2.2.2 Relé de Sobre-Intensidad del Transformador.....<br>Principal (51 MT). | 104        |
| 4.2.2.2.1 Datos Técnicos del Relé Tipo RACID.....                             | 107        |
| 4.2.2.2.2 Ajustes del Relé Tipo RACID.....                                    | 110        |
| 4.3 Coordinación de las Protecciones del Sistema.....                         | 111        |
| 4.4. Resumen de Ajustes.....                                                  | 115        |
| 4.5 Matriz de Disparos.....                                                   | 116        |
| 4.6 Conclusiones y Recomendaciones.....                                       | 116        |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES.....</b>                            | <b>118</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1  | Vista de la Central Térmica Trinitaria.....                                                                                                                                                                                                                  | 2  |
| Figura 1.2  | Diagrama de Flujo de la Central Térmica Trinitaria.....                                                                                                                                                                                                      | 11 |
| Figura 2.1  | Diagrama Unifilar de la Central Térmica Trinitaria.....<br>en el S.N.I.                                                                                                                                                                                      | 16 |
| Figura 2.2  | Flujo de Carga de la Central Térmica Trinitaria.....                                                                                                                                                                                                         | 21 |
| Figura 4.1  | Principio de aplicación del relé de Alta.....<br>Impedancia.                                                                                                                                                                                                 | 37 |
| Figura 4.2  | Curvas característica corriente-voltaje para las.....<br>Resistencias no Lineales.                                                                                                                                                                           | 41 |
| Figura 4.3  | Gama de operación de la protección RARIB 2.....                                                                                                                                                                                                              | 48 |
| Figura 4.4  | Curvas de capacidad térmica de un Generador.....<br>Típico.                                                                                                                                                                                                  | 55 |
| Figura 4.5  | Principio del circuito de disparo del RAGPC.....                                                                                                                                                                                                             | 57 |
| Figura 4.6  | Curva de tiempo de operación del relé.....<br>direccional RXPE 40.                                                                                                                                                                                           | 57 |
| Figura 4.7  | Diagrama Vectorial con líneas de funcionamiento.....<br>del relé direccional, con $\alpha = 0^\circ$ . Opera cuando<br>$I \cos(\varphi) \geq I$ .                                                                                                            | 63 |
| Figura 4.8  | El valor de funcionamiento $I \cos \varphi$ expresado como.....<br>múltiplo del ajuste de la escala, para diferentes<br>valores de la tensión alterna U medida en porcentaje<br>de la tensión nominal $U_n$ , para diferentes ángulos<br>de fase $\varphi$ . | 65 |
| Figura 4.9  | Curvas de tiempo de operación.....                                                                                                                                                                                                                           | 66 |
| Figura 4.10 | Aplicación del RXBA 4 en transformadores de.....<br>potencial con dos devanados.                                                                                                                                                                             | 77 |
| Figura 4.11 | Generador puesto a tierra con alta impedancia.....                                                                                                                                                                                                           | 81 |

|             |                                                                  |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.12 | Característica Circular MHO desplazada o lenta.....              | 90  |
|             | Modificada con $60^\circ$ o $75^\circ$ .                         |     |
| Figura 4.13 | Curva de operación normalmente usada, $\alpha = 60^\circ$ ,..... | 91  |
|             | $Z_r = -Z_f$ .                                                   |     |
| Figura 4.14 | RAZKB, Protección de respaldo de cortocircuito.....              | 93  |
|             | para el Generador.                                               |     |
| Figura 4.15 | Principio esquemático de un relé diferencial para.....           | 97  |
|             | un Transformador de Poder.                                       |     |
| Figura 4.16 | Conexión del RADSB en un Transformador de.....                   | 99  |
|             | Poder de conexión Dy11.                                          |     |
| Figura 4.17 | Características de operación tiempo-corriente.....               | 103 |
| Figura 4.18 | Esquema Lógico de un relé de sobrecorriente.....                 | 104 |
| Figura 4.19 | Curvas de operación de un relé de tiempo.....                    | 108 |
|             | Normal Inverso.                                                  |     |

## ÍNDICE DE TABLAS

|            |                                                                      |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1  | Tanques de almacenamiento de combustible.....                        | 4  |
| Tabla 1.2  | Datos Generales del Generador.....                                   | 5  |
| Tabla 1.3  | Datos de Diseño del Generador.....                                   | 5  |
| Tabla 1.4  | Datos de Reactancias del Generador.....                              | 6  |
| Tabla 1.5  | Datos de constantes de tiempo del Generador.....                     | 6  |
| Tabla 1.6  | Datos de Eficiencias a factor de potencia nominal.....               | 6  |
| Tabla 1.7  | Otros datos técnicos del Generador.....                              | 7  |
| Tabla 1.8  | Datos técnicos de la Turbina.....                                    | 7  |
| Tabla 1.9  | Datos técnicos del Generador de Vapor y.....<br>Condensador.         | 8  |
| Tabla 1.10 | Datos técnicos principales del Sistema de.....<br>Excitación.        | 9  |
| Tabla 1.11 | Datos técnicos del Transformador Principal de la.....<br>Central.    | 10 |
| Tabla 2.1  | Datos de Barras de Carga.....                                        | 17 |
| Tabla 2.2  | Datos Calibre y Tipos de Conductores en Líneas.....                  | 17 |
| Tabla 2.3  | Datos de Capacidades de Líneas.....                                  | 18 |
| Tabla 2.4  | Datos de Impedancias de Líneas.....                                  | 18 |
| Tabla 2.5  | Datos de Transformadores de Fuerza.....                              | 19 |
| Tabla 2.6  | Datos de Voltajes en Barras – Cara Máxima.....                       | 21 |
| Tabla 2.7  | Datos de Carga de los Conductores.....                               | 22 |
| Tabla 2.8  | Datos de Carga de los Transformadores de Fuerza.....                 | 23 |
| Tabla 3.1  | Corrientes y MVA de Corto Circuito.....                              | 28 |
| Tabla 3.2  | Impedancias Equivalentes.....                                        | 28 |
| Tabla 3.3  | Corriente de falla trifásica en cada barra del.....<br>Sistema.      | 30 |
| Tabla 3.4  | Corriente de Falla Línea a Tierra en cada barra.....<br>del Sistema. | 31 |

|            |                                                                  |    |
|------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.5  | Corriente de Interrupción.....                                   | 32 |
| Tabla 4.1  | Datos técnicos principales del relé tipo.....<br>RADHA (87 G).   | 39 |
| Tabla 4.2  | Curva Característica según el Valor Us.....                      | 41 |
| Tabla 4.3  | Ajuste del relé tipo RADHA.....                                  | 43 |
| Tabla 4.4  | Valores típicos para Generadores.....                            | 46 |
| Tabla 4.5  | Datos técnicos principales del relé tipo.....<br>RARIB 2.        | 49 |
| Tabla 4.6  | Ajustes del relé tipo RARIB 2.....                               | 53 |
| Tabla 4.7  | Datos técnicos principales del relé tipo RAGPC.....              | 58 |
| Tabla 4.8  | Ajuste del relé Tipo RAGPC.....                                  | 62 |
| Tabla 4.9  | Datos técnicos principales del relé tipo RXPE 40.....            | 67 |
| Tabla 4.10 | Ajuste del relé tipo RXPE 40.....                                | 68 |
| Tabla 4.11 | Datos técnicos principales del relé tipo.....<br>RXEG 21.        | 70 |
| Tabla 4.12 | Ajuste del relé tipo RXEG 21.....                                | 71 |
| Tabla 4.13 | Datos técnicos principales del relé tipo.....<br>RXEG 21.        | 73 |
| Tabla 4.14 | Ajuste del Relé tipo RXEG 21.....                                | 74 |
| Tabla 4.15 | Datos técnicos principales del relé tipo RXFE 4.....             | 76 |
| Tabla 4.16 | Ajuste del Relé Tipo RXFE 4 (baja frecuencia).....               | 76 |
| Tabla 4.17 | Datos técnicos principales del relé (60A G).....<br>tipo RXBA 4. | 78 |
| Tabla 4.18 | Datos técnicos principales del relé (60B G).....<br>tipo RXBA 4. | 79 |
| Tabla 4.19 | Ajuste del relé tipo RXBA 4.....                                 | 81 |
| Tabla 4.20 | Datos técnicos principales del relé tipo RAGEA.....              | 85 |
| Tabla 4.21 | Ajustes del relé tipo RAGEA.....                                 | 89 |
| Tabla 4.22 | Datos técnicos principales del relé tipo RAKZB.....              | 92 |
| Tabla 4.23 | Ajuste del relé tipo RAKZB.....                                  | 95 |

|            |                                                          |     |
|------------|----------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 4.24 | Datos técnicos principales del relé tipo RADSB.....      | 101 |
| Tabla 4.25 | Valores Recomendados de Ajustes de la.....               | 102 |
|            | Operación no Restringsida.                               |     |
| Tabla 4.26 | Tiempos de operación del relé tipo RADSB.....            | 103 |
| Tabla 4.27 | Ajustes del relé tipo RADSB.....                         | 104 |
| Tabla 4.28 | Datos técnicos principales del relé tipo RACID.....      | 107 |
| Tabla 4.29 | Constantes de ajuste del relé según Norma IEC.....       | 109 |
| Tabla 4.30 | Ajuste del relé tipo RACID 51 MT.....                    | 111 |
| Tabla 4.31 | Resumen de Ajustes de la Central Térmica Trinitaria..... | 115 |
| Tabla 4.32 | Matriz de Disparos de la Central Térmica Trinitaria..... | 116 |

# INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde al proyecto de graduación “Estudio de la Coordinación de las Protecciones por Métodos Computarizados Aplicados a la Central Térmica Trinitaria”.

El capítulo 1 describe en forma general las instalaciones eléctricas existentes en la Central de Generación. Se detallan las características técnicas del Generador, Turbina, Sistema de Excitación y Transformador Principal. También se describe brevemente el principio de operación de la Central.

El capítulo 2 muestra el estudio de flujo de carga de la Central considerando la carga máxima como caso base, se muestran los resultados de carga de los conductores, carga de los transformadores de poder como también, los voltajes de cada barra del sistema.

El capítulo 3 presenta el estudio de cortocircuito para la Central, determinando las corrientes de falla trifásica como también de falla fase a tierra en cada barra del sistema de la Central. Este estudio es de vital importancia para la futura coordinación de las protecciones eléctricas.

El capítulo 4 presenta el esquema de protección aplicado a la Central Térmica Trinitaria, donde se indican las posiciones de cada relé según su protección con respecto al generador y al transformador principal. Los ajustes

de la mayoría de los relés del esquema de protección son determinados de conformidad a las especificaciones técnicas y procedimientos recomendados por el fabricante de los relés que en nuestro caso es la marca ABB (Asea Brown Boveri). Finalmente, se muestra la coordinación de los relés de protección considerando una falla producida en la barra de salida de la Central.

# **CAPÍTULO 1**

## **DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES**

La Central Termoeléctrica Trinitaria perteneciente a la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP – Unidad de Negocio Electroguayas, ubicada en la ciudad de Guayaquil en la Cooperativa Santiaguito Roldós, empezó su operación comercial el 28 Noviembre de 1.997, tiene una capacidad nominal de 156,5 MVA y está en capacidad de entregar al Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.), 133 MW.

Esta unidad constituye un aporte importante para el Sistema Nacional Interconectado, aportando un promedio anual de alrededor de 700 GWh de producción bruta.



Figura 1.1 - Vista de la Central Térmica Trinitaria.

### **1.1 Insumos principales usados en la Central.**

**Combustible**, Bunker (Fuel Oil # 4) alrededor de 192.000 galones/día con operación a plena carga.

**Agua desmineralizada**, 240 m<sup>3</sup>/día aproximadamente.

**Energía**, alrededor de 8 MW.

La Central Térmica Trinitaria dispone de tres sistemas de control que se indican a continuación:

- ✓ Control del Ciclo: D.C.S. MAX 1000 de MAX CONTROL.
- ✓ Control de Turbina: PROCONTROL P13.
- ✓ Control de Caldera: ELSAG BAILEY.

Los sistemas para lograr la producción del vapor en caldera y los 3.600 r.p.m. en turbina son:

- ✓ Agua de circulación.
- ✓ Agua de Servicios.
- ✓ Aire comprimido.
- ✓ Agua de Condensado.
- ✓ Agua de Alimento.
- ✓ Aire Gases.
- ✓ Fuel oil.
- ✓ Gas oil.
- ✓ Vapor Auxiliar.
- ✓ Aceite Lubricación de Turbina.
- ✓ Aceite Hidráulico de Control.
- ✓ Vapor de cierres en Turbina, otros.

Para la producción de vapor, la Central cuenta con una planta potabilizadora y desmineralizadora de agua la cual se alimenta de uno de los brazos del estero salado independizándose de la red de agua potable de la ciudad.

La Central cuenta con tres tanques de almacenamiento de combustible, el tanque principal de 2,6 millones de galones y dos tanques diarios de 300 mil galones cada uno con lo cual se puede mantener una operación de alrededor de 15 días a plena carga.

| NOMBRE DEL TANQUE | VOLÚMEN MUERTO (Galones) | NIVEL OPERATIVO MÁXIMO CONSIDERADO (Milímetros) | VOLÚMEN NATURAL (Galones) | FCATOR DE CORRECCIÓN API / 60°C | VOLÚMEN TOTAL CORREGIDO A 60°F (Galones) | VOLÚMEN ÚTIL CORREGIDO A 60°F (Galones) |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Tanque principal  | 239.381,00               | 13.500,00                                       | 2.545.960,00              | 0,97                            | 2.469.581,00                             | 2.306.579,00                            |
| Tanque Diario "A" | 64.127,00                | 9.500,00                                        | 277.036,00                | 0,97                            | 268.725,00                               | 212.909,00                              |
| Tanque Diario "B" | 63.795,00                | 9.500,00                                        | 276.593,00                | 0,97                            | 268.295,00                               | 212.798,00                              |
| Tanque Diesel     | 7.631,00                 | 4.000,00                                        | 26.510,00                 | -                               | 26.510,00                                | 18.879,00                               |

Tabla 1.1 - Tanques de almacenamiento de combustible.

## 1.2 Datos técnicos principales del Generador.

La Central cuenta con un Generador Eléctrico marca ABB - ASEA BROWN BOVERI, con una potencia efectiva de operación de 133 MW, nivel de voltaje de 13,8 KV y velocidad de 3.600 RPM.

| <b>Datos Generales</b>                   |                           |
|------------------------------------------|---------------------------|
| Fabricante                               | : ABB - Asea Brown Boveri |
| Tipo                                     | : WX18Z-090LL             |
| Número de Polos                          | : 2                       |
| Número de Fases                          | : 3                       |
| Conexión del Devanado del Estator        | : Estrella                |
| Clase de aislamiento del Estator         | : F                       |
| Clase de aislamiento del Rotor           | : F                       |
| Norma de fabricación                     | : IEC                     |
| Aumento de la Temperatura según la Clase | : B                       |

Tabla 1.2 - Datos Generales del Generador.

| <b>Datos de Diseño</b>        |                       |
|-------------------------------|-----------------------|
| Potencia nominal aparente     | : 156,500 MVA         |
| Potencia nominal activa       | : 133,025 MVA         |
| Factor de potencia nominal    | : 0,85                |
| Voltaje nominal (fase-fase)   | : 13,8 KV             |
| Rango de operación de voltaje | : $\pm 5\%$           |
| Corriente nominal (por fase)  | : 6.547 A             |
| Frecuencia nominal            | : 60 Hz               |
| Velocidad nominal             | : 3.600 RPM           |
| Altitud                       | : 0 m a nivel del mar |

Tabla 1.3 - Datos de Diseño del Generador.

| <b>Reactancias</b>                   |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Reactancia sincrónica eje-directo    | : $*X_d = 212 \%$     |
| Reactancia transiente eje-directo    | : $**X'_d = 18,7 \%$  |
| Reactancia subtransiente eje-directo | : $**X''_d = 11,4 \%$ |
| Reactancia de secuencia negativa     | : $*X_2 = 16,7 \%$    |
| Reactancia cero                      | : $*X_0 = 7,0 \%$     |
| Relación de cortocircuito            | : $**k_0 = 0,51$      |
| Impedancia nominal ( $U_N^2/S_N$ )   | : $Z_N = 1,22 \Omega$ |

\* Valores no saturados

\*\* Valores saturados

Tabla 1.4 - Datos de Reactancias del Generador.

| <b>Constantes de Tiempo</b>                        |                              |
|----------------------------------------------------|------------------------------|
| Constante de tiempo transiente de cortocircuito    | : $T'_d = 0,78 \text{ s}$    |
| Constante de tiempo subtransiente de cortocircuito | : $T''_d = 0,017 \text{ s}$  |
| Constante de tiempo de circuito abierto            | : $T''_{d0} = 7,7 \text{ s}$ |

Tabla 1.5 - Datos de constantes de tiempo del Generador.

| <b>Potencia Activa</b> | <b>Eficiencia</b> |
|------------------------|-------------------|
| 133,025 MW (4/4 Carga) | : 98,60 %         |
| 99,769 MW (3/4 Carga)  | : 98,37 %         |
| 66,512 MW (2/4 Carga)  | : 97,82 %         |
| 33,256 MW (1/4 Carga)  | : 96,05 %         |

Tabla 1.6 - Datos de Eficiencias a factor de potencia nominal.

| Otros Datos Técnicos                                              |                          |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Carga desbalanceada:</b>                                       |                          |
| Corriente de secuencia negativa continua máxima permisible, $i_2$ | : 0,08 pu                |
| <b>Regulación de voltaje:</b>                                     |                          |
| En 4/4 Carga y factor de potencia nominal                         | : 0,40 pu                |
| <b>Resistencias de devanado:</b>                                  |                          |
| Temperatura de referencia                                         | : 20°C                   |
| <b>Capacitancia:</b>                                              |                          |
| De devanado del estator contra el núcleo del estator (por fase)   | : 0,406 $\mu$ F          |
| <b>Torques:</b>                                                   |                          |
| Momento de inercia                                                | : 2.830 kgm <sup>2</sup> |
| Torque máximo de cortocircuito                                    | : 4.729 kNm              |
| <b>Excitación:</b>                                                |                          |
| Voltaje de excitación en vacío                                    | : $U_{FO} = 81$ V        |
| Corriente de excitación en vacío                                  | : $I_{FO} = 389$ A       |
| Voltaje nominal de excitación                                     | : $U_{FN} = 298$ V       |
| Corriente nominal de excitación                                   | : $I_{FN} = 1.063$ A     |

Tabla 1.7 - Otros datos técnicos del Generador.

### 1.3 Datos técnicos principales de la turbina.

| Turbina                        |                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fabricante                     | : ABB                                                                                                                                                                       |
| Tipo                           | : DK2Y-186 / Ripo acción y reacción. Turbina alta presión: 1 etapa acción, 19 de reacción. Turbina presión intermedia: 14 de reacción. Turbina baja presión: 5 de reacción. |
| Presión Ppal de vapor          | : 140 Kg/cm <sup>2</sup>                                                                                                                                                    |
| Temperatura principal de vapor | : 538 °C                                                                                                                                                                    |
| Potencia                       | : 133.000 KW                                                                                                                                                                |
| Velocidad                      | : 3600 RPM                                                                                                                                                                  |

Tabla 1.8 - Datos técnicos de la Turbina.

| Datos técnicos del Generador de Vapor y Condensador |                                           |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Generador de Vapor</b>                           |                                           |
| Fabricante                                          | : Babcock & Wilcox Española               |
| Caldera Tipo                                        | : Radiante                                |
| Tamaño                                              | : RBE 2 24M95/14O60                       |
| Volumen del hogar                                   | : 920 m <sup>3</sup>                      |
| Producción vapor sobrecalentado                     | : 409.000 Kg/h                            |
| Máx. presión vapor sobrecalentado                   | : 149,9 Kg/cm <sup>2</sup>                |
| Temperatura vapor sobrecalentado                    | : 541 ± 5°C                               |
| Producción vapor recalentado                        | : 361.400 Kg/h                            |
| Máxima presión vapor recalentado                    | : 38 Kg/cm <sup>2</sup>                   |
| Temperatura vapor recalentado                       | : 541 ± 5°C                               |
| Sistema tipo aire                                   | : Tiro Forzado                            |
| Precalentador aire regenerativo (CAR)               | : 1-25,5 VN 1850 Howden Sirocco. Vertical |
| Entrada al CAR                                      | : 75 °C                                   |
| Presión tambor                                      | : 160,91 Kg/cm <sup>2</sup>               |
| Calentadores baja presión                           | : 3                                       |
| Calentadores alta presión                           | : 2                                       |
| Desareador                                          | : 1                                       |
| Autonomía de operación                              | : Completa                                |
| Fluido                                              | : agua/vapor                              |
| Combustible                                         | : Fuel Oil No. 6                          |
| <b>Condensador</b>                                  |                                           |
| Fabricante                                          | : Babcock & Wilcox Española               |
| Tipo                                                | : CM                                      |
| No. de pasos                                        | : 2                                       |
| Material de los tubos                               | : Titanio                                 |
| Superficie de cambio térmico                        | : 6.797,2 m <sup>2</sup>                  |
| Caudal de vapor                                     | : 268.243 Kg/h                            |
| Cantidad de agua de enfriamiento                    | : 5,5 m <sup>3</sup> /seg agua de mar     |
| Presión de vacío                                    | : 0,077 bar                               |

Tabla 1.9 - Datos técnicos del Generador de Vapor y Condensador.

#### 1.4 Datos técnicos principales del Sistema de Excitación.

| Sistema de Excitación                                                                        |                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Datos de la Excitación del Generador</b>                                                  |                     |
| Corriente de excitación en vacío (Ifo)                                                       | : 389 A.C.C.        |
| Corriente de excitación nominal (Ifn)                                                        | : 1.063 A.C.C.      |
| Corriente de excitación máxima permanente (Ifdd)                                             | : 1.073 A.C.C.      |
| Tensión de excitación nominal (Ufn)                                                          | : 298 V.C.C.        |
| Resistencia del Rotor a 20 °C (Rf)                                                           | : 0,209 ohm         |
| <b>Datos del sistema de excitación</b>                                                       |                     |
| Corriente de excitación máxima permanente con Temp. Ambiente $\leq 40^{\circ}\text{C}$ (Ifd) | : 1.170 A.C.C.      |
| Tensión de techo Ufpl                                                                        | : 804 V.C.C         |
| <b>Transformador de excitación T02</b>                                                       |                     |
| Potencia nominal                                                                             | : 1.100 KVA         |
| Tensión primaria                                                                             | : $13,8 \pm 5\%$ KV |
| Tensión secundaria                                                                           | : 650 V             |
| Tensión de cortocircuito                                                                     | : 6%                |
| Grupo de conexión                                                                            | : Yd11              |

Tabla 1.10 - Datos técnicos principales del Sistema de Excitación.

#### 1.5 Datos técnicos principales del Transformador Principal.

La Central entrega energía al S.N.I. por medio de la Subestación Trinitaria de CELEC EP – Unida de Negocio TRANSELECTRIC mediante un transformador de voltaje 13,8/138 KV, 160 MVA marca ABB; adicionalmente posee un Transformador de 13.8/4,16 KV, 12,5 MVA para el consumo de auxiliares internos de la planta.

| <b>Transformador Principal</b>                                                                              |                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Fabricante                                                                                                  | : ABB                                                         |
| Clase de instalación                                                                                        | : Intemperie                                                  |
| Clase de refrigeración                                                                                      | : ONAN/ONAF/OFAF                                              |
| Clase de servicio                                                                                           | : Continuo                                                    |
| Clase de corriente                                                                                          | : Alterna, trifásica, 60 Hz                                   |
| Número de arrollamientos                                                                                    | : 2                                                           |
| Potencia por arrollamiento en la toma de menor tensión:                                                     |                                                               |
| - Primario (MVA)                                                                                            | : 90/120/160                                                  |
| - Secundario (MVA)                                                                                          | : 90/120/160                                                  |
| Conexión AT                                                                                                 | : Estrella, neutro accesible y semiaislado para plena tensión |
| Conexión BT                                                                                                 | : Triángulo                                                   |
| Grupo de conexión                                                                                           | : YNd1                                                        |
| Tensiones en vacío:                                                                                         |                                                               |
| - Lado AT                                                                                                   | : 144.000 ± 2x2,5% V                                          |
| - Lado BT                                                                                                   | : 13.800 V                                                    |
| Tensiones de cortocircuito a 75°C                                                                           | : 8% @ 144/13,8 (Base 160 MVA)                                |
| Pérdidas en el hierro:                                                                                      |                                                               |
| - al 95% $V_N$                                                                                              | : 76 KW                                                       |
| - al 100% $V_N$                                                                                             | : 90 KW                                                       |
| - al 105% $V_N$                                                                                             | : 110 KW                                                      |
| - al 110% $V_N$                                                                                             | : 153 KW                                                      |
| Pérdidas en el cobre a plena carga a 75°C para la relación 144/13,8 KV y 160 MVA                            | : 422 KW                                                      |
| Intensidades de vacío:                                                                                      |                                                               |
| - al 95% $V_N$                                                                                              | : 0,15%                                                       |
| - al 100% $V_N$                                                                                             | : 0,20%                                                       |
| - al 105% $V_N$                                                                                             | : 0,40%                                                       |
| - al 110% $V_N$                                                                                             | : 1,20%                                                       |
| Nivel de ruido (NEMA TR1)                                                                                   | : ≤ 82 Db                                                     |
| Con una temperatura ambiente máxima de 40°C, los incrementos de temp. no sobrepasan los siguientes límites: |                                                               |
| - En el cobre                                                                                               | : 65 °C                                                       |
| - En el aceite                                                                                              | : 60 °C                                                       |
| Tensión de ensayo de los arrollamientos:                                                                    |                                                               |
| - AT                                                                                                        | : 275 KV                                                      |
| - Neutro AT                                                                                                 | : 50 KV                                                       |
| - BT                                                                                                        | : 38 KV                                                       |
| Tensión de ensayo con onda de choque completa de 1,2/50 $\mu$ s (BIL)                                       |                                                               |
| - AT                                                                                                        | : 650 KV                                                      |
| - Neutro AT (10/50 $\mu$ s)                                                                                 | : 125 KV                                                      |
| - BT                                                                                                        | : 95 KV                                                       |

Tabla 1.11 - Datos técnicos del Transformador Principal de la Central.

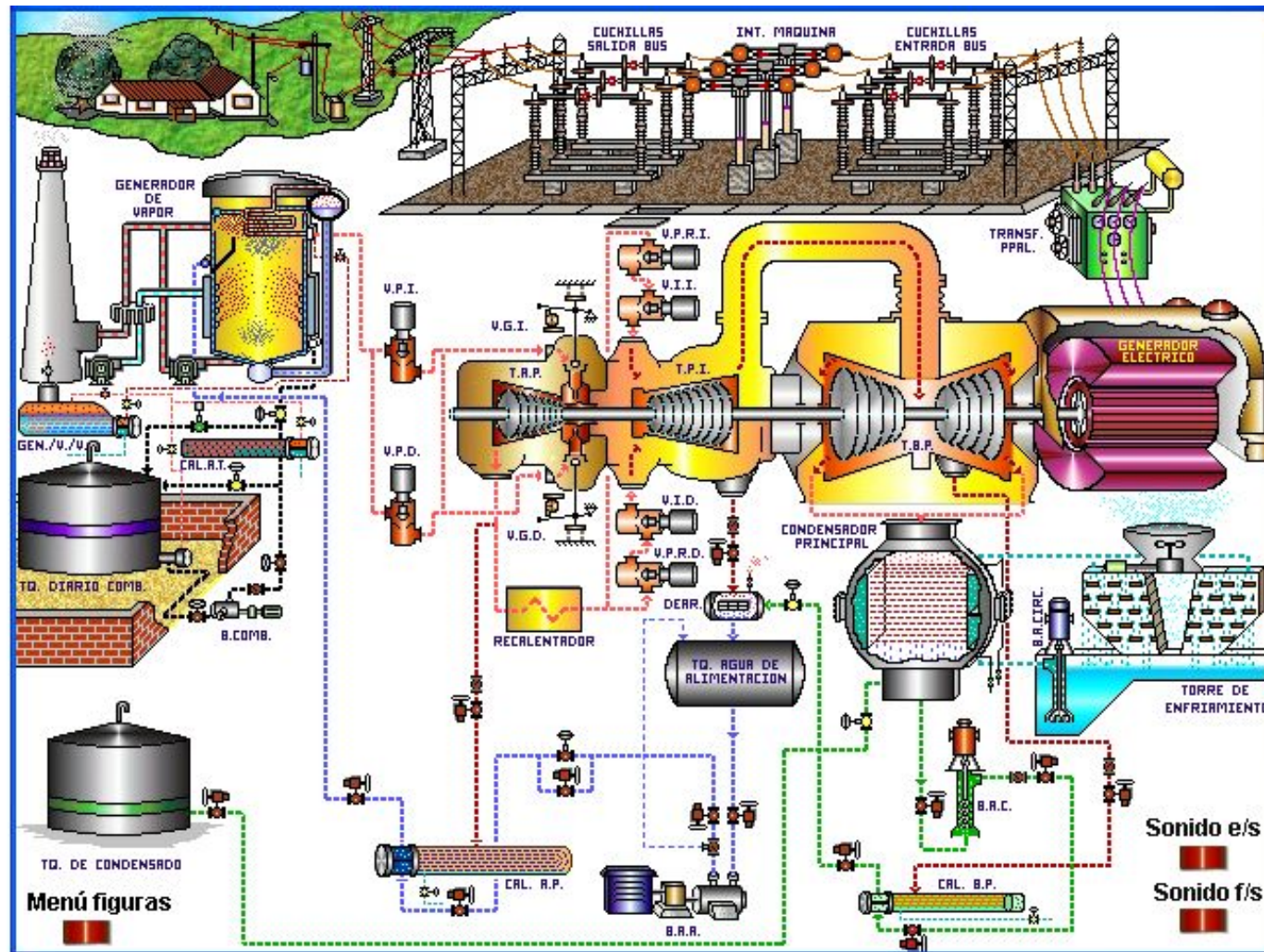


Figura 1.2 – Diagrama de Flujo de la Central Térmica Trinitaria.

En el Anexo No. 1, se muestran las Curvas Características del Generador, el Diagrama unifilar de la Central y el Diagrama unifilar de los servicios auxiliares.

### **1.6 Principio de Operación de la Central.**

En la Central Térmica Trinitaria se tiene un generador de vapor o caldera que consta de 8 ignitores y 8 quemadores.

Inicialmente en su arranque los ignitores son alimentados con diesel y aire a alta presión, luego encendidos con un electrodo que tiene un voltaje bien elevado (2.000 V aproximadamente) el cual produce una chispa y la combinación de ambos genera una llama.

Una vez encendidos los ignitores se procede a encender los quemadores que son alimentados con fuel Oil # 4 y vapor.

Previamente se necesita aire extraído de la atmósfera (28 grados Celsius) para que ayude con el proceso de combustión, este aire es proporcionado por los ventiladores de tiro forzado (V.T.F) que antes de ingresar a la caldera pasa a través del calentador de aire regenerativo (C.A.R) para elevar su temperatura (160 grados Celsius).

Por otro lado, a través del domo o calderín, se ingresa agua previamente tratada químicamente, a alta presión y con temperatura cercana a la de saturación para que alimente a la caldera donde se quema combustible.

El agua de alimentación pasa a través de un sobrecalentador SOB. y se obtiene un vapor sobrecalentado a una temperatura de 535 grados Celsius y una presión de  $145 \text{ Kg/cm}^2$ . El vapor Sobrecalentado ingresa a la turbina de alta presión A.P., se expande y realiza un trabajo, perdiendo temperatura y

presión por lo que antes de entrar a la turbina de media presión M.P. y baja presión B.P. pasa por el recalentador REC recuperando temperatura y presión.

Luego de que el vapor sale de la turbina de baja presión entra al condensador principal donde se condensa al ponerse en contacto con las paredes frías de los tubos en cuyo interior pasa agua salada (26°C) que es impulsada por las Bombas de Agua de Circulación, el intercambio de calor hace que el agua salada salga del condensador con temperatura mayor producto del intercambio.

El condensado (aproximadamente 350 mm H<sub>2</sub>O), es succionado con la ayuda de las bombas de extracción de condensado y lo conduce por los precalentadores de baja presión CAP1, CAP2 y CAP3 incrementando su temperatura.

Luego por el desgasificador DG. cuya función es eliminar los gases disueltos que contiene el condensado, el cual que puede ser nocivo para las tuberías de la caldera, luego la bomba de alimentación extrae el agua y la hace pasar por los precalentadores de alta presión CAP5 y CAP6 para finalmente regresarla a la caldera completando un ciclo cerrado.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTUDIOS DE FLUJO DE CARGA**

#### **2.1 Criterios adoptados para el estudio.**

##### **2.1.1 Flexibilidad Operacional.**

El sistema deberá entregar energía al Sistema Nacional Interconectado a través de la Central Térmica Trinitaria, la cual mantendrá una alta flexibilidad operacional.

##### **2.1.2 Niveles de Confiabilidad.**

El sistema debe proveer la continuidad del servicio y la alimentación a las instalaciones de la Central Térmica Trinitaria en forma prioritaria, ante la existencia de falla de un elemento del Sistema.

### **2.1.3 Niveles de Sobrecarga.**

No se aceptan sobrecarga en los cables del Sistema mayores a la cargabilidad establecida en las especificaciones técnicas.

Para el caso de los Transformadores Convencionales de Fuerza, la carga no debe exceder su capacidad OA.

### **2.1.4 Regulación de Voltaje.**

Los voltajes a nivel de barras del Sistema no deben exceder del 2,5% hacia arriba y 2,5% hacia abajo, ante cualquier contingencia operativa.

## **2.2 Análisis de casos**

Para el presente estudio, se considera el caso base para carga máxima, donde todas las cargas instaladas están a su potencia nominal, considerando un factor de potencia de 0,85.

El análisis de este caso se lo realizará posteriormente en este mismo capítulo en el programa Power World. El ingreso de datos de impedancias de líneas y de transformadores debió ser realizado en por unidad tomando una potencia aparente base de 100 MVA.

## 2.3 Datos del Sistema.

### 2.3.1 Diagrama unifilar.

El diagrama unifilar de la Central Térmica Trinitaria utilizando el programa Power World, es como se muestra en la figura 2.1.

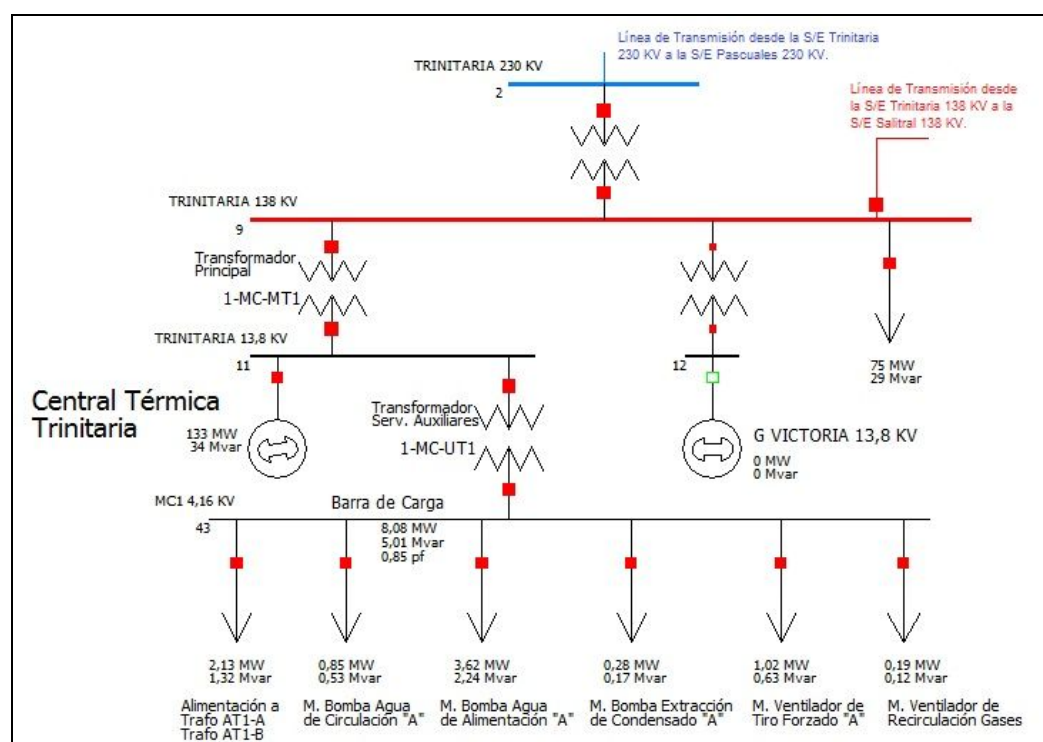


Figura 2.1 - Diagrama Unifilar de la Central Térmica Trinitaria.

### 2.3.2 Datos de barras de carga.

La carga está dada en MW y MVAR a voltaje nominal. Para las cargas de los servicios auxiliares de la Central Térmica Trinitaria de la Barra MC1 - 4,16

KV, se consideró un factor de potencia de 0,85 y para las demás cargas del sistema el factor de potencia es superior a 0,92.

| NÚMERO DE BARRA | NOMBRE DE BARRA   | MW     | MVAR  | MVA    |
|-----------------|-------------------|--------|-------|--------|
| 9               | TRINITARIA 138 KV | 75,12  | 29,38 | 80,66  |
| 13              | PASCUALES 138 KV  | 128,46 | 53,80 | 139,27 |
| 13              | PASCUALES 138 KV  | 65,24  | 24,31 | 69,62  |
| 14              | PASCUALES 69 KV   | 108,83 | 31,45 | 113,28 |
| 20              | GENEROCA 13.8 KV  | 26,00  | 0,96  | 26,02  |
| 21              | POSORJA 138 KV    | 19,20  | 5,60  | 20,00  |
| 32              | TINAJERO 69 KV    | 268,88 | 78,42 | 280,08 |
| 42              | CARGA CHILLERS    | 5,68   | 0,00  | 5,68   |
| 43              | MC1 4.16 KV       | 1,02   | 0,63  | 1,20   |
| 43              | MC1 4.16 KV       | 0,28   | 0,17  | 0,33   |
| 43              | MC1 4.16 KV       | 0,85   | 0,53  | 1,00   |
| 43              | MC1 4.16 KV       | 3,62   | 2,24  | 4,25   |
| 43              | MC1 4.16 KV       | 2,13   | 1,32  | 2,50   |
| 43              | MC1 4.16 KV       | 0,19   | 0,12  | 0,22   |

Tabla 2.1 - Datos de Barras de carga.

### 2.3.3 Datos de líneas y conductores.

| LÍNEA | DESDE BARRA            | HASTA BARRA            | VOLTAJE (KV) | Calibre del Conductor (AWG o MCM) | Nº DE CIRCUITOS |
|-------|------------------------|------------------------|--------------|-----------------------------------|-----------------|
| 1     | S/E Electroquil 69 KV  | Salitral 69KV          | 69           | 477 ACSR FLICKER                  | 2               |
| 2     | Salitral 69KV          | Aníbal Santos          | 69           | 477 ACSR FLICKER                  | 1               |
| 3     | Salitral 69KV          | A. Tinajero            | 69           | 477 ACSR FLICKER                  | 2               |
| 4     | Salitral 69 KV         | G.Zevallos 69 KV       | 69           | 477 ACSR FLICKER                  | 2               |
| 5     | Pascuales 138 KV       | Salitral 138 KV        | 138          | 477 ACSR FLICKER                  | 2               |
| 6     | Pascuales 138 KV       | S/E 138 KV Electroquil | 138          | 397,5 ACSR BRANT                  | 1               |
| 7     | S/E 138 KV Electroquil | POSORJA 138 KV         | 138          | 397,5 ACSR BRANT                  | 1               |
| 8     | S/E 138 KV salitral    | S/E 138 KV Trinitaria  | 138          | 750 ACAR                          | 1               |
| 9     | S/E 230 KV Trinitaria  | S/E pascuales 230 KV   | 230          | 1113 ACSR BLUEJAY                 | 1               |

Tabla 2.2 - Datos calibre y tipos de conductores en Líneas.

| LÍNEA | DESDE BARRA            | HASTA BARRA            | LONGITUD (Km) | Capacidad Continua (1) |     | Capacidad Emergencia (2) |     | Impedancia en (ohm) por conductor |           |
|-------|------------------------|------------------------|---------------|------------------------|-----|--------------------------|-----|-----------------------------------|-----------|
|       |                        |                        |               | A                      | MVA | A                        | MVA | R ohm/km                          | X ohm/km  |
| 1     | S/E Electroquil 69 KV  | Salitral 69KV          | 13            | 527                    | 126 | 669                      | 160 | 0,1031948                         | 0,489141  |
| 2     | Salitral 69KV          | Aníbal Santos          | 0,5           | 527                    | 126 | 669                      | 160 | 0,027398                          | 0,248326  |
| 3     | Salitral 69KV          | A. Tinajero            | 0,9           | 527                    | 126 | 669                      | 160 | 0,0674735                         | 0,2445702 |
| 4     | Salitral 69 KV         | G.Zevallos 69 KV       | 0,35          | 527                    | 126 | 669                      | 160 | 0,0295425                         | 0,237834  |
| 5     | Pascuales 138 KV       | Salitral 138 KV        | 17,4          | 527                    | 126 | 669                      | 160 | 0,134947                          | 0,489141  |
| 6     | Pascuales 138 KV       | S/E 138 KV Electroquil | 38,03         | 475                    | 113 | 590                      | 141 | 0,161847                          | 0,495828  |
| 7     | S/E 138 KV Electroquil | Posorja 138 KV         | 83,34         | 475                    | 113 | 590                      | 141 | 0,161578                          | 0,477579  |
| 8     | S/E 138 KV Salitral    | S/E138 KV Trinitaria   | 11            | 807                    | 193 | 896                      | 214 | 0,059085                          | 0,472668  |
| 9     | S/E 230 KV Trinitaria  | S/E Pascuales 230KV    | 28,28         | 886                    | 352 | 1110                     | 442 | 0,059085                          | 0,472668  |

Tabla 2.3 - Datos de capacidades de Líneas.

| LÍNEA # | DESDE BARRA            | HASTA BARRA            | Impedancia total por conductor(ohm) |          | Impedancia total por unidad |         |
|---------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------------|---------|
|         |                        |                        | R(ohm)                              | X(ohm)   | R*u                         | X*u     |
| 1       | S/E Electroquil 69 KV  | Salitral 69KV          | 1,34153                             | 6,35883  | 0,02818                     | 0,13356 |
| 2       | Salitral 69KV          | Aníbal Santos          | 0,0137                              | 0,12416  | 0,00029                     | 0,00261 |
| 3       | Salitral 69KV          | A. Tinajero            | 0,06073                             | 0,22011  | 0,00128                     | 0,00462 |
| 4       | Salitral 69 KV         | G.Zevallos 69 KV       | 0,01034                             | 0,08324  | 0,00022                     | 0,00175 |
| 5       | Pascuales 138 KV       | Salitral 138 KV        | 2,34808                             | 8,51105  | 0,01233                     | 0,04469 |
| 6       | Pascuales 138 KV       | S/E 138 KV Electroquil | 6,15504                             | 18,85634 | 0,03232                     | 0,09901 |
| 7       | S/E 138 KV Electroquil | Posorja 138 KV         | 13,46591                            | 39,80143 | 0,07071                     | 0,209   |
| 8       | S/E 138 KV Salitral    | S/E138 KV Trinitaria   | 0,64994                             | 5,19935  | 0,00341                     | 0,0273  |
| 9       | S/E 230 KV Trinitaria  | S/E Pascuales 230 KV   | 1,67092                             | 13,36705 | 0,00316                     | 0,02527 |

Tabla 2.4 - Datos de impedancias de Líneas.

### 2.3.4 Datos de Transformadores de Fuerza.

Los valores de impedancia de los transformadores de fuerza fueron determinados en por unidad con respecto a la base del sistema que es de 100 MVA y son los que se muestran en la tabla 2.5.

| TRAFO | NOMBRE DE TRANSFORMADORES             | POTENCIA (MVA) | VOLTAJE (KV) ALTA | VOLTAJE (KV) BAJA | IMPEDANCIA EN BASE A SU POTENCIA NOMINAL (%) | X (BASE 100 MVA) | UBICACIÓN   |
|-------|---------------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------------------------------------|------------------|-------------|
| 1     | ELECTROQUIL TE 1                      | 64             | 69                | 13,8              | 14,52                                        | 0,2139           | ELECTROQUIL |
| 2     | ELECTROQUIL TE 2                      | 84             | 69                | 13,8              | 8,064                                        | 0,0927           | ELECTROQUIL |
| 3     | ELECTROQUIL TE 3                      | 56             | 138               | 13,8              | 18,1066                                      | 0,3233           | ELECTROQUIL |
| 4     | ELECTROQUIL TE 4                      | 56             | 138               | 13,8              | 18,1066                                      | 0,3233           | ELECTROQUIL |
| 5     | ELECTROQUIL TIC                       | 112            | 138               | 69                | 13,527                                       | 0,1215           | ELECTROQUIL |
| 6     | TAP ELECTROQUIL                       | 8              | 69                | 4,16              | 0,008                                        | 0,0010           | ELECTROQUIL |
| 7     | GENEROCA                              | 33,33          | 69                | 13,8              | 11,06                                        | 0,3318           | HOLCIM      |
| 8     | A-Santos V                            | 33,25          | 69                | 13,8              | 7,3                                          | 0,2903           | A. SANTOS   |
| 9     | A-Santos G1                           | 27,5           | 69                | 13,8              | 6,9                                          | 0,2495           | A. SANTOS   |
| 10    | A-Santos G2                           | 27,5           | 69                | 13,8              | 6,9                                          | 0,2495           | A. SANTOS   |
| 11    | A-Santos G3                           | 27,5           | 69                | 13,8              | 7,5                                          | 0,2711           | A. SANTOS   |
| 12    | A-Santos G4                           | 26,667         | 69                | 13,8              | 7,04                                         | 0,2625           | A. SANTOS   |
| 13    | A-Santos G5                           | 26,667         | 69                | 13,8              | 7,04                                         | 0,2625           | A. SANTOS   |
| 14    | Tinagero G1                           | 44,32          | 69                | 13,8              | 7                                            | 0,2088           | A. TINAJERO |
| 15    | Tinagero G2                           | 26,88          | 69                | 13,8              | 7                                            | 0,2589           | A. TINAJERO |
| 16    | G. Zevallos TV2                       | 86             | 69                | 13,8              | 12                                           | 0,1395           | G. ZEVALLOS |
| 17    | G. Zevallos TV3                       | 86             | 69                | 13,8              | 11,79                                        | 0,1371           | G. ZEVALLOS |
| 18    | G. Zevallos TG4                       | 34             | 69                | 13,8              | 9,1                                          | 0,2661           | G. ZEVALLOS |
| 19    | Salitral -ATQ 69 -138 KV              | 150            | 138               | 69                | 8,46                                         | 0,0564           | SALITRAL    |
| 20    | Salitral -ATR 69 -138 KV              | 150            | 138               | 69                | 8,15                                         | 0,0543           | SALITRAL    |
| 21    | Trafo Ohio Pascuales 138-69           | 224            | 138               | 69                | 7,84                                         | 0,0350           | PASCUALES   |
| 22    | Traf Gas Pascuales 69-13,8            | 114            | 69                | 13,8              | 11,66                                        | 0,1023           | PASCUALES   |
| 23    | Traf Trinitaria 138-230               | 225            | 230               | 138               | 11,83                                        | 0,0526           | TRINITARIA  |
| 24    | Traf U1 Trinitaria 138-13,8           | 160            | 138               | 13,8              | 7                                            | 0,0476           | TRINITARIA  |
| 25    | Traf Servicios Auxiliares Trinitaria  | 12,5           | 13,8              | 4,16              | 0,008                                        | 0,0006           | TRINITARIA  |
| 26    | Traf G Victoria 138-13,8              | 150            | 138               | 13,8              | 15,38                                        | 0,1025           | ESCLUSAS    |
| 27    | Traf Pascuales 138 -230 Pascuales ATU | 375            | 230               | 138               | 7,3                                          | 0,0195           | PASCUALES   |
| 28    | Traf Pascuales 138 -230 Pascuales ATT | 375            | 230               | 138               | 7,16                                         | 0,0191           | PASCUALES   |

Tabla 2.5 - Datos de Transformadores de Fuerza.

## **2.4 Resultados de los Estudios de Flujo de Carga.**

Los resultados de Flujo de carga serán presentados principalmente en forma gráfica por ser el método más conciso y usualmente más informativo. El flujo del sistema puede ser rápidamente analizado con la presentación gráfica y relacionar la configuración del sistema, condiciones operativas y resultados.

El análisis del flujo de carga muestra lo siguiente:

- a) Voltaje en barras.
- b) Carga sobre todos los conductores y transformadores, verificar que la carga este dentro de la capacidad de transmisión para condiciones normales y contingencias operativas.
- c) Ajustes de TAPS de los Transformadores.

### **2.4.1 Casos base.**

En la figura 2.2, se muestra el gráfico del Flujo de Carga de lado de la Central Térmica Trinitaria considerando la carga máxima como nuestro caso base.

Una vista más general del Flujo de Carga del Sistema de Guayaquil, se muestra en el Anexo No. 2.

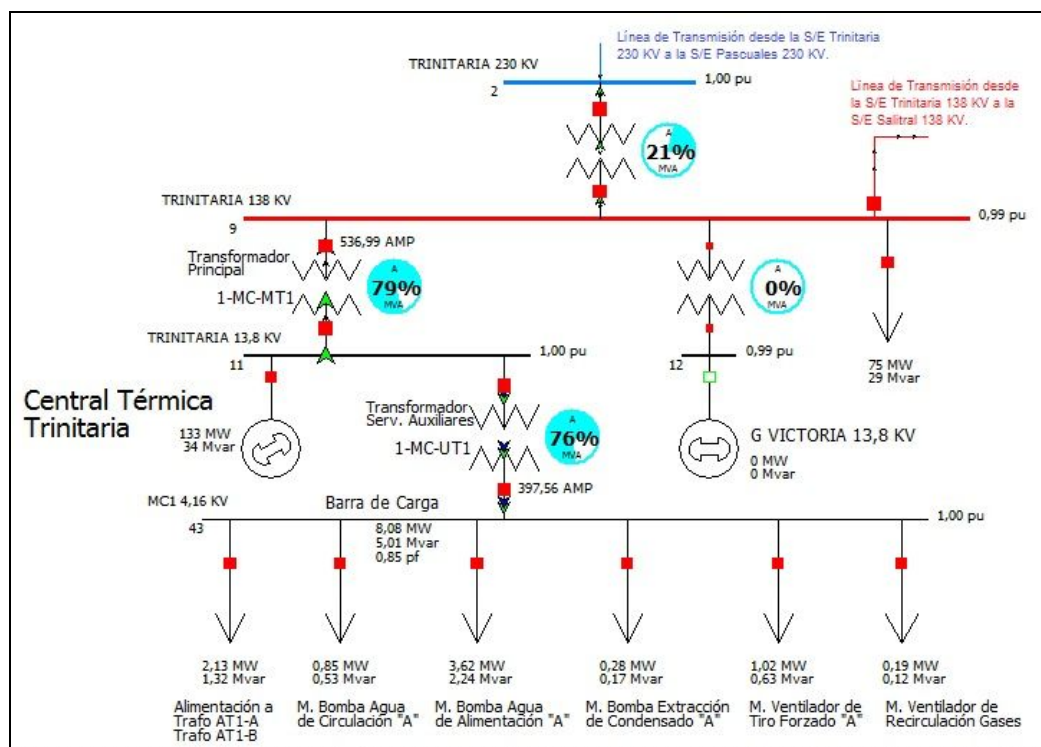


Figura 2.2 - Flujo de Carga de la Central Térmica Trinitaria.

Los resultados del Flujo de Carga son los que se resumen a continuación:

#### 2.4.1.1 Carga de Conductores.

| DESDE<br>NÚMERO | DESDE<br>BARRA            | HASTA<br>NÚMERO | HASTA<br>BARRA            | CIRCUITO | MVA    | MVA<br>LIMITE | %<br>SOBRECARGA |
|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|----------|--------|---------------|-----------------|
| 39              | S/E Electroquil<br>69 KV  | 24              | Salitral 69KV             | 2        | 45,36  | 126           | 36              |
| 24              | Salitral 69 KV            | 25              | Aníbal Santos             | 1        | 131,20 | 160           | 82              |
| 24              | Salitral 69 KV            | 32              | A. Tinajero               | 2        | 118,40 | 160           | 74              |
| 24              | Salitral 69 KV            | 35              | G.Zevallos 69<br>KV       | 2        | 73,08  | 126           | 58              |
| 13              | Pascuales 138<br>KV       | 23              | Salitral 138 KV           | 2        | 74,34  | 126           | 59              |
| 13              | Pascuales<br>138 KV       | 16              | S/E 138 KV<br>Electroquil | 1        | 53,11  | 113           | 47              |
| 16              | S/E 138 KV<br>Electroquil | 21              | Posorja 138 KV            | 1        | 20,34  | 113           | 18              |
| 23              | S/E 138 KV<br>Salitral    | 9               | S/E138 KV<br>Trinitaria   | 1        | 5,79   | 193           | 3               |
| 2               | S/E 230 KV<br>Trinitaria  | 1               | S/E Pascuales<br>230 KV   | 1        | 45,76  | 352           | 13              |

Tabla 2.6 - Datos de Carga de los conductores.

### 2.4.1.2 Voltajes en barras.

La tabla 2.7, muestra los voltajes en cada barra del Sistema de Guayaquil.

| NÚMERO DE BARRA | NOMBRE DE BARRA        | VOLTAJE NOMINAL (kV) | VOLTAJE (pu) | VOLTAJE (kV) | ÁNGULO (GRADOS) |
|-----------------|------------------------|----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| 1               | PASCUALES 230 KV       | 230                  | 1,000        | 230          | 0               |
| 2               | TRINITARIA 230 KV      | 230                  | 0,997        | 229,269      | 0,661           |
| 9               | TRINITARIA 138 KV      | 138                  | 0,988        | 136,31       | 1,986           |
| 11              | TRINITARIA 13,8 KV     | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 5,437           |
| 12              | G VICTORIA 13,8 KV     | 13,8                 | 0,988        | 13,631       | 1,986           |
| 13              | PASCUALES 138 KV       | 138                  | 0,985        | 135,959      | -0,075          |
| 14              | PASCUALES 69 KV        | 69                   | 0,978        | 67,455       | -0,363          |
| 15              | G PASCUALES 13.8 KV    | 13,8                 | 0,993        | 13,707       | 5,381           |
| 16              | ELECTROQUIL 138 KV     | 138                  | 0,989        | 136,469      | 3,183           |
| 17              | G3 EQL                 | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 12,363          |
| 18              | G4 EQL                 | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 12,363          |
| 19              | HOLCIM 69 KV           | 69                   | 0,984        | 67,916       | 1,323           |
| 20              | GENEROCA 13.8 KV       | 13,8                 | 0,977        | 13,484       | -3,823          |
| 21              | POSORJA 138 KV         | 138                  | 0,962        | 132,743      | 1,004           |
| 23              | SALITRAL 138 KV        | 138                  | 0,986        | 136,127      | 1,943           |
| 24              | SALITRAL 69 KV         | 69                   | 0,976        | 67,331       | 4,214           |
| 25              | A. SANTOS 69 KV        | 69                   | 0,976        | 67,37        | 4,417           |
| 26              | G1 SANT                | 13,8                 | 0,980        | 13,525       | 7,481           |
| 27              | G2 SANT                | 13,8                 | 0,980        | 13,525       | 7,481           |
| 28              | G3 SANT                | 13,8                 | 0,980        | 13,528       | 7,746           |
| 29              | G4 SANT                | 13,8                 | 0,981        | 13,531       | 7,246           |
| 30              | G5 SANT                | 13,8                 | 0,981        | 13,531       | 7,246           |
| 31              | V SANT                 | 13,8                 | 0,986        | 13,61        | 10,127          |
| 32              | TINAJERO 69 KV         | 69                   | 0,973        | 67,117       | 3,923           |
| 33              | G1 TINAJ               | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 9,096           |
| 34              | G2 TINAJ               | 13,8                 | 0,973        | 13,423       | 3,923           |
| 35              | GONZALO ZEVALLOS 69 KV | 69                   | 0,976        | 67,359       | 4,288           |
| 36              | TV2 GZ                 | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 10,193          |
| 37              | TV3 GZ                 | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 10,091          |
| 38              | TG4 GZ                 | 13,8                 | 0,976        | 13,472       | 4,288           |
| 39              | ELECTROQUIL 69 KV      | 69                   | 0,992        | 68,474       | 7,781           |
| 40              | G1 EQL                 | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 13,819          |
| 41              | G2 EQL                 | 13,8                 | 1,000        | 13,8         | 10,394          |
| 42              | CARGA CHILLERS         | 4,16                 | 0,992        | 4,128        | 7,778           |
| 43              | MC1 4.16 KV            | 4,2                  | 1,000        | 4,2          | 5,435           |

Tabla 2.7 - Datos de Voltajes en barras – Carga Máxima.

### 2.4.1.3 Carga de los Transformadores.

| DESDE BARRA | NOMBRE DE TRANSFORMADORES             | HASTA BARRA | MVA      | MVA LÍMITE | % SOBRECARGA |
|-------------|---------------------------------------|-------------|----------|------------|--------------|
| 39          | ELECTROQUIL TE 1                      | 40          | 48,64    | 64         | 76           |
| 39          | ELECTROQUIL TE 2                      | 41          | 49,56    | 84         | 59           |
| 16          | ELECTROQUIL TE 3                      | 17          | 48,72    | 56         | 87           |
| 16          | ELECTROQUIL TE 4                      | 18          | 48,72    | 56         | 87           |
| 16          | ELECTROQUIL TIC                       | 19          | 26,88    | 112        | 24           |
| 39          | TAP ELECTROQUIL                       | 42          | 5,68     | 8          | 71           |
| 19          | GENEROCA                              | 20          | 26,3307  | 33,33      | 79           |
| 25          | A-Santos V                            | 31          | 32,9175  | 33,25      | 99           |
| 25          | A-Santos G1                           | 26          | 20,625   | 27,5       | 75           |
| 25          | A-Santos G2                           | 27          | 20,625   | 27,5       | 75           |
| 25          | A-Santos G3                           | 28          | 20,625   | 27,5       | 75           |
| 25          | A-Santos G4                           | 29          | 18,13356 | 26,667     | 68           |
| 25          | A-Santos G5                           | 30          | 18,13356 | 26,667     | 68           |
| 32          | Tinagero G1                           | 33          | 43,4336  | 44,32      | 98           |
| 32          | Tinagero G2                           | 34          | 0        | 26,88      | 0            |
| 35          | G. Zevallos TV2                       | 36          | 73,1     | 86         | 85           |
| 35          | G. Zevallos TV3                       | 37          | 73,1     | 86         | 85           |
| 35          | G. Zevallos TG4                       | 38          | 0        | 34         | 0            |
| 24          | Salitral -ATQ 69 -138 KV              | 23          | 70,5     | 150        | 47           |
| 24          | Salitral -ATR 69 -138 KV              | 23          | 73,5     | 150        | 49           |
| 13          | Trafo Ohio Pascuales 138-69           | 14          | 24,64    | 224        | 11           |
| 14          | Traf Gas Pascuales 69-13.8            | 15          | 95,76    | 114        | 84           |
| 9           | Traf Trinitaria 138-230               | 2           | 47,25    | 225        | 21           |
| 9           | Traf U1 Trinitaria 138-13.8           | 11          | 126,4    | 160        | 79           |
| 11          | Traf Servicios Auxiliares Trinitaria  | 43          | 9,5      | 12,5       | 76           |
| 9           | Traf G Victoria 138-13.8              | 12          | 0        | 150        | 0            |
| 1           | Traf Pascuales 138 -230 Pascuales ATU | 13          | 75       | 375        | 20           |
| 1           | Traf Pascuales 138 -230 Pascuales ATT | 13          | 78,75    | 375        | 21           |

**Tabla 2.8** Datos de Carga de los Transformadores de Fuerza.

## 2.5 Conclusiones del Estudio de Flujo.

El presente estudio preparado para el sistema eléctrico de la Central Térmica Trinitaria, ha permitido cumplir con los objetivos planteados en el capítulo, cuyos resultados obtenidos conllevan a las siguientes conclusiones:

- La potencia activa entregada al Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) para el caso de carga máxima es de 30 MW, en cambio, la potencia reactiva suministrada por el S.N.I. es de 172 MVAR.
- El voltaje de operación en la barra de generación #11 de la Central Térmica Trinitaria es de 1,00 pu; por otra parte, el voltaje de operación en la barra de carga #43 de los servicios auxiliares de la Central es de 1,00 pu. Debido al buen funcionamiento del sistema, los valores antes mencionados se encuentran dentro de los rangos permitidos y no fue necesario realizar ningún tipo de regulación ya sea de generación o por medio de los TAP de los transformadores de fuerza.
- El flujo de potencia a través de los transformadores de fuerza principales de la Central, no exceden de su capacidad; el transformador de fuerza de 160 MVA (1-MC-MT1) está cargado al 79% de su capacidad OFAF y por otro lado, el transformador de fuerza de servicios auxiliares de 12,5 MVA (1-MC-UT1) está cargado al 76% de su capacidad ONAF.

## **CAPÍTULO 3**

### **ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO**

En el análisis de corto circuito, las fallas del sistema se manifiestan como condiciones anormales de operación que nos podrían conducir a uno de los siguientes fenómenos:

- Indeseables flujos de Corrientes.
- Presencia de Corrientes de magnitudes exageradas que podrían dañar los equipos.
- Caída de Voltaje en la vecindad de la falla que puede afectar adversamente la operación de las maquinas rotatorias.
- Creación de condiciones peligrosas para la seguridad del personal.

La Central Térmica Trinitaria requiere realizar estudios de Corto Circuito para analizar las situaciones críticas señaladas, y obtener la información básica para la coordinación de las protecciones.

Los estudios se realizarán con los siguientes objetivos:

- Determinar el efecto de las corrientes de falla en los componentes del sistema tales como cables, barras y transformadores durante el tiempo que persista la falla.
- Los estudios determinaran las zonas del sistema en donde la falla puede resultar en depresión inaceptable de voltajes.
- Proveer la información para el ajuste de los equipos de protección, los cuales son establecidos considerando el sistema bajo condiciones de falla.

### **3.1 Alcance de los Estudios de Corto Circuito.**

Considerando que el Sistema de la Central Térmica Trinitaria se caracteriza por ser un sistema típicamente aterrizado, el estudio de corto circuito considera los siguientes tipos de falla:

- Falla Trifásica a tierra
- Falla de línea a tierra

La falla trifásica a tierra es a menudo, para este tipo de sistema, la más severa de todas, por ello es costumbre de simular solamente la falla trifásica

cuando se busca las magnitudes máximas de corriente de falla; sin embargo se verificará que la corriente de falla a tierra no exceda la corriente trifásica.

### **3.2 Datos del Sistema.**

La información básica es aplicable a todos los casos del Sistema, su aplicación depende del tipo de corriente de falla a determinar.

#### **3.2.1 Impedancia de los Generadores.**

Para verificar la capacidad momentánea de los interruptores se usa la Reactancia Subtransitoria. Para el estudio de Protecciones se utilizará la Reactancia Transitoria.

#### **3.2.2 Impedancias Equivalentes en el Punto de Entrega de S.N.I.**

El S.N.I. nos ha entregado los MVA de Corto Circuito y las Impedancias de Thévenin en la Barra de Interconexión del Sistema de Generación con el S.N.I. La información ha sido trasladada a la base de 100 MVA y 230 KV, tal como se indica en la tabla 3.1.

### 3.2.2.1 MVA de Corto Circuito.

| Tipo de Falla | Corriente de Falla (p.u.) | Ángulo (Grados) | Corriente de Falla (Amperios) | (MVA) de Cortocircuito |
|---------------|---------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------|
| Trifásica     | 42,241                    | -84,65          | 10603,40                      | 4224,10                |
| Línea-Tierra  | 48,895                    | -85,67          | 12273,60                      | 1629,82                |

Tabla 3.1 - Corrientes y MVA de Corto Circuito.

### 3.2.2.2 Impedancias Equivalentes.

| Tipo de Falla | Magnitud (p.u.) | Ángulo (Grados) | R+jX (Ohmios) |
|---------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Positiva      | 0,042           | 90              | j22,21        |
| Cero          | 0,020           | 90              | j10,58        |

Tabla 3.2 - Impedancias Equivalentes.

Estas Impedancias se aplicarán para los cálculos de la Corriente Momentánea y la corriente a interrumpir debido a que el S.N.I. es considerada siempre como una barra infinita que se caracteriza por no tener decremento AC.

### **3.2.3 Datos de Conductores.**

Los conductores son elementos pasivos en el análisis de corto circuito, sus características técnicas son similares a las aplicadas en los estudios de flujo de carga.

### **3.3 Datos de Transformadores de Fuerza.**

Igual que en el caso de los conductores los Transformadores son elementos pasivos en el análisis de cortocircuito, sus características técnicas son similares a las aplicadas en los estudios de flujo de carga.

### **3.4 Resultados de los Estudios de Corto Circuito.**

Las corrientes de cortocircuito han sido calculadas considerando los criterios técnicos indicados en la sección 2.3. La falla Trifásica a tierra y línea a tierra se aplica a cada barra del sistema.

#### **3.4.1 Caso Base.**

En el Anexo No. 3, se adjunta los resultados gráficos de los resultados de las corridas de Corto Circuito del Caso base, que se resumen a continuación:

### 3.4.1.1 Corriente de Falla en cada barra.

En la tabla 3.3, se muestran las corrientes de falla trifásica para cada barra en por unidad y en amperios.

| NÚMERO DE BARRA | NOMBRE DE BARRA        | FALLA TRIFÁSICA |               |                 |
|-----------------|------------------------|-----------------|---------------|-----------------|
|                 |                        | CORRIENTE [pu]  | CORRIENTE [A] | ÁNGULO [GRADOS] |
| 1               | PASCUALES 230 KV       | 42,241          | 10.603,400    | -84,65          |
| 2               | TRINITARIA 230 KV      | 25,896          | 6.500,520     | -83,92          |
| 9               | TRINITARIA 138 KV      | 29,908          | 12.512,600    | -81,08          |
| 11              | TRINITARIA 13,8 KV     | 17,044          | 71.307,600    | -81,86          |
| 12              | G VICTORIA 13,8 KV     | 7,298           | 30.533,300    | -86,33          |
| 13              | PASCUALES 138 KV       | 38,640          | 16.165,900    | -82,30          |
| 14              | PASCUALES 69 KV        | 18,927          | 15.836,600    | -84,44          |
| 15              | G PASCUALES 13,8 KV    | 10,320          | 43.177,000    | -83,08          |
| 16              | ELECTROQUIL 138 KV     | 11,196          | 4.684,220     | -73,78          |
| 17              | G3 EQL                 | 6,624           | 27.714,200    | -76,30          |
| 18              | G4 EQL                 | 6,624           | 27.714,200    | -76,30          |
| 19              | HOLCIM 69 KV           | 4,761           | 3.984,090     | -80,57          |
| 20              | GENEROCA 13,8 KV       | 1,845           | 7.717,150     | -83,62          |
| 21              | POSORJA 138 KV         | 3,227           | 1.350,130     | -69,10          |
| 23              | SALITRAL 138 KV        | 35,974          | 15.050,600    | -80,56          |
| 24              | SALITRAL 69 KV         | 36,134          | 30.234,900    | -78,79          |
| 25              | A. SANTOS 69 KV        | 34,707          | 29.040,500    | -78,97          |
| 26              | G1 SANT                | 7,013           | 29.339,600    | -82,15          |
| 27              | G2 SANT                | 7,013           | 29.339,600    | -82,15          |
| 28              | G3 SANT                | 6,762           | 28.292,100    | -81,92          |
| 29              | G4 SANT                | 8,802           | 36.822,900    | -82,48          |
| 30              | G5 SANT                | 7,188           | 30.071,000    | -82,42          |
| 31              | V SANT                 | 4,079           | 17.065,800    | -79,41          |
| 32              | TINAJERO 69 KV         | 33,692          | 28.191,600    | -77,89          |
| 33              | G1 TINAJ               | 8,963           | 36.663,400    | -80,37          |
| 34              | G2 TINAJ               | 3,383           | 14.154,500    | -85,26          |
| 35              | GONZALO ZEVALLOS 69 KV | 35,320          | 29.553,700    | -78,77          |
| 36              | TV2 GZ                 | 9,977           | 41.739,200    | -79,03          |
| 37              | TV3 GZ                 | 10,061          | 42.093,300    | -79,11          |
| 38              | TG4 GZ                 | 3,325           | 13.912,800    | -85,06          |
| 39              | ELECTROQUIL 69 KV      | 16,145          | 13.508,800    | -75,49          |
| 40              | G1 EQL                 | 9,049           | 37.860,300    | -75,40          |
| 41              | G2 EQL                 | 11,384          | 47.628,100    | -77,56          |
| 42              | CARGA CHILLERS         | 15,888          | 220.500,000   | -75,60          |
| 43              | MC1 4.16 KV            | 16,872          | 231.934,000   | -81,89          |

Tabla 3.3 - Corriente de falla trifásica en cada barra del Sistema.

En la tabla 3.4 se muestran las corrientes de falla línea a tierra en por unidad y en amperios.

| NÚMERO DE BARRA | NOMBRE DE BARRA        | FALLA LÍNEA A TIERRA |               |                 |
|-----------------|------------------------|----------------------|---------------|-----------------|
|                 |                        | CORRIENTE [pu]       | CORRIENTE [A] | ÁNGULO [GRADOS] |
| 1               | PASCUALES 230 KV       | 48,895               | 12.273,600    | -85,67          |
| 2               | TRINITARIA 230 KV      | 25,346               | 6.362,330     | -84,80          |
| 9               | TRINITARIA 138 KV      | 33,083               | 13.840,900    | -82,42          |
| 11              | TRINITARIA 13,8 KV     | 13,761               | 57.571,800    | -83,12          |
| 12              | G VICTORIA 13,8 KV     | 7,469                | 31.248,400    | -86,75          |
| 13              | PASCUALES 138 KV       | 42,524               | 17.790,800    | -83,87          |
| 14              | PASCUALES 69 KV        | 20,136               | 16.840,300    | -86,06          |
| 15              | G PASCUALES 13.8 KV    | 12,056               | 50.439,400    | -83,48          |
| 16              | ELECTROQUIL 138 KV     | 10,115               | 4.232,020     | -76,30          |
| 17              | G3 EQL                 | 8,517                | 35.632,700    | -76,57          |
| 18              | G4 EQL                 | 8,517                | 35.632,700    | -76,57          |
| 19              | HOLCIM 69 KV           | 4,535                | 3.794,390     | -82,35          |
| 20              | GENEROCA 13.8 KV       | 1,804                | 7.546,020     | -86,73          |
| 21              | POSORJA 138 KV         | 2,286                | 956,363       | -70,85          |
| 23              | SALITRAL 138 KV        | 37,907               | 15.859,000    | -81,65          |
| 24              | SALITRAL 69 KV         | 39,443               | 33.003,400    | -80,43          |
| 25              | A. SANTOS 69 KV        | 37,376               | 31.274,100    | -80,54          |
| 26              | G1 SANT                | 9,433                | 39.463,100    | -82,24          |
| 27              | G2 SANT                | 9,433                | 39.463,100    | -82,24          |
| 28              | G3 SANT                | 9,151                | 38.285,100    | -82,01          |
| 29              | G4 SANT                | 10,377               | 43.415,200    | -82,53          |
| 30              | G5 SANT                | 9,426                | 39.434,900    | -82,52          |
| 31              | V SANT                 | 4,099                | 17.148,000    | -79,54          |
| 32              | TINAJERO 69 KV         | 35,193               | 29.447,300    | -79,26          |
| 33              | G1 TINAJ               | 10,288               | 43.043,900    | -80,48          |
| 34              | G2 TINAJ               | 3,397                | 14.211,000    | -85,42          |
| 35              | GONZALO ZEVALLOS 69 KV | 38,165               | 31.934,100    | -80,37          |
| 36              | TV2 GZ                 | 12,769               | 53.420,800    | -79,26          |
| 37              | TV3 GZ                 | 12,859               | 53.797,200    | -79,35          |
| 38              | TG4 GZ                 | 3,348                | 14.007,200    | -85,24          |
| 39              | ELECTROQUIL 69 KV      | 15,349               | 12.843,500    | -76,54          |
| 40              | G1 EQL                 | 10,357               | 43.330,700    | -75,51          |
| 41              | G2 EQL                 | 12,608               | 52.749,300    | -77,83          |
| 42              | CARGA CHILLERS         | 15,117               | 209.801,000   | -76,62          |
| 43              | MC1 4.16 KV            | 24,988               | 343.490,000   | -81,94          |

Tabla 3.4 - Corriente de Falla línea a tierra en cada barra del Sistema.

### 3.4.1.2 Capacidad de Interrupción.

| NÚMERO DE BARRA | NOMBRE DE BARRA    | VOLTAJE [KV] | CORRIENTE DE INTERRUPCIÓN [KA] | MVA DE INTERRUPCIÓN |
|-----------------|--------------------|--------------|--------------------------------|---------------------|
| 9               | Trinitaria 138 KV  | 138          | 15,23                          | 3640                |
| 11              | Trinitaria 13,8 KV | 13,8         | 85,68                          | 2048                |

Tabla 3.5 - Corriente de Interrupción.

## 3.5 Conclusiones y recomendaciones.

- El presente estudios de Corto Circuito preparado para la Central Térmica Trinitaria ha permitido cumplir los siguientes objetivos:
  - Determinar el efecto de las corrientes de falla en los componentes del sistema tales como cables, barras y transformadores durante el tiempo que persista la falla.
  - Determinar las zonas del sistema en donde la falla puede resultar en depresión inaceptable de voltajes.
  
- El estudio de corto circuito considera los siguientes tipos de falla:
  - Falla Trifásica a tierra.
  - Falla de línea a tierra.

- La corriente de falla a línea a tierra fue limitada a la corriente de falla trifásica a tierra, por medio de la instalación de una resistencia puesta a tierra en el generador, a través de un transformador de distribución.
- Las corrientes de cortocircuito han sido calculadas considerando los estándares de la IEEE aplicables para el cálculo de falla para voltajes medio y alto. IEEE Std C37.010-1979, IEEE Std C37.5-1979, IEEE Std 141-1993, IEEE Std 241-1990, y la IEEE Std 242-1986.
- Las fallas Trifásica a tierra y línea a tierra fueron aplicadas a cada barra del sistema de la Central Térmica Trinitaria, los resultados se muestran en el Anexo No. 3.
- El ajuste de los equipos de protección, los cuales son determinados considerando el sistema bajo condiciones de falla, será estudiada en la tercera parte de este trabajo relacionada con la coordinación de las protecciones.

## **CAPÍTULO 4**

### **COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES**

Los estudios de flujo de carga y Corto Circuito de la Central Térmica Trinitaria son la base para el ajuste y coordinación de las Protecciones del Sistema de Generación. Los estudios tienen los siguientes objetivos:

- Determinar el ajuste de los equipos de protección, los cuales son establecidos considerando el sistema bajo de condiciones falla.
- Determinar la coordinación de las Protecciones del sistema de la Central Térmica Trinitaria propiamente y respaldo al SIN.
- La aplicación del Estudio permitirá el despeje oportuno y selectivo de las fallas del sistema.

#### **4.1 Esquema de Protecciones.**

En el Anexo No. 4, se muestra el Esquema General de Protecciones de la Central Térmica Trinitaria, tanto para el Generador como para el Transformador Principal, constituidos por los relés de protección marca ABB que se detallan posteriormente.

##### **4.1.1 Relés de Protección de la Central Térmica Trinitaria.**

A continuación se indican los relés de protección que corresponden al Generador, al Transformador Principal y al Transformador de Servicios Auxiliares.

###### **4.1.1.1 Relés de Protección para el Generador.**

- Relé diferencial del generador (87G)
- Relé de secuencia negativa de generador (46G)
- Relé de pérdida de excitación de generador (40G)
- Relé de retorno de energía de generador (32A G - 32B G)
- Relé de sobrecarga de generador (49G)
- Relé de sobretensión del generador (59G)
- Relé de mínima tensión del generador (27G)
- Relé de mínima frecuencia de generador (81A G - 81B G)
- Relé de baja potencia de generador (37G)
- Relé de desequilibrio de tensiones (60A G - 60B G)
- Relé de falla a tierra del estator (64 SG)
- Relé de impedancia de generador (21G)
- Relé de sobreexcitación V/Hz (59/81)

###### **4.1.1.2 Relés de Protección para el Transformador Principal.**

- Relé diferencial del generador - transformador (87GT)
- Relé de sobre intensidad de transformador principal (51 MT)

- Relé de sobre intensidad homopolar de transformador principal (51N MT)

#### **4.1.1.3 Relés de Protección para el Transformador de Servicios Auxiliares.**

- Relé diferencial de transformador auxiliar (87 UT1)
- Relé de sobre intensidad de transformador auxiliar (51 UT1)
- Relé de sobre intensidad homopolar de transformador auxiliar (51N UT1)

### **4.2 Ajuste y Coordinación de las Protecciones.**

La información básica para el ajuste de las protecciones proviene de los estudios de flujo de carga, cortocircuito y de los esquemas de protección indicados en la sección anterior.

#### **4.2.1 Protecciones del Generador.**

##### **4.2.1.1 Relé diferencial del Generador (87 G).**

El relé tipo **RADHA** marca ABB, es el utilizado en la Central para la protección diferencial del generador. El RADHA es un relé diferencial de alta velocidad, sensible de alta impedancia para protección de fallas de fase y de tierra de barras, autotransformadores, reactores, generadores y motores. La utilización del relé no está limitada por la saturación de los transformadores de corriente para fallas internas ni para fallas externas, esto está considerado en las fórmulas de ajustes. La tensión de saturación de los transformadores de corriente involucrados debe ser por lo menos el doble del valor de operación seleccionado de RADHA y no se pueden realizar correcciones de las relaciones de los transformadores de corriente. Se utilizan resistencias no

lineales en cada fase para proteger los transformadores de corriente contra picos elevados de tensión durante las fallas internas.

En los esquemas convencionales de corriente balanceada de tipo diferencial, puede ocurrir un considerable desequilibrio de corriente durante las fallas pasantes, debido a la saturación de los transformadores de corriente. La saturación es ocasionada por los transitorios de corriente continua de la corriente de falla. Esto puede suceder aún si los transformadores de corriente tienen factor de saturación de sobrecorriente, el cual excede el valor máximo simétrico de la corriente de falla. A fin de evitar disparos incorrectos en esas condiciones se utilizan relés retardados o de acción lenta con un frenado elevado.

El relé RADHA es del tipo de frenado de alta impedancia y ha sido diseñado con circuitos de filtro, los cuales atenúan la componente de corriente continua.

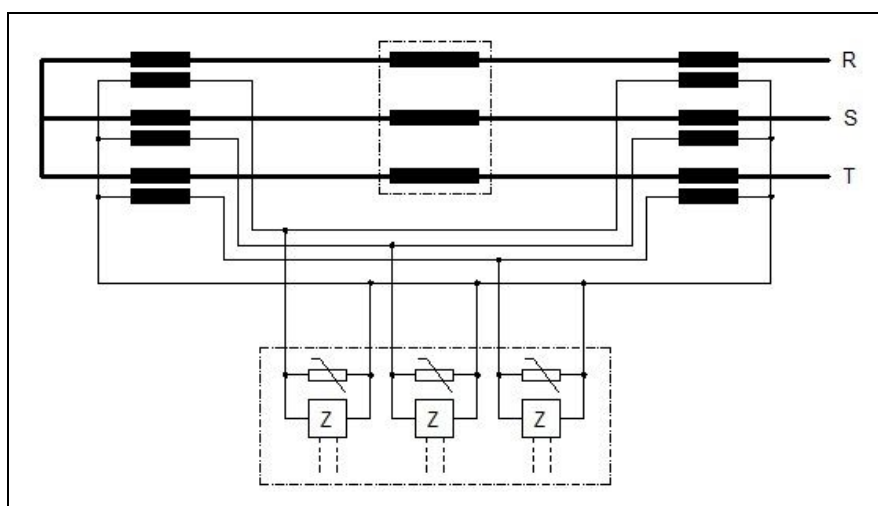


Figura 4.1 - Principio de aplicación del relé de alta impedancia.

A continuación se indican las características generales del relé diferencial tipo RADHA:

- ✓ Operación segura, no afectada por la saturación de los transformadores de corriente.
- ✓ Alta velocidad de operación, un ciclo típico.
- ✓ Operación trifásica.
- ✓ Valor fijo o ajustable de operación, 10 – 400 V.
- ✓ Incluye dispositivo de prueba.
- ✓ Se incluyen relés de disparo y de banderola.
- ✓ Supervisión de TC opcional.

El relé tipo RADHA está disponible en ocho versiones, cinco de estas versiones cada una con valores de operación de reconexión  $U_{s1}$  y  $U_{s2}$ , y tres versiones con valor de operación continuo ajustable entre 100 y 400 V. El valor de operación más bajo es de 10 V.

El relé básico incluye RTXP 18 Interruptor de prueba, 1 RXTLA módulo rectificador, RXTCA 1 módulo de condensadores y un RXID 1 relé de sobrecorriente. El RXID 1 es un relé electromecánico de sobrecorriente con un contacto extra fuerte dos contactos (de disparo) fuertes. El tiene valores fijos de operación. Un conector cortocircuitante tipo RTXK es suministrado con el relé de sobrecorriente. Este conector se instala en la parte posterior de la base terminal. El circuito de medida del relé es alimentado a través del RTXK, de tal manera, que el secundario del transformador de corriente es cortocircuitado automáticamente cuando el relé es sacado de la base terminal.

En todas las versiones el valor de operación de la protección se establece en las resistencias, ya sea montado en la unidad RXTLA 1 o para la versión

100-400 V en resistencias ajustables montados en un aparato placa junto con las resistencias no lineales.

El RADHA se conecta normalmente a  $U_{s1}$ , valor a operar, cuando es entregado.

#### 4.2.1.1.1 Datos técnicos del relé tipo RADHA.

En la tabla 4.1, se muestran los datos técnicos principales del relé de protección diferencial tipo RADHA.

| Característica                             | Descripción                                                                         |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Función                                    | : Protección contra cortocircuitos en generador.                                    |
| Tipo                                       | : RADHA                                                                             |
| Fabricante                                 | : ABB                                                                               |
| Modelo                                     | : RK 646 009-CA                                                                     |
| Esquema                                    | : 7417 015-CA                                                                       |
| Intensidad nominal del relé                | : 5 A                                                                               |
| Voltaje de operación $U_{s1}/U_{s2}$       | : 10/15; 19/29; 38/48; 67/97; 100-400* V                                            |
| Corriente de operación del relé aproximado | : 20 mA; 75 mA*                                                                     |
| Frecuencia                                 | : 60 Hz                                                                             |
| Tensión Auxiliar                           | : 125 Vcc                                                                           |
| Conexión                                   | : Transformadores de corriente de lado de neutro y de lado de salida del generador. |
| Disparo                                    | : Interruptor 52G (Generador)                                                       |
|                                            | Excitación                                                                          |
|                                            | Turbina                                                                             |

Tabla 4.1 - Datos técnicos principales del relé tipo RADHA (87 G).

La práctica ha mostrado que un ajuste del relé, de acuerdo a la fórmula de abajo, es suficiente para garantizar la operación correcta del relé, incluso para la saturación transitoria más extrema del transformador de corriente.  $U_s$  es calculado para la corriente máxima de falla usando la siguiente fórmula:

$$U_s > I_2 R_2$$

Donde,

$U_s$  = Ajuste del voltaje de operación.

$I_2$  = Corriente secundaria a la máxima corriente de falla.

$R_2$  = Suma de la máxima resistencia secundaria del transformador de corriente y de la resistencia del conductor hasta el punto de unión.

Cuando ocurre una falla a tierra, rápidamente se genera una tensión a lo largo del circuito del relé. A fin de prevenir que esa tensión llegue a valores muy elevados, el relé puede conectarse en paralelo con una resistencia de pendiente. El relé opera cuando la corriente primaria a tierra asciende a:

$$I_F > n (I_n + \sum I_M + I_{Res})$$

Donde,

$n$  = Relación de espiras del transformador de corriente.

$I_n$  = Corriente de operación del relé (normalmente 20 mA).

$\sum I_M$  = Suma de la corriente de magnetización en la tensión de operación  $U_s$  de todos los transformadores de corriente involucrados.

$I_{Res}$  = Corriente en la resistencia no lineal a tensión  $U_s$ , ver la figura 4.2.

En la figura 4.2, se muestran las curvas características corriente-voltaje para las resistencias no lineales.

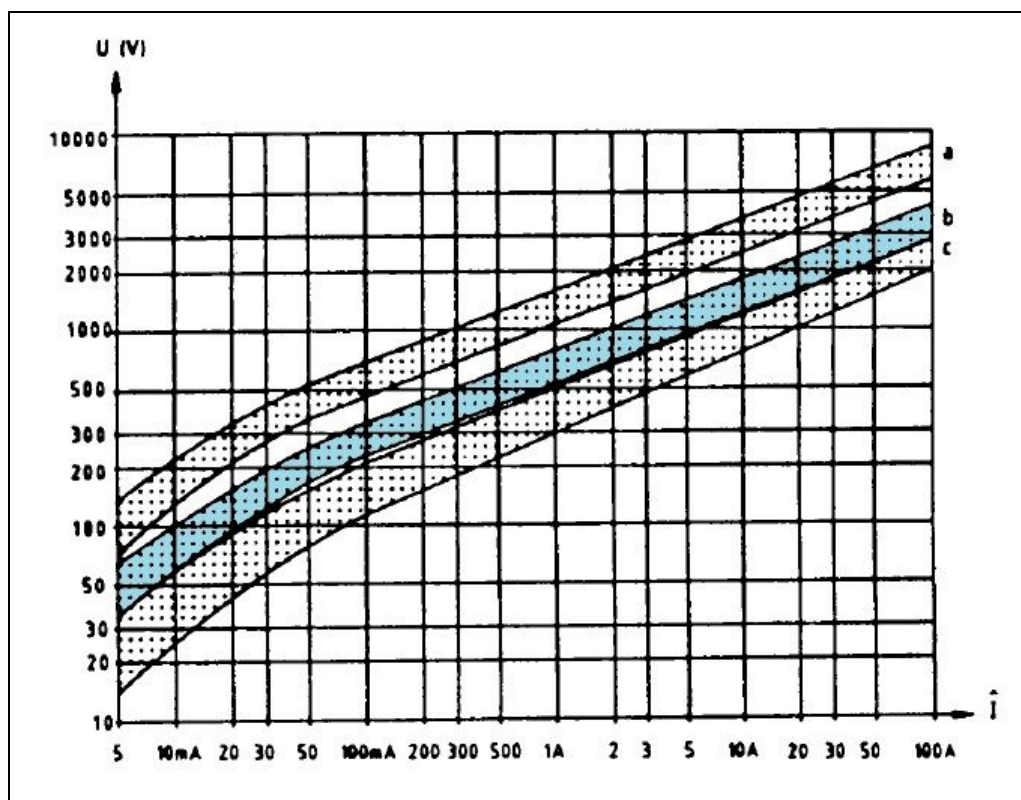


Figura 4.2 - Curvas característica corriente-voltaje para las resistencias no lineales.

En la tabla 4.2, se indica la curva característica de acuerdo al valor de operación  $U_s$ .

| Valor de operación $U_s$ | Tipo de Resistencia | Curva característica        |
|--------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 10-50 V                  | 5248 831 - B        | c                           |
| 50-100 V                 | 5248 831 - C        | b                           |
| 100-130 V                | 5248 831 - D        | b (0,5 x resistencia total) |
| 130-400 V                | 5248 831 - D        | a (resistencia total)       |

Tabla 4.2 - Curva característica según el valor  $U_s$ .

#### 4.2.1.1.2 Ajustes del relé tipo RADHA.

Para el cálculo de la corriente máxima de falla en el generador, nos pondremos en la situación más desfavorable, es decir, aquella que provocaría la mayor corriente de cortocircuito. Para el generador usaremos la reactancia Subtransitoria ( $X_d'' = 11,4\%$ ) y despreciaremos las impedancias de los contactos de interruptores, barras, etc.

La reactancia subtransitoria de acuerdo a las bases del sistema (100 MVA, 13,8 KV), es:

$$X_d'' = 0,114 * \left( \frac{13,8}{13,8} \right)^2 * \left( \frac{100}{156,5} \right) = 0,0728 pu$$

Entonces, la corriente máxima de falla en el generador en por unidad es:

$$I_{F3\phi} = \frac{1}{X_d''} = \frac{1}{0,0728} = 13,74 pu$$

La corriente base de lado del generador es:

$$I_{BASE-13,8} = \frac{100000 KVA}{\sqrt{3} * 13,8 KV} = 4.183,70 Amp$$

Por lo tanto, la corriente máxima de falla trifásica en el generador es:

$$I_{F3\phi} = 13,74 * 4183,70 = 57.484 Amp$$

Este valor es menos de ocho veces la corriente nominal de los

transformadores de corriente, y siendo estos de clase 5P20, es decir, 20 veces la corriente nominal del TC, siempre trabajarán en la zona lineal, y por lo que no habría problemas de saturación.

La relación de los transformadores de corriente es de 8.000/5, por consiguiente, la máxima corriente de falla que observa el relé es:

$$I_2 = 57,484 * \frac{5}{8.000} = 35,92 \text{ Amp}$$

Se asume una resistencia máxima  $R_2$  de 1,9 ohmios. Entonces, la tensión máxima desarrollada a través del relé  $U_s$ , es:

$$U_s > I_2 R_2 > 35,92 * 1,9$$

$$U_s > 68,25 \text{ V}$$

Por lo tanto, el ajuste del relé diferencial tipo RADHA es como se muestra a continuación:

| <b>Ajuste del relé 87 G</b>      |         |
|----------------------------------|---------|
| Voltaje de operación ( $U_s$ )   | : 69 V  |
| Tiempo de operación para disparo | : 30 ms |

Tabla 4.3 - Ajuste del relé tipo RADHA.

#### 4.2.1.2 Relé de secuencia negativa del Generador (46 G).

Las intensidades en una máquina trifásica están normalmente en equilibrio,

pero sí se produce una falla en la red alimentada o alimentadora, este equilibrio puede perderse. Las fallas monofásicas o bifásicas, falla de fase o carga asimétrica pueden dar a lugar a corrientes de desequilibrio lo que significa corrientes de secuencia negativa. Estas corrientes generan un flujo en el estator de la máquina y este flujo tiene la misma velocidad de rotación como la del flujo del rotor pero gira en dirección opuesta. Con relación al rotor, el flujo gira por lo tanto a frecuencia doble que el de la red y genera corrientes Eddy en el rotor. La alta frecuencia de estas corrientes Eddy hacen que las partes externas del rotor y del devanado, estén sujetas a calentamiento. Si la corriente de secuencia negativa es de magnitud elevada, o si persiste durante periodos de tiempo largos, estas partes del rotor pueden sufrir daño a causa de sobrecalentamiento.

Se supone normalmente que un generador puede soportar corrientes de secuencia negativa que excedan un valor mínimo dado por un periodo de tiempo  $t$ , que se determina por la siguiente fórmula:

$$t = K \left( \frac{I_n}{I_{nsc}} \right)^2$$

Donde,

$I_n$  = Intensidad nominal de la máquina

$I_{nsc}$  = Corriente de secuencia negativa

$t$  = Tiempo en segundos

$K$  = Constante en segundos que es característica para el generador. Esta constante representa el tiempo durante el cual, una corriente de secuencia negativa, que sea equivalente a la intensidad nominal del generador, puede ser tolerada.

La validez de la ecuación está basada en el supuesto de que toda la energía generada por la corriente de secuencia negativa, se transmite en forma de calor al rotor sin disipación en el medio envolvente. En la realidad, una cierta parte de este calor es disipado en el medio de refrigeración envolvente en el estator. Si la corriente de secuencia negativa es de una naturaleza continua, se obtendrá un equilibrio térmico. La magnitud de esta corriente, que puede ser tolerada por un periodo de tiempo ilimitado sin peligro de daño térmico en el rotor, varía dependiendo del tipo de generador y del método de refrigeración utilizado. Además en el caso de generadores de polos salientes puede asegurarse que las corrientes Eddy se presentan en gran proporción en los arrollamientos de amortiguamiento. En generadores de centrales hidroeléctricas, estos arrollamientos están ampliamente dimensionados y los generadores de este tipo serán capaces, por consiguiente, de soportar mayor corriente de secuencia negativa que turbogeneradores de similares características nominales.

Los modernos turbogeneradores de refrigeración directa y generadores de polos salientes sin arrollamientos de amortiguamientos, pueden sufrir daño y deben por lo tanto ser desconectados si la corriente de secuencia negativa persiste durante un largo periodo cualquiera con un valor que exceda de 5% de la intensidad nominal de la máquina.

Debe ser también posible ajustar la protección para diferentes valores de la constante  $K$ . Esta constante varía dependiendo del tipo de generador y el tipo de refrigeración en cuestión. Para la mayor parte de los tipos de generadores, el valor cae entre 5 y 30 segundos pero, para algunos generadores de polos salientes en centrales hidroeléctricas, puede llegar a ser tan alto como 60 segundos.

En la tabla 4.4, se muestran valores típicos para generadores según el tipo,

de conformidad a las normas IEEE C37.102 y ANSI C50.13-1989.

| Tipo de Generador            | $I_2$ permitida<br>(% de $I_n$ ) | $K=I_2^2 t$<br>permitida<br>(segundos) |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
| Polos Salientes:             |                                  |                                        |
| Con devanados amortiguadores | 10                               | 40                                     |
| Sin devanados amortiguadores | 5                                | 40                                     |
| Rotor Cilíndrico             |                                  |                                        |
| Indirectamente refrigerado   | 10                               | 30                                     |
| Directamente refrigerado     | $8^{(1)}$                        | $5-10^{(1)}$                           |

(1) Los valores más bajos son típicos para grandes máquinas ( $P > 800 \text{ MVA}$ )

Tabla 4.4 - Valores típicos para Generadores.

El relé utilizado en la Central Térmica Trinitaria para este tipo de protección es el tipo **RARIB 2**, marca ABB. La protección de corriente de secuencia negativa tipo RARIB protege a las máquinas de C.A. contra el sobrecalentamiento peligroso que puede producirse a causa de la corriente de secuencia negativa. La protección puede obtenerse para intensidades nominales de 1, 2 y 5 A, 50 ó 60 Hz.

A continuación se indican las características generales del relé de secuencia negativa tipo RARIB 2:

- ✓ Nivel de alarma ajustable sin escalonamientos entre 3-9% ó alternativamente 7-21% de la corriente de secuencia negativa. La alarma puede ajustarse para que ocurra después de 0,1 ó 6 segundos de retardo.

- ✓ Nivel de la función de arranque ajustable sin escalonamiento entre 4-16% ó alternativamente entre 10-40% de la corriente de secuencia negativa.
- ✓ Función de disparo con característica de tiempo inverso adaptable a las posibilidades de la máquina protegida en lo que respecta a sus posibilidades de soportar corriente de secuencia negativa.
- ✓ Disponibilidad de memoria durante el tiempo de reposición. La memoria toma en consideración el tiempo de operación y lo acorta en relación con la operación precedente con corriente de secuencia negativa que no dió lugar a disparo.
- ✓ Adaptación ajustable sin escalones de la intensidad nominal del relé  $I_n$ , a la intensidad nominal de la máquina entre los límites de operación de 0,7 a 1,1 veces  $I_n$ .
- ✓ Lleva incorporado un conmutador de pruebas que proporciona la posibilidad de efectuar pruebas funcionales mientras la máquina permanece en operación.

El gráfico de la figura 4.3, muestra la gama de operación de RARIB a ambos lados de la curva ideal (línea de trazos) para la protección. La relación  $t/K$  se muestra como una función de  $I_{nsc}\%$ , es decir, la corriente de secuencia negativa como un porcentaje de la intensidad nominal de la máquina.

La protección RARIB lleva incorporada una disposición para supresión de interferencias de alta frecuencia y se prueba de acuerdo con la norma SEN 36 1503 clase III. Esta protección de corriente de secuencia negativa está

constituida por seis unidades que están atornilladas a dos barras de aparatos para formar una unidad funcional integral y son las siguientes:

- Cajetín-conmutador de pruebas, RTXP 18.
- Convertidor C.C./C.C., RXTUG 2H.
- Filtro de corriente de secuencia negativa, RXTBIC 4.
- Unidad de medida, RXIEK 2H.
- Unidad de temporización, tipo RXKEB 2H.
- Relé de disparo, RXMM 1.

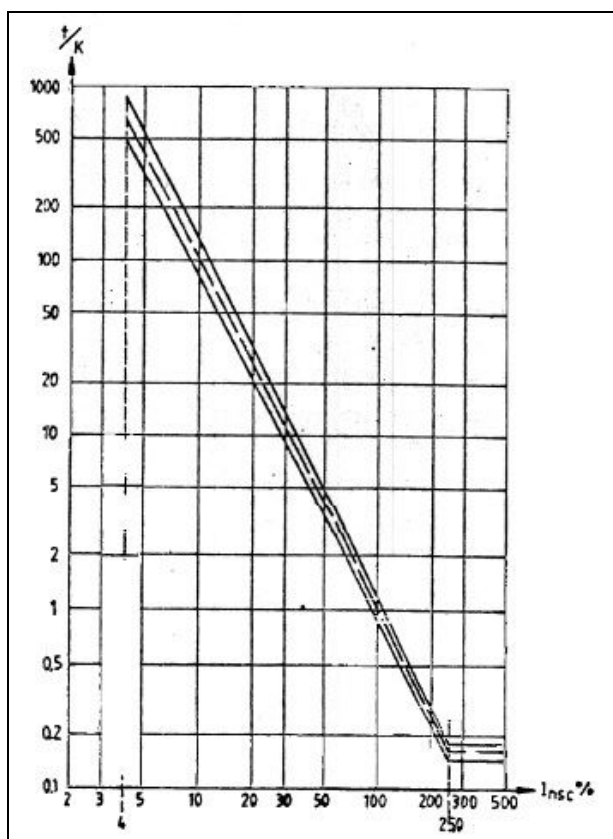


Figura 4.3 - Gama de operación de la protección RARIB 2.

#### 4.2.1.2.1 Datos técnicos del relé tipo RARIB 2.

En la tabla 4.5, se muestran los datos técnicos principales del relé de secuencia negativa tipo RARIB 2.

| Característica     | Descripción                                                                             |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra el calentamiento por desequilibrio de intensidades en el generador. |
| Tipo               | : RARIB 2                                                                               |
| Fabricante         | : ABB                                                                                   |
| Modelo             | : RK 648 012-CA                                                                         |
| Esquema            | : 7452 512-CA                                                                           |
| Intensidad nominal | : 5 A                                                                                   |
| Tensión nominal    | : ---                                                                                   |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                 |
| Tensión auxiliar   | : 125 Vcc                                                                               |
| Rango de ajuste    | : $I_M = (0,7-1,1) \times I_n$                                                          |
|                    | Alarma $I_{nsc} = (1-3) \times 3\% \times I_M$                                          |
|                    | Disparo $I_{nsc} = (1-4) \times 4\% \times I_M$                                         |
| Conexión           | : Transformadores de corriente de lado neutro del Generador                             |
| Disparo            | : Interruptor de Alta Tensión                                                           |

Tabla 4.5 - Datos técnicos principales del relé tipo RARIB 2.

#### 4.2.1.2.2 Ajustes del relé tipo RARIB 2.

El generador de la Central es de tipo rotor cilíndrico directamente refrigerado y de acuerdo a la tabla 4.4, la corriente de secuencia negativa permitida para este tipo de generador es el 8% de la corriente nominal de la máquina, este porcentaje corresponderá al nivel de alarma. Para el nivel de disparo o arranque del relé (start), se considerará que la corriente de secuencia negativa sea un 10% de la corriente nominal de la máquina.

La corriente de línea del generador es la siguiente:

$$I_G = \frac{156,5 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \bullet 13,8 \text{ KV}} = 6.547,48 \text{ Amp}$$

Por consiguiente, la corriente nominal de lado del relé es:

$$I_n = 6.547,48 * \frac{5}{8.000} = 4,09 \text{ Amp}$$

En la parte frontal de la unidad de medida RXIEK 2H del relé tipo RARIB 2, se ajustan tres parámetros que se detallan a continuación:

- a) Adaptación de la intensidad nominal de la protección  $I_n$ , a la intensidad nominal de la máquina,  $I_M$ . La escala está graduada en  $(0,7 - 1,1) \times I_n$ .
- b) Valor de operación para Alarma, con escala graduada en  $(1 - 3) \times 3\%$  de  $I_M$ .
- c) Valor de operación para Disparo o Arranque, con escala graduada en  $(1 - 4) \times 4\%$  de  $I_M$ .

La intensidad nominal de la máquina  $I_M$ , es como se indica a continuación:

$$I_M = Factor * I_{n-relé} = 4,09 \text{ Amp}$$

$$Factor = \frac{4,09}{5} = 0,818$$

Entonces, se ajusta la escala aproximadamente en 0,82 para la adaptación de la intensidad nominal de la protección  $I_n$ , a la intensidad nominal de la máquina,  $I_M$ .

Para el nivel de alarma del relé, se debe determinar el factor de ajuste con el fin de que el relé detecte la corriente de secuencia negativa cuando sea el 8% de la corriente nominal de la máquina. La corriente de secuencia negativa para el nivel de alarma es:

$$I_{nsc-Alarma} = 0,08 * I_M$$

$$I_{nsc-Alarma} = 0,08 * 4,09 = 0,3272 \text{ Amp}$$

La corriente de secuencia negativa para el nivel de alarma en función de la escala de ajuste es como se indica a continuación:

$$I_{nsc-Alarma} = F_{Nivel-Alarma} * 3\% I_M$$

Donde el factor de la escala para el nivel de alarma [ $F_{Nivel-Alarma}$ ], es:

$$F_{Nivel-Alarma} = \frac{I_{nsc-Alarma}}{3\% I_M} = \frac{0,3272}{0,03 * 4,09} = 2,67$$

Entonces, se ajusta la escala en 2,67 aproximadamente para el nivel de alarma del relé.

Para el nivel de arranque o de disparo del relé, se debe determinar el factor de ajuste con el fin de que el relé detecte la corriente de secuencia negativa cuando sea el 10% de la corriente nominal de la máquina. La corriente de secuencia negativa para el nivel de disparo es:

$$I_{nsc-Start} = 0,10 * I_M$$

$$I_{nsc-Start} = 0,10 * 4,09 = 0,4090 \text{ Amp}$$

La corriente de secuencia negativa para el nivel de disparo en función de la escala de ajuste, es como se indica a continuación:

$$I_{nsc-Start} = F_{Nivel-Start} * 4\% I_M$$

Donde el factor de la escala para el nivel de disparo [ $F_{Nivel-Start}$ ], es:

$$F_{Nivel-Start} = \frac{I_{nsc-Start}}{4\% I_M} = \frac{0,4090}{0,04 * 4,09} = 2,5$$

Entonces, se ajusta la escala en 2,5 para el nivel de disparo o arranque del relé.

En la unidad de temporización tipo RXKEB 2H del relé tipo RARIB 2, hay dos opciones para ajustar el tiempo para el nivel de alarma, 0,1 y 6 segundos, nuestro estudio considera un tiempo de retardo de 0,1 segundos para el nivel de alarma.

Para determinar el tiempo de operación del nivel de disparo del relé, se utiliza la siguiente fórmula:

$$t = k * \left( \frac{I_M}{I_{nsc}} \right)^2$$

Donde el valor de K es igual 10, de acuerdo a lo indicado en la tabla 4.4 según la norma ANSI C50.13-1989.

Por ejemplo, supongamos que la corriente de secuencia negativa sea 8 A, entonces, el tiempo de operación es:

$$t = 10 * \left( \frac{4,09}{8} \right)^2 = 2,61 \text{ s}$$

Si se desea determinar el tiempo por medio de la curva de operación de la figura 4.3, se debe determinar la corriente de secuencia negativa como porcentaje de la corriente nominal de la máquina, es decir,

$$\frac{I_{nsc}}{I_M} * 100 = \frac{8}{4,09} * 100 = 195\%$$

Observamos en la figura 4.3, que a 195% de la corriente nominal de la máquina la relación  $t/k$  es igual 0,26, entonces, el tiempo de operación es 2,6 s, dado que  $k$  es igual a 10.

Por lo tanto, los ajustes del relé de secuencia negativa tipo RARIB 2, son como los que se muestran a continuación:

| Ajustes del relé 46 G |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Nivel de Alarma       | : $I_{nsc} = 8\% I_n$           |
| Tiempo de Alarma      | : 0,1 s                         |
| Nivel de Disparo      | : $I_{nsc} = 10\% I_n$          |
| Tiempo de Disparo     | : $t_{disp} = k(I_n/I_{nsc})^2$ |

Tabla 4.6 - Ajustes del relé tipo RARIB 2.

#### 4.2.1.3 Relé de pérdida de excitación del Generador (40 G).

El relé utilizado en la Central para este tipo de protección es el tipo **RAGPC**, marca ABB. Este relé proporciona alarma para condiciones de subexcitación y da disparo para pérdida de excitación. La pérdida de excitación es detectada por el relé cuando el generador se embala y absorbe potencia reactiva del sistema con objeto de mantener la potencia activa que recibe del accionamiento motriz. Las corrientes inducidas en el rotor, como resultado de esta condición, pueden dar lugar a sobrecalentamiento peligroso, particularmente para rotores cilíndricos de turbogeneradores.

La magnitud de la energía reactiva absorbida del sistema es una función de la reactancia de la máquina y de la impedancia origen del sistema. La corriente resultante no tendrá carácter continuo, sino pulsatorio, y los relés de sobre intensidad retardados convencionales no pueden proteger al generador. Por consiguiente, son precisos relés de pérdida de excitación especiales para asegurar el disparo.

El relé RAGPC se utiliza cuando las máquinas trabajando en paralelo puedan mantener la tensión en bornes por encima de 0,85 p.u. en la máquina que ha perdido la excitación. El relé incluye, por consiguiente, un detector de intensidad adicional que se ajusta a una intensidad de 1.1 p.u. La corriente absorbida por la máquina que ha perdido el campo de excitación es generalmente del orden de 2 – 5 veces la intensidad nominal.

El relé RAGPC es adecuado para todo tipo de máquinas síncronas y la característica de operación se ajusta normalmente para coincidir lo más próximamente como sea posible, con la curva de capacidad térmica de la máquina subexcitada que se muestra en la figura 4.4.



aumentar de manera constante, la excitación del campo será reducida proporcionalmente por el funcionamiento normal del AVR.

La operación continua por debajo de la línea DC produce calentamiento severo del estator debido a un flujo de fuga externo, que entra y sale del núcleo del estator perpendicular a las laminaciones. El RAGPC comprende un relé de corriente direccional tipo RXPE 40, con una característica de operación que es básicamente independiente de la magnitud del voltaje de polarización, lo cual es importante para asegurar la operación cuando el voltaje terminal del generador se reduce durante condiciones de falla. Si la excitación es reducida de modo que el vector  $S_L$  vaya por debajo de la línea GC, se obtiene una condición de pérdida del campo y el relé direccional opera e inicia la alarma. Si al mismo tiempo, el voltaje terminal de la máquina es menos que 0,85 p.u., esto indicará un disturbio grave del sistema, lo que puede conducir a la inestabilidad de toda la red, y por lo tanto, el disparo es efectuado.

Con un AVR funcionando correctamente, la excitación reducida no puede producirse simultáneamente con un voltaje terminal del generador reducido. El relé RAGPC por lo tanto, incluye un relé de bajo voltaje tipo RXEG 2, el cual es normalmente ajustado cuando el voltaje terminal del generador se reduce por debajo de 0,85 p.u. (ó 0,95 del ajuste mínimo del AVR). El circuito de disparo se muestra en la figura 4.5. La operación del relé direccional de corriente tipo RXPE 40, inicia solamente una alarma por baja excitación. Si, sin embargo, la operación instantánea de bajo voltaje tipo RXEG 2 se produce, esto indica una falla dentro del sistema de excitación y por consiguiente, el disparo de la máquina es efectuado.

En el caso de dos o más generadores conectados en paralelo, el voltaje terminal probablemente no se reducirá por debajo de 0,85 p.u. durante la pérdida del campo de un generador. Por otro lado, puesto que el voltaje

terminal del generador es alto y la impedancia de la fuente es baja, el flujo de corriente del estator en la máquina defectuosa puede variar entre 2 - 5 veces la corriente nominal. Para garantizar el disparo del relé RAGPC, también incluye un relé de sobrecorriente tipo RXIG 2 que normalmente se establece para arranque en 1,1 p.u.

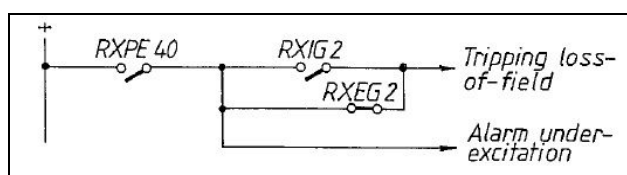


Figura 4.5 - Principio del circuito de disparo del RAGPC.

El relé direccional tipo RXPE 40 tiene una característica de tiempo inverso de acuerdo a la figura 4.6.

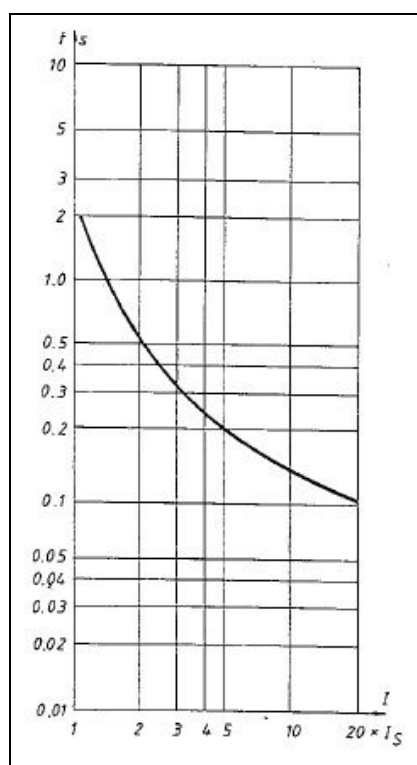


Figura 4.6 - Curva de tiempo de operación del relé direccional RXPE 40.

#### 4.2.1.3.1 Datos técnicos del relé tipo RAGPC.

En la tabla 4.7, se muestran los datos técnicos principales del relé de pérdida de campo tipo RAGPC.

| Característica     | Descripción                                                                                             |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra subexcitación del generador.                                                        |
| Tipo               | : RAGPC                                                                                                 |
| Fabricante         | : ABB                                                                                                   |
| Modelo             | : RK 641 010-CA                                                                                         |
| Esquema            | : 7452 461-CB                                                                                           |
| Intensidad nominal | : 5 A                                                                                                   |
| Tensión nominal    | : 100-120 V                                                                                             |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                                 |
| Tensión auxiliar   | : 125 Vcc                                                                                               |
| Rango de ajuste    | : Unidad Direccional (1 - 4 A)<br>Unidad Sobrecorriente (2,5 - 7,5 A)<br>Unidad Subtensión (40 - 120 V) |
| Conexión           | : Transformadores de corriente de lado neutro del generador y de potencial del generador                |
| Disparo            | : Interruptor generador<br>Excitación                                                                   |

Tabla 4.7 - Datos técnicos principales del relé tipo RAGPC.

#### 4.2.1.3.2 Ajustes del relé tipo RAGPC.

De acuerdo a las recomendaciones del fabricante, los ajustes normalmente están dentro de los siguientes rangos:

|                                            |                  |
|--------------------------------------------|------------------|
| Relé direccional de corriente tipo RXPE 40 | : 30-40% $I_n$   |
| Relé de sobrecorriente tipo RXIG 21        | : 110-115% $I_n$ |
| Relé de bajo voltaje tipo RXEG 21          | : 85-90 % $U_n$  |

Donde,  $U_n$  es el voltaje nominal secundario del transformador de potencial y que es igual a 115 V;  $I_n$  es la corriente nominal secundaria del transformador de corriente y que es igual a 5 A.

Para la unidad direccional RXPE 40, el rango de ajuste es:

$$I_s = (1 - 4) * 1 \text{ Amp}$$

Donde el valor de 1 A, es un valor establecido por la unidad direccional.

Se debe determinar el factor de ajuste que está dentro del rango de 1 a 4 y para ello, se sigue la siguiente recomendación de ABB:

$$I_s = (30 - 40\%) * I_n$$

Se asumirá el 35% de la corriente nominal del relé para la unidad direccional.

$$I_s = 35\% * I_n = 0,35 * 5 = 1,75 \text{ Amp}$$

Entonces, el factor de ajuste de la unidad direccional es:

$$I_s = F_{ajuste} * 1 \text{ Amp} = 1,75 \text{ Amp}$$

$$F_{ajuste} = 1,75$$

Para la unidad de sobrecorriente RXIG 21, el rango de ajuste es:

$$I_{sc} = (1 - 3) * 2,5 \text{ Amp}$$

Donde el valor de 2,5 Amp, es un valor establecido por la unidad de

sobrecorriente. Se debe determinar el factor de ajuste que está dentro del rango de 1 a 3 y para ello, se sigue la siguiente recomendación de ABB:

$$I_{sc} = (110 - 115\%) * I_n$$

Se asumirá el 110% de la corriente nominal del relé para la unidad de sobrecorriente.

$$I_{sc} = 110\% * I_n = 1,10 * 5 = 5,5 \text{ Amp}$$

Entonces, el factor de ajuste de la unidad de sobrecorriente es:

$$I_{sc} = F_{ajuste} * 2,5 \text{ Amp} = 5.5 \text{ Amp}$$

$$F_{ajuste} = \frac{5,5}{2,5} = 2,2$$

Así mismo, para la unidad de Subtensión RXEG 21, el rango de ajuste es:

$$U_{ST} = (1 - 3) * 40 \text{ V}$$

Donde el valor de 40 V, es un valor establecido por la unidad de subtensión. Se debe determinar el factor de ajuste que está dentro del rango de 1 a 3 y para ello, se sigue la siguiente recomendación de ABB:

$$U_{ST} = (85 - 90\%) * U_n$$

Se asumirá el 90% del voltaje nominal del relé para la unidad de subtensión.

$$U_{ST} = 90\% * U_n = 0,90 * 115 = 103,50 V$$

Entonces, el factor de ajuste de la unidad de subtensión es:

$$U_{ST} = F_{ajuste} * 40 V = 103,50 V$$

$$F_{ajuste} = \frac{103,50}{40} = 2,6$$

En la unidad de temporización tipo RXKL 1 del relé tipo RAGPC, el tiempo de operación del relé viene dado por la siguiente fórmula:

$$t = (a + b) * k$$

Donde, el valor de “a” está en un rango de (0 – 90), el valor de “b” está en un rango de (0 – 9) y el valor de “k” está en un rango de (0 – 1 min.).

Nuestro estudio considera los siguientes valores:

$$a = 0; b = 2; k = 1 \text{ seg.}$$

Entonces, el tiempo de operación del relé es de 2 segundos.

Por lo tanto, los ajustes del relé de pérdida de excitación tipo RAGPC son como los que se indican a continuación:

| <b>Ajustes del relé 40 G</b>           |            |
|----------------------------------------|------------|
| Unidad direccional (35% $I_n$ )        | : 1,75 A   |
| Unidad de sobrecorriente (110% $I_n$ ) | : 5,5 A    |
| Unidad de baja tensión (90% $U_n$ )    | : 103,50 V |
| Tiempo de ajuste                       | : 2 s      |

Tabla 4.8 - Ajustes del relé tipo RAGPC.

#### 4.2.1.4 Relé de retorno de energía del Generador (32 G).

El relé de retorno de energía ó de potencia inversa operará cuando la potencia activa fluya desde el sistema de potencia hacia el generador intentando hacerlo trabajar como motor. Este fenómeno ocurre cuando la turbina no entrega la suficiente potencia activa para cubrir las pérdidas eléctricas ( $I^2R$ ) y mecánicas (fricción) en el generador. Otras razones por las que el generador puede motorizarse son las siguientes:

- Pérdida repentina de la fuente de energía motriz cuando el generador aún se encuentra conectado al sistema de potencia.
- La turbina no entrega la suficiente potencia activa para cubrir las pérdidas, en ese caso, el generador empezará a tomar potencia activa desde el sistema y por tanto empezará a trabajar como motor.

La potencia inversa no tiene ningún efecto inmediato sobre el generador, sin embargo afecta seriamente a la turbina. En turbinas a vapor, el flujo del vapor funciona como un intercambiador de calor, lo que ayuda a disminuir la temperatura de los álabes. La etapa de la turbina que se ve más afectada es la de baja presión.

En turbinas hidráulicas, el mayor problema es la cavitación que se produce en la parte posterior de las paletas que se ven afectadas cuando un chorro de baja presión las golpea, cuando el rotor gira a una velocidad mayor a la proporcionada por los inyectores.

Las turbinas de gas, que utilizan sistemas de acople entre la turbina y el eje del generador, basados en engranes con dientes diseñados para trabajar en una sola dirección, pueden verse afectadas debido a que, en caso de motorización, el generador mueve a la turbina, provocando un contacto en la parte posterior de los dientes, que puede resultar perjudicial para dichos elementos.

El ángulo de fase  $\varphi$ , entre la corriente y la tensión aplicada del relé con el cual, el relé tiene su máxima sensibilidad se le denomina ángulo característico  $\alpha$ . Cuando  $\varphi = \alpha$ , el relé opera cuando la corriente aplicada al mismo  $I$ , alcanza el valor  $I_s$  ajustado en la escala. Para otros valores de  $\varphi$ , el relé opera cuando  $I \cos(\varphi - \alpha) \geq I_s$ , véase la figura 4.7.

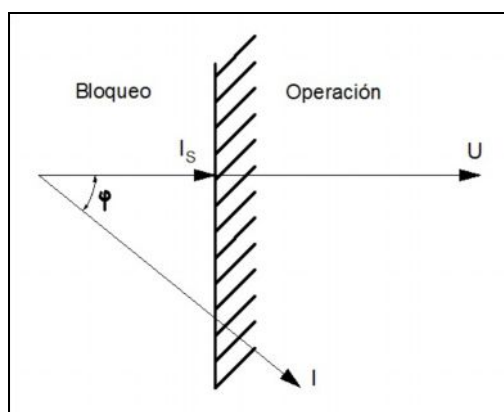


Figura 4.7 - Diagrama vectorial con líneas de funcionamiento del relé direccional, con  $\alpha = 0^\circ$ . Opera cuando  $I \cos(\varphi) \geq I_s$ .

Donde,

$I$  = Corriente aplicada al relé.

$I_s$  = Valor de operación ajustado = 1 a 4 veces el factor de escala  $k$ .

$U_n$  = Tensión nominal del relé.

$U$  = Tensión de C.A. conectada al relé.

$\alpha$  = Ángulo característico del relé.

$\varphi$  = Ángulo entre corriente y tensión aplicado al relé.

$\beta$  = Ángulo entre la tensión a que se refiere la corriente y la tensión  $U$ .

En sistemas trifásicos, la operación del relé viene también determinada por un ángulo  $\beta$  que es el ángulo entre la tensión de fase a la que la corriente está referida y la tensión aplicada al relé. Considerando  $\beta$  como positivo cuando la corriente está en retraso con respecto a la tensión de fase, el relé opera cuando  $I \cos(\varphi - \alpha + \beta) \geq I_s$ .

El relé utilizado en la Central Térmica Trinitaria para la protección de retorno de energía ó de potencia inversa es el tipo **RXPE 40**, marca ABB.

Este relé tiene un ángulo característico  $\alpha=0^\circ$  y opera en el ajuste más bajo, aún con la tensión bajando a un 0,6% de la nominal si la desviación máxima de  $\varphi$  es de  $\pm 30^\circ$  con respecto a  $\alpha$ , véase la figura 4.8.

Cuanto mayores son el ángulo de fase o el ajuste, tanto mayor es la corriente de funcionamiento, lo que significa que también la corriente de control debe ser mayor. Por consiguiente, la tensión necesaria para el funcionamiento aumenta al aumentar el ángulo de fase y el ajuste.

Este relé se utiliza como protección direccional para potencia activa o reactiva en redes cargada simétricamente con o sin conductor de neutro y también como protección de fallas a tierra direccional para la medida de la componente resistiva de las corrientes de falla a tierra en redes provistas de

resistencia de punto neutro, siendo también utilizada como protección de pérdida de sincronismo para motores síncronos.

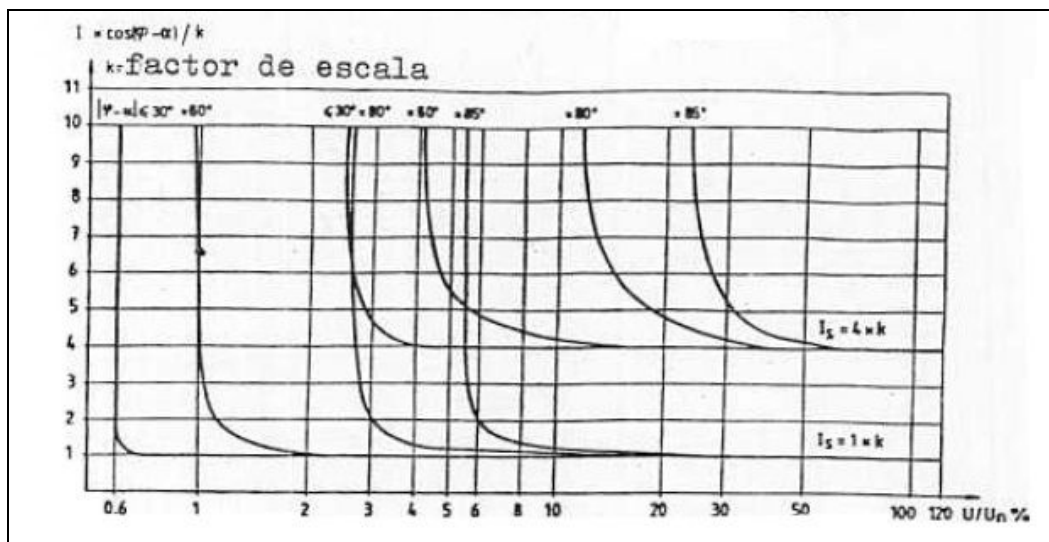


Figura 4.8 - El valor de funcionamiento  $I \cos \varphi$  expresado como múltiplo del ajuste de la escala, para diferentes valores de la tensión alterna  $U$  medida en porcentaje de la tensión nominal  $U_n$ , para diferentes ángulos de fase  $\varphi$ .

La tensión más baja a la que opera el relé depende también del valor ajustado en la escala de intensidad y de cuanto el ángulo de fase  $\varphi$  se desvía del ángulo característico  $\alpha$ . La figura 4.8 muestra dentro de que zona de tensión permanece constante el valor de operación y muestra también la tensión mínima requerida para obtener la operación.

El tiempo de operación del relé presenta una característica inversa y con diferentes constantes de tiempo en el circuito de filtrado. Para el relé RXPE 40, las curvas de tiempo son la 1, 2, 3 y 4 (véase la figura 4.9).

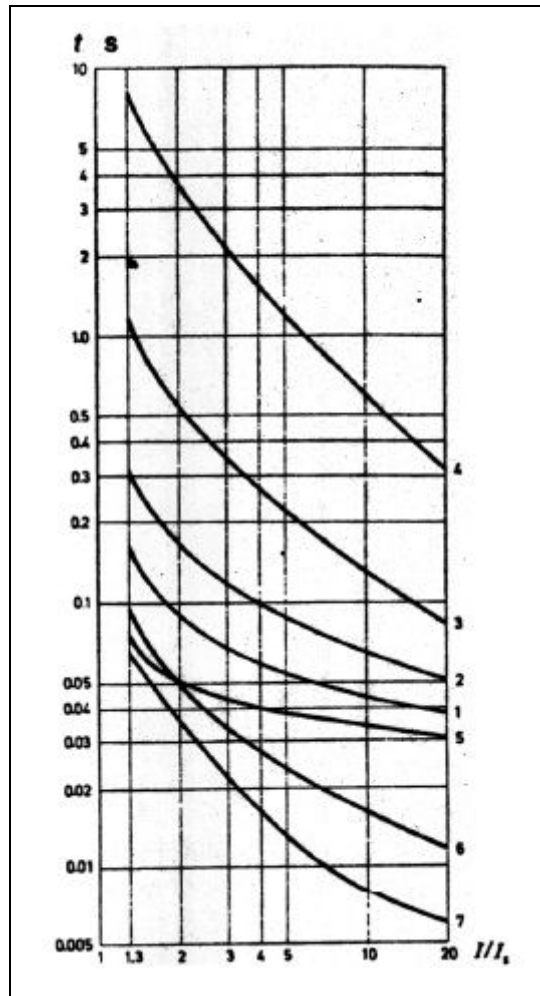


Figura 4.9 - Curvas de tiempo de operación.

#### 4.2.1.4.1 Datos técnicos del relé tipo RXPE 40.

En la tabla 4.9, se muestran los datos técnicos principales del relé de pérdida de campo tipo RXPE 40.

| Característica     | Descripción                                                                              |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra daños en turbina por motorización.                                   |
| Tipo               | : RXPE 40                                                                                |
| Fabricante         | : ABB                                                                                    |
| Modelo             | : RK 651 241-AA                                                                          |
| Esquema            | : 7432 0089-AB                                                                           |
| Intensidad nominal | : 5 A                                                                                    |
| Tensión nominal    | : 110 V                                                                                  |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                  |
| Tensión auxiliar   | : 125 Vcc                                                                                |
| Rango de ajuste    | : 30 - 120 mA<br>20 ms - 99 s                                                            |
| Conexión           | : Transformadores de corriente de lado neutro del generador y de potencial del generador |
| Disparo            | : Interruptor generador 52G<br>Excitación                                                |

Tabla 4.9 - Datos técnicos principales del relé tipo RXPE 40.

#### 4.2.1.4.2 Ajustes del relé tipo RXPE 40.

De acuerdo a los datos técnicos del relé, el rango de ajuste es de 30 a 120 mA, y para efectos de nuestro estudio, se asumirá el valor más bajo para el ajuste, entonces la corriente de ajuste  $I_s$  es igual a 30 mA.

Luego, el factor de escala  $k$  para realizar el ajuste deseado en el relé, es:

$$I_s = k * 30 \text{ mA} = 30 \text{ mA}$$

$$k = 1$$

Donde, el valor de 30 mA es un valor ya establecido en el relé.

El relé opera cuando la corriente aplicada al relé es mayor que la corriente de ajuste, es decir,

$$I * \cos(\varphi - \alpha) > I_s$$

Donde, el ángulo característico  $\alpha$  es igual a cero para este tipo de relé, por consiguiente, la expresión quedaría de la siguiente manera

$$I * \cos(\varphi) > 30 \text{ mA}$$

En la unidad de temporización RXKL 1, se ajusta el tiempo de operación a 1 segundo por medio de los siguientes parámetros:

$$a = 10; b = 0; k = 0,1 \text{ seg.}$$

Por lo tanto, los ajustes del relé de retorno de energía tipo RXPE 40, es como se indica en la tabla 4.10:

| Ajustes del relé 32 G |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| Valor de operación    | : $I_s = 30 \text{ mA}$ |
| Tiempo de ajuste      | : 1 seg.                |

Tabla 4.10 - Ajustes del relé tipo RXPE 40.

#### 4.2.1.5 Relé de sobretensión del Generador (59 G).

La protección mide permanentemente la tensión de cada fase con la finalidad de detectar las tensiones que son mayores que las del rango normal de operación.

Si la sobretensión es pequeña (etapa 1), el tiempo de retardo será mayor, para permitir que el regulador de voltaje intente restablecer el voltaje terminal a valores adecuados, mientras que si la sobretensión es muy grande (etapa 2), se produce el disparo con un tiempo de retardo muy pequeño.

La protección de sobretensión se utiliza principalmente para proteger a los equipos eléctricos conectados a los terminales del generador, contra voltajes que pueden estar por encima de un máximo tolerable. Las sobretensiones pueden ser producidos por:

- Incorrecta operación del regulador de voltaje del generador cuando este se encuentra en modo manual.
- Falla en el funcionamiento del regulador automático de voltaje.
- Pérdida repentina de carga.
- Aumento repentino en la velocidad de la turbina.
- Separación del generador del sistema de potencia durante operación.

Los efectos de estas sobretensiones es que pueden causar el daño en el aislamiento del devanado del estator.

El relé que es utilizado en la Central para la protección de sobretensión del generador es el tipo **RXEG 21**, marca ABB. A continuación se indican algunas características generales del relé:

- ✓ Protección de sobretensión monofásica o trifásica.
- ✓ Versiones con ó sin tiempo de retardo.
- ✓ Seis rangos de voltaje provee un rango total de ajuste de 5–480 V.
- ✓ El valor de operación cambia máximo 3% para frecuencias de 45-500 Hz.

#### 4.2.1.5.1 Datos técnicos del relé tipo RXEG 21.

En la tabla 4.11, se muestran los datos técnicos principales del relé de sobretensión tipo RXEG 21.

| Característica     | Descripción                                                                         |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra sobretensiones en generador por fallo del regulador de tensión. |
| Tipo               | : RXEG 21                                                                           |
| Fabricante         | : ABB                                                                               |
| Modelo             | : RK 651 264-BA                                                                     |
| Esquema            | : 7432 0073-BA / Conexión entre fases                                               |
| Intensidad nominal | : ---                                                                               |
| Tensión nominal    | : 115 V                                                                             |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                             |
| Tensión Auxiliar   | : 125 Vcc                                                                           |
| Rango de ajuste    | : 80 - 240 V<br>20 ms - 99 s                                                        |
| Conexión           | : Transformadores de tensión en la salida del Generador                             |
| Disparo            | : Interruptor Generador<br>Excitación                                               |

Tabla 4.11 - Datos técnicos principales del relé tipo RXEG 21.

#### 4.2.1.5.2 Ajustes del relé tipo RXEG 21.

La norma IEEE C37.102 recomienda un rango de 110 a 150 % del voltaje nominal para la operación del relé. En nuestro estudio se asumirá el 115% del voltaje nominal del relé. Para el ajuste del valor de operación del relé se debe determinar el factor de escala, tal como se muestra a continuación.

$$V_{operación} = F_{escala} * 80V = 115\% V_n$$

Donde, el valor de 80 V viene establecido en el relé.

Entonces, el factor de escala para el ajuste del relé es:

$$V_{operación} = F_{escala} * 80V = 1,15 * 115V$$

$$F_{escala} = \frac{132,25}{80} = 1,65$$

En la unidad de temporización tipo RXKL 1 del relé RXEG 21, se ajusta un tiempo definido de 2 segundos de conformidad con la norma IEEE C37.102, y de acuerdo a la ecuación  $t = (a + b) * k$ .

$$a = 0; b = 2; k = 1 \text{ seg.}$$

Por lo tanto, los ajustes del relé de sobretensión tipo RXEG 21, es como se indica en la tabla 4.12.

| Ajustes del relé 59 G              |            |
|------------------------------------|------------|
| Voltaje de operación<br>115% $V_n$ | : 132,25 V |
| Tiempo de operación                | : 2 seg.   |

Tabla 4.12 - Ajustes del relé tipo RXEG 21.

#### **4.2.1.6 Relé de mínima tensión del Generador (27 G).**

La protección mide permanentemente la tensión de cada fase con la finalidad de detectar las tensiones que son menores que las del rango normal de operación.

Los generadores son generalmente diseñados para funcionar de forma continua a un voltaje mínimo del 95% de su tensión nominal, mientras entrega potencia nominal a la frecuencia nominal.

La operación del generador con el voltaje del terminal inferior al 95% de su tensión nominal puede dar lugar a efectos indeseables tales como la reducción en el límite de la estabilidad, la importación de potencia reactiva excesiva de la red a la que está conectada, y el mal funcionamiento de los dispositivos sensibles tensión y equipo.

El relé que es utilizado en la Central para la protección de mínima tensión del generador es el tipo **RXEG 21**, marca ABB.

##### **4.2.1.6.1 Datos técnicos del relé tipo RXEG 21.**

En la tabla 4.13, se muestran los datos técnicos principales del relé de mínima tensión tipo RXEG 21.

| Característica     | Descripción                                             |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra mínima tensión en generador         |
| Tipo               | : RXEG 21                                               |
| Fabricante         | : ABB                                                   |
| Modelo             | : RK 651 200-BB                                         |
| Esquema            | : 7432 0071-BA                                          |
| Intensidad nominal | : ---                                                   |
| Tensión nominal    | : 115 V                                                 |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                 |
| Tensión Auxiliar   | : 125 Vcc                                               |
| Rango de ajuste    | : 40 - 120 V                                            |
| Conexión           | : Transformadores de tensión en la salida del Generador |
| Disparo            | : ---                                                   |

Tabla 4.13 - Datos técnicos principales del relé tipo RXEG 21.

#### 4.2.1.6.2 Ajustes del relé tipo RXEG 21.

La norma IEEE C37.102 recomienda un rango de 90 a 80 % del voltaje nominal para la operación del relé. En nuestro estudio se asumirá el 80% del voltaje nominal del relé.

Para el ajuste del valor de operación del relé se debe determinar el factor de escala, tal como se muestra a continuación.

$$V_{operación} = F_{escala} * 40V = 80\%V_n$$

Donde, el valor de 40 V viene establecido en el relé.

Entonces, el factor de escala para el ajuste del relé es:

$$V_{operación} = F_{escala} * 40V = 0,80 * 115V$$

$$F_{escala} = \frac{92}{40} = 2,3$$

Por lo tanto, el ajuste del relé de mínima tensión tipo RXEG 21, es como se indica en la tabla 4.14.

| <b>Ajuste del relé 27 G</b>       |         |
|-----------------------------------|---------|
| Voltaje de operación<br>80% $V_n$ | : 92 V  |
| Tiempo de operación               | : 55 ms |

Tabla 4.14 - Ajuste del relé tipo RXEG 21.

#### 4.2.1.7 Relé de baja frecuencia del Generador (81G).

Las protecciones de frecuencia son protecciones que toman la señal de tensión, pero miden la frecuencia de la onda alterna. La operación del generador a una frecuencia distinta a la nominal es producida por la sobrecarga del generador debido a la pérdida de un generador grande en el sistema de potencia. En este caso, el generador operará a una frecuencia menor a la nominal debido a que el torque eléctrico de la carga es mayor al torque mecánico de la turbina lo que resulta en un torque de desaceleración.

La baja frecuencia es considerada un problema mayor a la sobrefrecuencia, debido a que al ser ésta producida por un exceso de carga en el sistema, es muy difícil de controlar. El regulador de velocidad podrá actuar para conseguir el equilibrio entre torque mecánico y eléctrico, sólo hasta cuando la

potencia eléctrica (potencia de la carga) sea menor a la máxima potencia mecánica disponible en la turbina. En general la baja frecuencia resulta ser más crítica que la sobrefrecuencia porque el operador no tiene la opción directa de control.

La reducción de frecuencia, originada por la disminución en la velocidad de giro del rotor, reduce la ventilación sobre los devanados, y tomando en cuenta que la baja frecuencia es producto de la operación del generador cuando este trabaja sobrecargado, puede generar calentamiento suficiente para sobrepasar la curva de capacidad térmica de corta duración. La baja frecuencia, podría ocasionar incluso problemas de sobreexcitación aunque no es muy común que los límites de V/Hz sean superados porque aquello requeriría la operación a una frecuencia considerablemente reducida por un tiempo relativamente alto.

El relé que es utilizado en la Central para la protección de baja frecuencia del generador es el tipo **RXFE 4**. Este tipo de relé se utiliza generalmente cuando se desea una función de protección en baja o sobre frecuencia sea esta instantánea o temporizada.

Las perturbaciones de alta frecuencia y los armónicos estáticos no afectarán significativamente el desempeño del relé. Esto garantiza una medición precisa de frecuencia del sistema, incluso en redes con alto contenido de armónicos típico de enlaces HVDC, cargas de calefacción, grandes cargas de motores controlados por tiristores, compensadores estáticos de reactivos, etc. A continuación se indican algunas características generales del relé:

- ✓ Sobre o baja frecuencia.
- ✓ 64, 110 ó 220 Vac

- ✓ Operación instantánea independiente de la frecuencia de la velocidad de cambio.
- ✓ Autoalimentado del transformador de potencial.

#### 4.2.1.7.1 Datos técnicos del relé tipo RXFE 4.

En la tabla 4.15, se muestran los datos técnicos principales del relé de baja frecuencia tipo RXFE 4.

| Característica     | Descripción                                    |
|--------------------|------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra baja velocidad en turbina. |
| Tipo               | : RXFE 4                                       |
| Fabricante         | : ABB                                          |
| Modelo             | : RK 651 270-CA                                |
| Esquema            | : 7427 0001-CA                                 |
| Intensidad nominal | : ---                                          |
| Tensión nominal    | : 110 V                                        |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                        |
| Tensión Auxiliar   | : 125 Vcc                                      |
| Rango de ajuste    | : 53 - 60 Hz<br>20 ms - 99 s                   |
| Conexión           | : Transformadores de tensión del alternador    |
| Disparo            | : Interruptor de Alta Tensión 52-1G2           |

Tabla 4.15 - Datos técnicos principales del relé tipo RXFE 4.

#### 4.2.1.7.2 Ajustes del relé tipo RXFE 4.

Nuestro estudio considera el siguiente ajuste:

| Ajuste del relé 81 AG |         |
|-----------------------|---------|
| Frecuencia            | : 57 Hz |
| Tiempo de retardo     | : 3 s   |

Tabla 4.16 - Ajuste del relé tipo RXFE 4 (baja frecuencia).

#### 4.2.1.8 Relé de desequilibrio de tensiones (60 G).

El relé que es utilizado en la Central Térmica Trinitaria para esta protección es el tipo **RXBA 4**, marca ABB. El relé RXBA 4 opera para fallas de fusible mono, bi ó trifásicas en el circuito supervisado y para una interrupción en cualquiera de los hilos pilotos o sus fusibles asociados. Cuando un fusible se funde el relé opera rápidamente, lo suficiente para impedir la operación no deseada del relé de distancia de alta velocidad la cual ocurriría de otro modo. El RXBA 4 puede ser conectado a un transformador de tensión con dos arrollamientos secundarios, como se muestra en la figura 4.10, ó a dos transformadores pertenecientes del mismo circuito eléctrico.

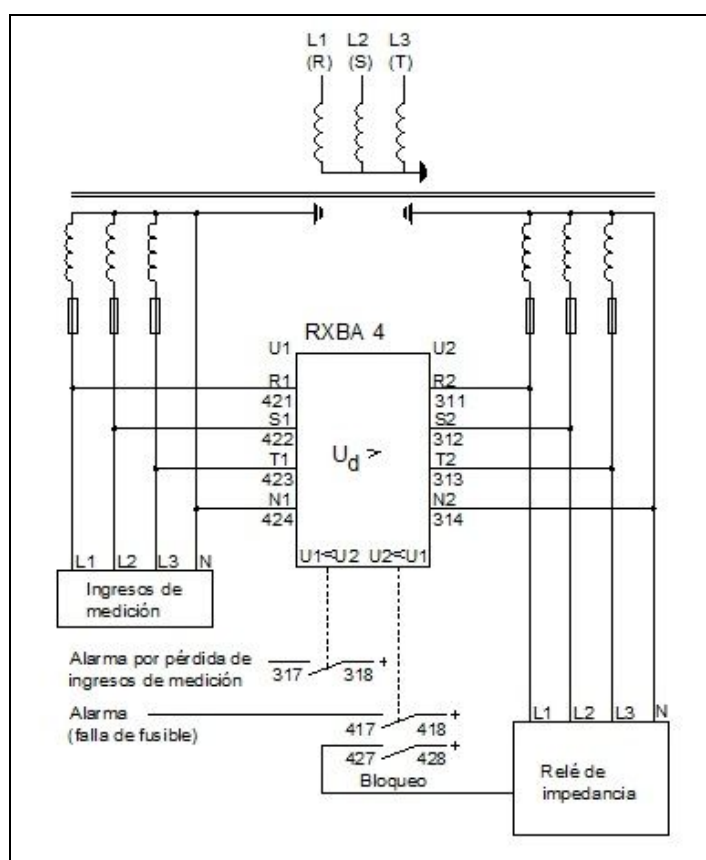


Figura 4.10 - Aplicación del RXBA 4 en transformadores de potencial con dos devanados.

A continuación se indican algunas características generales del relé:

- ✓ Detecta falla de fusible mono, bi ó trifásica en menos de 8ms.
- ✓ Proporciona alarma para la interrupción en hilo piloto y pérdida de medición.
- ✓ Opera rápidamente para bloquear el disparo de alta velocidad del relé de distancia en caso de falla de fusible.
- ✓ Contactos de salida para cada función.
- ✓ Operación indicada por LED (Diodo Emisor de Luz).
- ✓ No necesita tensión auxiliar de alimentación.

#### 4.2.1.8.1 Datos técnicos del relé tipo RXBA 4.

En las tablas 4.17 y 4.18, se muestran los datos técnicos principales de los relés 60A y 60B tipo RXBA 4 utilizados en la Central.

| Característica     | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra fallo fusible de los transformadores de potencial del generador. Está conectado a los sistemas de tensiones de alimentación a la excitación y a las protecciones. Dependiendo del sistema de tensiones que falte, debido al fallo de fusible, o bien bloquea las protecciones 21 G y 40 G, o bien conmuta el regulador de tensión a manual. |
| Tipo               | : RXBA 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Fabricante         | : ABB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Modelo             | : RK 428 004-AA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Esquema            | : XEC 500105-XB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Intensidad nominal | : ---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Tensión nominal    | : 110 V                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Tensión auxiliar   | : 125 Vcc                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Rango de ajuste    | : ---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Conexión           | : Transformadores de potencial del generador                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Disparo            | : ---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Tabla 4.17 - Datos técnicos principales del relé (60A G) tipo RXBA 4.

| Característica     | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra fallo fusible de los transformadores de potencial del generador. Está conectado a los sistemas de alimentación de tensiones de sincronización y medida y al de protecciones. En caso de falta de tensión de protecciones, debido a fallo de fusible, produce alarma. |
| Tipo               | : RXBA 4                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Fabricante         | : ABB                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Modelo             | : RK 428 004-AA                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Esquema            | : XEC 500105-XB                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Intensidad nominal | : ---                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Tensión nominal    | : 110 V                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Tensión auxiliar   | : 125 Vcc                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Rango de ajuste    | : ---                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Conexión           | : Transformadores de potencial del generador                                                                                                                                                                                                                                             |
| Disparo            | : ---                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Tabla 4.18 - Datos técnicos principales del relé (60B G) tipo RXBA 4.

El relé RXBA 4 es un relé estático trifásico que compara los voltajes en ambos lados de los fusibles de cada fase. Los dos voltajes  $U_1$  y  $U_2$  (ver figura 4.10) son alimentados a una entrada individual del relé, uno de los cuales está provisto de un transformador de aislamiento.

Después de la rectificación las tensiones son comparadas en un puente balanceado para determinar la diferencia de tensiones. Si la diferencia de tensión ( $U_2 < U_1$ ) es mayor que el valor de operación,  $U_1$  activará dos relés cada uno con contactos livianos normalmente abiertos. Al mismo tiempo un LED, en el frente del relé, indica la fase en la cual hubo reducción de tensión.

Si la tensión  $U_1$  es reducida en comparación con  $U_2$ , operará otro relé de salida con contactos livianos y un LED indicará la fase en la cual hubo caída de tensión en el hilo piloto.

A fin de asegurar una operación rápida del relé para fallas de fusibles, la tensión rectificada no se filtra. Los circuitos de medida comparan los valores instantáneos de la tensión rectificada. Esto significa que la diferencia de magnitud de la tensión al neutro, necesaria para la operación, será influenciada por la posición de la fase de las tensiones comparadas. Por eso el RXBA 4 no puede ser usado para comparar los voltajes de dos transformadores pertenecientes a diferentes circuitos eléctricos.

Cuando hay una carga entre las fases, la tensión en el lado del fusible dañado no será cero, pero, el relé sin embargo, operará correctamente. No obstante, si la carga es asimétrica, una operación indeseada durante la interrupción del hilo piloto se presentará al mismo tiempo.

El RXBA 4 no necesita ninguna alimentación auxiliar adicional, puesto que la tensión auxiliar se obtiene de los circuitos supervisados.

#### **4.2.1.8.2 Ajustes del relé tipo RXBA 4.**

$U_d$  es la diferencia de voltaje entre  $U_1$  y  $U_2$  y a la vez es el voltaje de operación del relé. El tiempo de operación del relé es 8 ms.

El ajuste del relé es establecido por el fabricante por ende, no requiere ningún tipo de ajuste, por lo tanto, los ajustes establecidos por parte del fabricante ABB, es como se muestra en la tabla 4.19.

| Ajuste del relé 60 G |                                         |
|----------------------|-----------------------------------------|
| Voltaje de operación | : $U_d > 20 \text{ V}$<br>(Fase-Neutro) |
| Tiempo de operación  | : 8 ms                                  |

Tabla 4.19 - Ajuste del relé tipo RXBA 4.

#### 4.2.1.9 Relé de falla a tierra estator 100% (64 SG).

La puesta a tierra del generador con alta impedancia es ilustrada en la figura 4.11. Este es principalmente utilizado en sistemas en conexión unitaria, sin embargo, puede también ser usado en generadores cross-compound donde un devanado está generalmente puesto a tierra a través de alta impedancia.

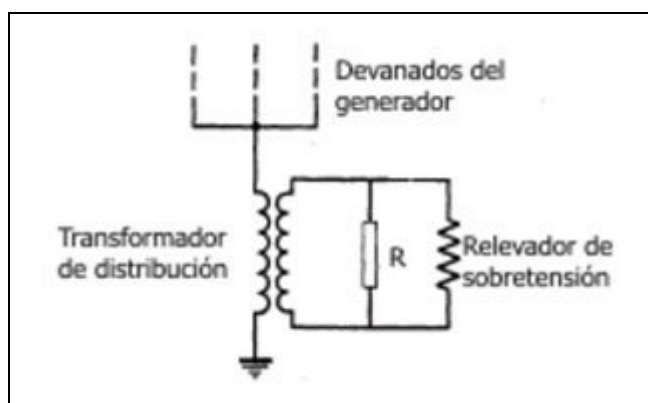


Figura 4.11 - Generador puesto a tierra con alta impedancia.

La puesta a tierra del neutro del generador con alta resistencia utiliza un transformador de distribución con un valor de tensión primaria mayor o igual al valor de la tensión línea-neutro del generador y una tensión secundaria de

120 V ó 240 V. El transformador de distribución debe tener suficiente capacidad de sobretensión de forma que no se sature con fallas de línea a tierra con la máquina operando al 105% de tensión nominal. El resistor secundario es usualmente seleccionado de manera que para una falla de línea a tierra en los terminales del generador, la potencia disipada en el resistor sea aproximadamente igual a los voltios-amperios reactivos en la reactancia capacitiva de secuencia cero de los devanados del generador, sus conductores y los devanados de todos los transformadores conectados a las terminales del generador. Usando este método de puesta a tierra una falla de línea a tierra es generalmente limitada de 3-25 amperios primarios. Como resultado, este nivel de corriente de falla no es suficiente para operar los relés diferenciales del generador.

El relé de falla a tierra que es utilizado en el Central es el tipo **RAGEA**, marca ABB. Este provee protección de falla a tierra del estator en un 100% para la mayoría de los generadores y motores conectados a través de transformadores de potencia, con neutro accesible y no aterrizado sólidamente.

El relé RAGEA también detecta cortocircuitos y circuitos abiertos en el aterrizamiento ó en los circuitos con tensión de neutro.

El relé es utilizado para proveer la protección convencional de falla a tierra en un 90 - 95% del devanado del estator mediante la supervisión de la componente de frecuencia fundamental de la tensión de neutro.

Adicionalmente es utilizado para detectar fallas a tierra en las partes del devanado y en todo el sistema del neutro mediante la supervisión de las componentes de tercera armónica en la tensión del neutro.

Para evitar una alarma continua cuando la máquina está fuera de servicio, se utiliza generalmente un relé de supervisión.

De esta forma se obtiene mayores beneficios de esta medición dual de la tensión del neutro.

1. La protección del 95% puede ser más sensible, ya que está segura contra anomalías fuera de la zona de protección. Esto resulta así, por el filtrado de todo el ruido y distorsión de la señal medida.
2. La protección del 100% se superpone la protección del 95% del devanado del estator y adicionalmente supervisa la integridad de todo el sistema del neutro para cortocircuitos y circuitos abiertos. Las fallas en esta zona, aunque no son críticas por sí misma, pueden ocasionar fallas devastadoras en las máquinas en caso de ocurrir una segunda falla a tierra.
3. Cuando existe más del 1% mínimo de tensión de tercera armónica, la zona de operación de la protección del 100% puede ser extendida y el valor de operación de la protección del 95% puede ser incrementado. Entonces es factible una reducción del tiempo de operación de la protección de 95% sin ninguna disminución en su seguridad.

El detector de tercera armónica es supervisado mediante la tensión fase a fase o la corriente del generador. El ajuste del relé de tercera armónica está determinado por la cantidad de tensión de tercera armónica del neutro del generador. Los cálculos deben basarse en las especificaciones de la máquina y las capacitancias del equipo o en mediciones hechas en sitio: Cuando se utiliza supervisión de tensión, se tiene 100% de protección

también en el arranque, cuando el voltaje está sobre el nivel de operación del relé de supervisión.

Entre las características que podemos mencionar de este relé tenemos las siguientes:

- ✓ Protección completa de falla a tierra para estatores de generadores con aterrizamiento de alta impedancia.
- ✓ Supervisa la integridad del aterrizamiento del neutro.
- ✓ Requiere apenas 1% de la tensión de tercera armónica del generador para proveer completa protección.
- ✓ Utiliza voltaje de neutro de frecuencia fundamental para proteger hasta 95% del devanado.
- ✓ Retardos de tiempo ajustables por separado para las funciones de bajo voltaje de tercer armónico y sobrevoltaje de frecuencia fundamental.
- ✓ Salidas y tarjetas separadas para los detectores de frecuencia fundamental y tercera armónica.
- ✓ Costo efectivo y simple de utilizar, no requiere equipo adicional de alta tensión.
- ✓ Protección de arranque.

#### 4.2.1.9.1 Datos técnicos del relé tipo RAGEA.

En la tabla 4.20, se muestran los datos técnicos principales del relé tipo RAGEA.

| Característica     | Descripción                                                                                                                                         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra defectos a tierra en estator, barras de fase aislada, lado BT del transformador principal y lado AT del transformador auxiliar. |
| Tipo               | : RAGEA con supervisión de tensión.                                                                                                                 |
| Fabricante         | : ABB                                                                                                                                               |
| Modelo             | : RK 646 011-CB                                                                                                                                     |
| Esquema            | : 7452 467-CB                                                                                                                                       |
| Intensidad nominal | : ---                                                                                                                                               |
| Tensión nominal    | : 130 V                                                                                                                                             |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                                                                             |
| Tensión auxiliar   | : 125 Vcc                                                                                                                                           |
| Rango de ajuste    | : 5-15 V, 60 Hz<br>0,15-0,45 V, 180 Hz<br>20ms - 99s                                                                                                |
| Conexión           | : Resistencia de neutro del generador                                                                                                               |
| Disparo            | : Interruptor Generador 52G<br>Excitación<br>Turbina                                                                                                |

Tabla 4.20 - Datos técnicos principales del relé tipo RAGEA.

El RAGEA está compuesto por un cajetín conmutador de pruebas RTXP 18, un filtro de bloqueo de tercera armónica con un relé RXIG 28 para detectar sobrevoltajes de frecuencia fundamental, un filtro de bloqueo de frecuencia fundamental con un relé RXIG 21 para detectar bajo voltaje de tercera armónica, un temporizador RXKE 1 para el bajo voltaje, un RXSF 1 con dos banderolas, y un RXIG 21 ó un RXEG 21 para supervisión de corriente o tensión.

Si se detecta un sobrevoltaje de neutro de frecuencia fundamental (o de una frecuencia inferior durante el arranque), el relé de sobrevoltaje se energizará, activando el temporizador de sobrevoltaje el cual producirá una salida de disparo mediante un contacto y señalará su actuación mediante una banderola.

Cuando la tensión del generador tiene suficiente componente de tercera armónica, después de energizado el relé de supervisión de tensión fase a fase o corriente de fase, el relé de bajo voltaje se desenergizará solamente si se produce una falla en el neutro o cerca de él.

La desenergización del relé de bajo voltaje activa el temporizador de bajo voltaje; después del tiempo ajustado aparece una banderola y simultáneamente se producirá una salida de disparo o alarma mediante el cierre de un contacto.

#### **4.2.1.9.2 Ajustes del relé tipo RAGEA.**

##### **▪ Protección de sobrevoltaje (0-95%).**

Es realizada por medio del módulo RXIG 28 de frecuencia fundamental con filtro. El transformador de distribución conectado al neutro del generador es de relación 13800/208 V, por consiguiente, el voltaje a través del relé es:

$$V_{rele} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 V$$

Para cubrir 0 a 95%, el ajuste debe ser 5% del voltaje a través del relé:

$$\text{Ajuste del relé} = 0,05 \times 120 = 6 V$$

Para establecer el ajuste en el módulo RXIG 28 se determina el factor de escala que se encuentra comprendido entre los valores de 1 a 3.

$$V_{\text{ajuste-rele}} = F_{\text{escala}} * 5V = 6V$$

Donde, el valor de 5 V es un valor establecido por el fabricante, entonces el factor de escala para realizar el ajuste de la protección de sobrevoltaje es:

$$F_{\text{escala}} = 1,2$$

▪ **Protección de bajo voltaje (95-100%).**

Es realizada por medio del módulo RXIG 21 de tercera armónica con filtro. Normalmente el voltaje de tercera armónica es medida en el neutro del generador. Si el generador produce 1% del voltaje armónico, se tiene lo siguiente:

$$V_{3^{er} \cdot \text{armónico}} = 0,01 V_{\text{Sistema}}$$

$$V_{3^{er} \cdot \text{armónico}} = 0,01 * \frac{13800}{\sqrt{3}} = 79,67V$$

Aproximadamente más del 30% del voltaje del tercer armónico aparece a través del neutro:

$$0,3 * 79,67V = 23,90V$$

Entonces, el voltaje observado por el relé, que corresponde al ajuste, es:

$$V_{rele} = 23,90 * \frac{208}{13800} = 0,36V$$

Para establecer el ajuste en el módulo RXIG 21, se determina el factor de escala que se encuentra comprendido entre los valores de 1 a 3.

$$V_{ajuste-rele} = F_{escala} * 0,15V = 0,36V$$

Donde, el valor de 0,15 V es un valor establecido por el fabricante, entonces, el factor de escala para realizar el ajuste de la protección de bajo voltaje es:

$$F_{escala} = 2,4$$

En la unidad de temporización RXKL 1, se ajusta el tiempo de operación a 0,44 segundos por medio de los siguientes parámetros:

$$a = 40; b = 4; k = 10 \text{ ms}$$

▪ **Relé de supervisión de voltaje RXEG 21.**

Es realizada por medio del módulo RXEG 21, donde dispone de un rango de 40 a 120 V. El ajuste recomendado es el 85% del voltaje nominal del relé.

$$V_{ajuste-rele} = 0,85 * 120V = 102V$$

Para establecer el ajuste en el módulo RXEG 21, se determina el factor de escala que se encuentra comprendido entre los valores de 1 a 3.

$$V_{ajuste-rele} = F_{escala} * 40 V = 102 V$$

Donde, el valor de 40 V es un valor establecido por el fabricante, entonces, el factor de escala para realizar el ajuste de la supervisión de voltaje es:

$$F_{escala} = 2,55$$

Por lo tanto, los ajustes del relé tipo RAGEA se resumen en la tabla 4.21.

| Ajustes del relé 64 SG              |          |
|-------------------------------------|----------|
| Protección sobrevoltaje<br>0-95%    | : 6 V    |
| Protección bajo voltaje<br>95-100%  | : 0,36 V |
| Tiempo de retardo                   | : 0,44 s |
| Supervisión de voltaje<br>85% $V_n$ | : 102 V  |

Tabla 4.21 - Ajustes del relé tipo RAGEA.

#### 4.2.1.10 Relé de impedancia de generador (21 G).

El relé utilizado en la Central es el tipo **RAKZB**, marca ABB. Es un relé compacto trifásico de impedancia, el cual proporciona capacidad de medición de fallas de fase y tierra. El relé es usado como respaldo para la protección del generador, así como también barras transformadores y líneas.

Es también usado para proteger generadores de los efectos de baja

excitación o pérdida de excitación. Se obtienen dos características: una lenta modificada y un círculo. La lenta es frecuentemente preferida para obtener discriminación de carga y falla en líneas largas con cargas muy pesada. El ángulo característico del RAKZB puede ser cualquiera de los dos:  $60^\circ$  ó  $75^\circ$  como el que se muestra en la figura 4.12. El relé está provisto de un circuito de reconexión de voltaje delta-estrella el cual es activado para obtener sensibilidad para las fallas a tierra.

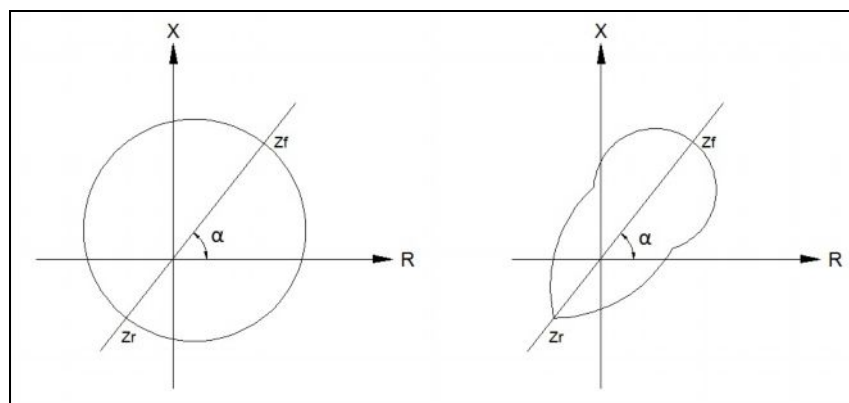


Figura 4.12 - Característica circular MHO desplazada o lenta modificada con  $60^\circ$  ó  $75^\circ$ .

Entre las características que podemos mencionar de este relé tenemos que:

- ✓ Versiones de una o dos zonas.
- ✓ Característica circular MHO o lenta modificada.
- ✓ Alcance directo o inverso ajustable.
- ✓ Detención de falla de fase y a tierra.
- ✓ Relé de disparo incorporado.
- ✓ Alimentador de convertidor CC/CC.

- ✓ Conmutador de pruebas incluido.

La curva de operación de la figura 4.13, es la normalmente usada de acuerdo a las recomendaciones del fabricante del relé, el ángulo característico  $\alpha$ , para este tipo de protección, es  $60^\circ$ . El relé tiene un parámetro de ajuste  $D$ , el cual determina el alcance inverso  $Z_r$ , donde  $Z_r = -DZ_f$ .

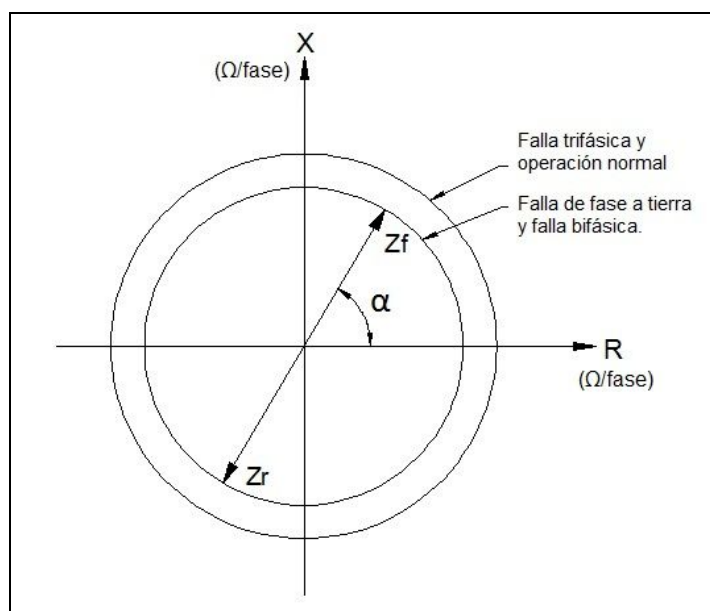


Figura 4.13 – Curva de operación normalmente usada,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $Z_r = -Z_f$ .

#### 4.2.1.10.1 Datos técnicos del relé tipo RAKZB.

En la tabla 4.22, se muestran los datos técnicos principales del relé de impedancia tipo RAKZB.

| Característica     | Descripción                                                                                                       |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección de respaldo contra cortocircuitos en el generador, barras de fase aislada y transformador principal. |
| Tipo               | : RAKZB                                                                                                           |
| Fabricante         | : ABB                                                                                                             |
| Modelo             | : RK 654 001-BB                                                                                                   |
| Esquema            | : 7422 005-BC                                                                                                     |
| Intensidad nominal | : 5 A                                                                                                             |
| Tensión nominal    | : 110 V                                                                                                           |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                                           |
| Tensión auxiliar   | : 125 Vcc                                                                                                         |
| Rango de ajuste    | : 5,7 - 213 ohm<br>20 ms - 99 s                                                                                   |
| Conexión           | : Transformadores de corriente de lado neutro del generador y de potencial del generador                          |
| Disparo            | : Interruptor Generador<br>Interruptor Alta Tensión<br>Interruptor S. Auxiliares<br>Turbina<br>Excitación         |

Tabla 4.22 - Datos técnicos principales del relé tipo RAKZB.

Las señales de corriente que recibe el relé para la medición de impedancia, son generalmente tomadas del neutro al final de las fases en los devanados, mientras que las señales de voltaje, son tomadas de los terminales del generador, esto es para asegurar que el relé esté en la capacidad de detectar fallas en el estator de la máquina cuando esta opera en vacío.

#### 4.2.1.10.2 Ajustes del relé tipo RAKZB.

La operación del relé es determinada por la conexión y el tipo de falla. En redes con aterrizamiento por medio de resistencia, el relé es conectado

normalmente en Delta y opera para fallas bi y trifásicas.

Para emplear la curva de operación de la figura 4.13, se debe ajustar la escala del parámetro D ubicada en el panel frontal del relé para cumplir con la condición de  $Z_r = -Z_f$ . El rango de la escala es de -0,2 a 1,0, entonces, el valor D es:

$$D = 1$$

El relé de impedancia tipo RAKZB, se utiliza como protección de respaldo de cortocircuito para el generador, tal como se muestra en la figura 4.14.

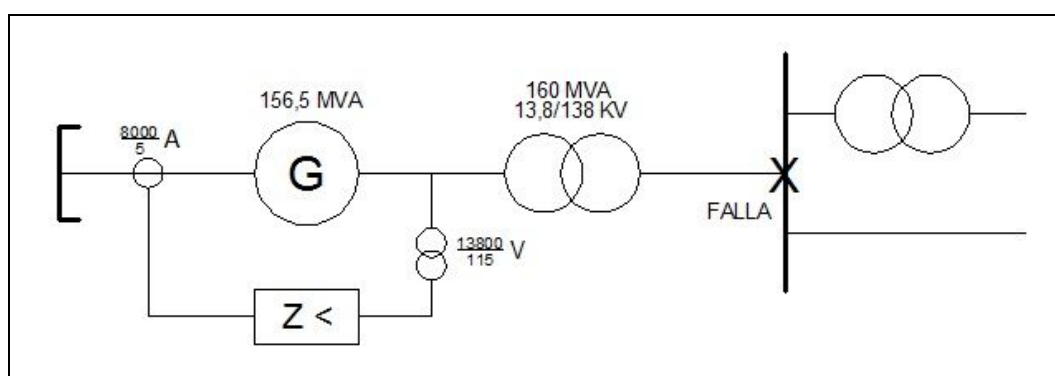


Figura 4.14 – RAZKB, Protección de respaldo de cortocircuito para el Generador.

Para ajustar la impedancia del relé tipo RAKZB de cada fase R, S y T, se debe determinar los factores de ajustes A y B que se encuentra en el módulo RXZK 4.

La impedancia de carga mínima  $Z_{\text{carga (min)}}$  en ohmios por fase es calculada de la siguiente fórmula:

$$Z_{CARGA(MIN)} = \frac{U^2}{S_{m\acute{a}x}}$$

Donde, U es el voltaje de línea en KV y  $S_{m\acute{a}x}$  es la carga aparente máxima en MVA; entonces, la mínima impedancia de carga es:

$$Z_{CARGA(MIN)} = \frac{13,8^2}{156,5} = 1,22 \Omega / fase$$

ABB, recomienda que el relé RAKZB se ajuste a un 70% de la impedancia de carga trifásica, entonces, la impedancia de ajuste primaria es:

$$Z_{f-prim} = 0,70 * 1,22 = 0,85 \Omega / fase$$

La relación del transformador de corriente es de 8.000/5 y la relación del transformador de potencial es de 13800/115, entonces, la impedancia de ajuste secundaria que observa el relé es:

$$Z_{f-rel\acute{e}} = 0,85 * \frac{115}{13.800} * \frac{8.000}{5} = 11,33 \Omega / fase$$

Luego, la relación A/B es definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{A}{B} = Z_{f-rel\acute{e}} * \frac{\sqrt{3} * I_a}{0,2 * f}$$

Donde,  $I_a$ , es la corriente nominal del relé y  $f$ , es la frecuencia del sistema.

$$\frac{A}{B} = 11,33 * \frac{\sqrt{3} * 5}{0,2 * 60} = 8,2$$

El factor de ajuste A, es igual o menos que 10 veces la relación calculada A/B, entonces, el factor de ajuste A, es:

$$A = 80$$

Por consiguiente, el factor de ajuste B, es:

$$B = A * \frac{0,2 * f}{\sqrt{3} * I_a * Z_{f-relé}} = 80 * \frac{0,2 * 60}{\sqrt{3} * 5 * 11,33}$$

$$B = 9,78$$

Por lo tanto, los ajustes del relé de impedancia tipo RAKZB para cada fase R, S y T, son como se indican en la tabla 4.23.

| Ajustes del relé 21 G                      |                        |
|--------------------------------------------|------------------------|
| Protección de respaldo                     |                        |
| $Z_{f-relé} = 70\% Z_{carga \text{ min.}}$ | : 11,33 $\Omega$ /fase |
| Tiempo de operación                        | : 0,5 s                |

Tabla 4.23 - Ajustes del relé tipo RAKZB.

## 4.2.2 Protecciones del Transformador Principal.

### 4.2.2.1 Relé diferencial Generador-Transformador (87 GT).

El elemento de medida de estos relés compara las corrientes que entran con las que salen del equipo de tal manera que cuando la diferencia entre éstas alcance un valor igual o superior a un porcentaje dado de la corriente menor, el torque de operación es mayor que el de retención, produciendo la operación del relé.

La protección diferencial de transformadores trifásicos es bastante más complicada que la protección de generadores, por los motivos siguientes:

- Las corrientes de primario y secundario no tienen el mismo valor, debido a que normalmente la relación de voltajes entre estos dos enrollados no es la unidad.
- Las corrientes del primario y secundario del transformador pueden no estar en fase, dependiendo de la conexión del transformador.
- Las relaciones de los transformadores de corriente no siempre arrojan valores secundarios iguales a comparar.
- La protección no debe ser afectada por las condiciones de operación del transformador, como cambios de taps o funcionamiento en vacío.
- La corriente de excitación en el momento de la conexión del transformador (corriente de in-rush) puede tomar valores muy elevados, dependiendo del valor instantáneo de la onda de voltaje en el momento de la conexión. Su forma es exponencial decreciendo en el tiempo y disminuyendo su desplazamiento para tomar finalmente el valor de régimen permanente.

El relé que es utilizado en la Central para esta protección es el tipo **RADSB**. En la figura 4.15, se muestra el principio esquemático de un relé diferencial para un transformador.

Durante condiciones normales, una pequeña corriente fluye a través del circuito diferencial del relé. Esta corriente corresponde a la corriente de excitación del transformador de potencia y una corriente en función del error de relación de los transformadores de corriente. Normalmente, estas dos corrientes, asciende a sólo un pequeño porcentaje de la corriente nominal. Sin embargo, es posible, con los transformadores de potencia con los cambiadores de tomas en carga nominal y con los cambiadores de tomas en una de las posiciones finales, obtener una corriente en el circuito diferencial, que puede ser de hasta 20% de la corriente nominal, dependiendo del rango de regulación del cambiador de tomas (taps).

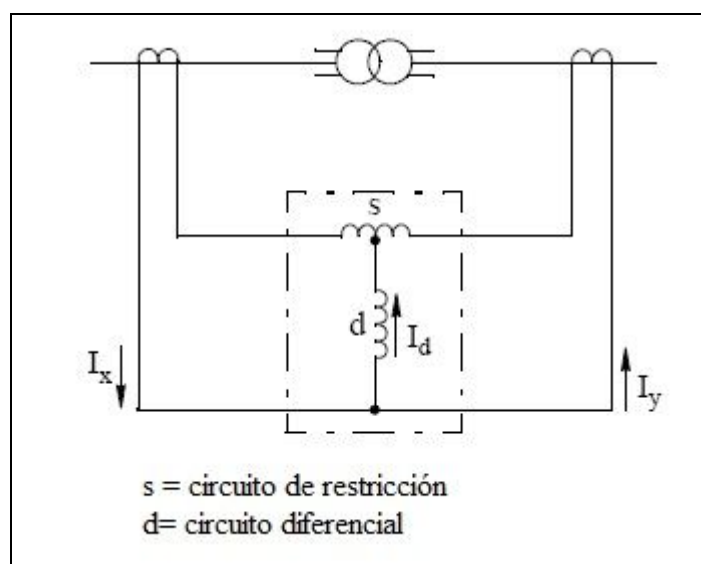


Figura 4.15 - Principio esquemático de un relé diferencial para un Transformador de Poder.

El RADSB es un relé diferencial trifásico destinado a todo tipo de auto-transformadores y varios transformadores de múltiple devanado. El relé RADSB está disponible con hasta seis entradas de restricción. El relé es

también muy adecuado para el generador y ajuste de protección de transformadores en general, a menudo incluyendo el transformador auxiliar en la zona protegida.

La característica de porcentaje de restricción no lineal proporciona la restricción requerida para las fallas externas. Esto hace que el relé esté adecuado para su uso con transformadores multi-devanado, autotransformadores o en un sistema donde un devanado del transformador está conectado directamente a dos o más interruptores. Las características están diseñadas para proporcionar una excelente sensibilidad de falla interna.

El relé RADSB también tiene un circuito instantáneo sin restricciones que responde a la corriente diferencial total (menos cualquier componente de corriente continua). Este circuito va a proporcionar una operación redundante para graves fallas internas.

Las interposiciones de los transformadores de corriente se utilizan para equilibrar las corrientes al relé. Además las interposiciones pueden ser utilizadas para reducir la carga efectiva de largos conductores secundarios. La zona de protección del relé puede incluir hasta unos dos kilómetros de cable de alta tensión ya que el filtrado proporciona seguridad adecuada contra las altas oscilaciones de la corriente.

Los relés diferenciales se conectan a circuitos secundarios provenientes de los transformadores de corriente cuya conexión debe efectuarse en forma inversa a aquella de los enrollados primario y secundario del transformador de poder. De esta manera se anula el desplazamiento angular de las corrientes por fase. Por ejemplo, si un transformador tiene conexión DY1, los transformadores de corriente del lado primario se conectarán en estrella y los del lado secundario, en delta, de tal forma que las corrientes secundarias por

línea de los transformadores de corriente, adelanten en  $30^\circ$  a las correspondientes dentro de la delta. De todas formas, es conveniente asegurarse de la correcta conexión de los transformadores de corriente, dibujando los diagramas fasoriales respectivos.

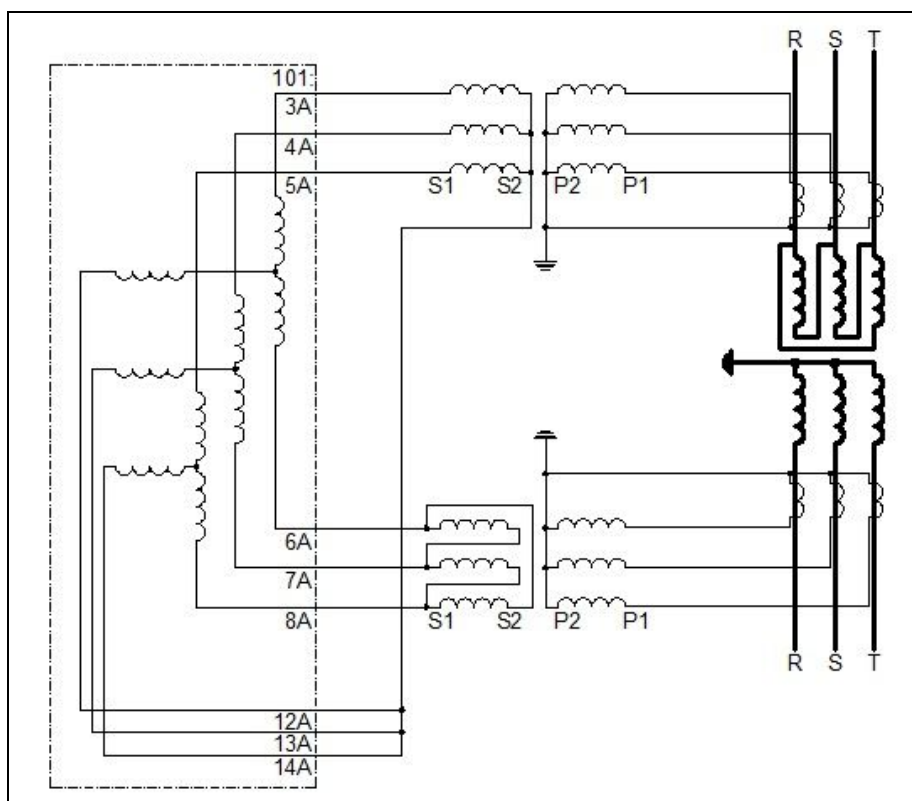


Figura 4.16 - Conexión del RADSB en un Transformador de Poder de conexión Dy11.

Las características generales del relé tipo RADSB se indican a continuación:

- ✓ Protección diferencial trifásica con dos, tres, cinco o seis entradas a través de corriente de restricción.

- ✓ Protección completa de fase y de falla a tierra.
- ✓ Los circuitos estáticos de medición con filtros activos para la utilización óptima de los armónicos en los circuitos de corriente.
- ✓ Un cable de alta tensión, de longitud hasta aproximadamente 2 km, se pueden incluir en la zona diferencial.
- ✓ El tiempo de operación de armónica restringida es alrededor de 30 ms a 3 veces la corriente de arranque.
- ✓ Tiempo de operación no restringida es de 10-20 ms a 2 veces la corriente de arranque con un tiempo de impulso mínimo de 3 ms.
- ✓ Porcentaje variable de restricción para la seguridad de falla externa.
- ✓ Restricción de la segunda armónica de las tres fases para la seguridad de inrush.
- ✓ Restricción de la quinta armónica de las tres fases para la seguridad de sobreexcitación.
- ✓ La sensibilidad se puede ajustar a 20, 25, 35, ó 50% de la corriente nominal.
- ✓ La operación no restringida es ajustable a 8, 13 ó 20 veces la corriente nominal del relé.
- ✓ Largos cables del secundario del transformador de corriente son factibles con relé de 1 A.

Interposición de los transformadores de corriente tipo SLCE:

- ✓ Corriente secundaria de 1 A ó 5 A.
- ✓ Tres diferentes rangos de relaciones reconectable en pasos de 4 a 6%: 0,65-2,60/1 A; 2,55-10,1/1 A; 2,85-11,2/5 A.
- ✓ Disponible para unidades monofásicas como trifásicas.

#### 4.2.2.1.1 Datos técnicos del relé tipo RADSB.

En la tabla 4.24, se muestran los datos técnicos principales del relé de protección diferencial tipo RADSB.

| Característica     | Descripción                                                                                                                                                      |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección contra cortocircuitos en generador, barras de fase aislada y transformador principal.                                                               |
| Tipo               | : RADSB de 3 entradas                                                                                                                                            |
| Fabricante         | : ABB                                                                                                                                                            |
| Modelo             | : RK 625 005-DA                                                                                                                                                  |
| Esquema            | : 7454 356-DC                                                                                                                                                    |
| Intensidad nominal | : 1 A / transformadores auxiliares de 5 A                                                                                                                        |
| Tensión nominal    | : ---                                                                                                                                                            |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                                                                                          |
| Rango de ajuste    | : 20 - 50% $I_n$                                                                                                                                                 |
| Conexión           | : Transformadores de corriente de lado de neutro del generador, de lado de alta tensión del transformador principal y del transformador de servicios auxiliares. |
| Disparo            | : Interruptor de lado de alta tensión<br>Interruptor del Generador<br>Excitación<br>Turbina                                                                      |

Tabla 4.24 - Datos técnicos principales del relé tipo RADSB.

#### 4.2.2.1.2 Ajustes del relé tipo RADSB.

Los dos valores de operación del relé diferencial – el valor de operación de restricción  $I_{sr}$  (0,20, 0,25, 0,35 y 0,50 veces la corriente nominal) y el valor de operación sin restricción  $I_{su}$  (8, 13 y 20 veces la corriente nominal) – son establecidas por medio de switches en la parte frontal de la unidad de medición RXDSB 4.

El valor de operación  $I_{sr}$  para la operación restringida es generalmente ajustada en  $0,35 \times I_n$ . Para transformadores de poder con relación de transformación fija un ajuste de 0,20 ó  $0,25 \times I_n$  puede ser usado.

El valor de operación  $I_{su}$  para la operación no restringida, es determinada por la magnitud de la corriente de inrush del transformador de poder y es afectado por las características y la conexión del transformador de poder. En la tabla 4.25 indica los valores de ajustes recomendados del valor de operación no restringida  $I_{su}$ .

| Conexión del transformador de poder <sup>(1)</sup> | Potencia Nominal (MVA) | Valor recomendado de $I_{su}$ durante la energización desde: |                      |
|----------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------|
|                                                    |                        | Lado de Alta Tensión                                         | Lado de Baja Tensión |
| -                                                  | < 10                   | 20x                                                          | 20x                  |
| Yy                                                 | 10 - 100               | 13x                                                          | 13x                  |
| Yy                                                 | > 100                  | 8x                                                           | 8x                   |
| Yd                                                 | -                      | 13x                                                          | 13x                  |
| Dy                                                 | < 100                  | 13x                                                          | 20x                  |
| Dy                                                 | > 100                  | 8x                                                           | 13x                  |

<sup>(1)</sup> El lado primario es anticipado ser de lado de Alta Tensión.

Tabla 4.25 - Valores recomendados de ajustes de la operación no restringida.

Los tiempos de operación del relé utilizando el módulo RXMS 1, relé de salida para disparo, son respectivamente:

| <b>RXMS 1 (relé de disparo)</b> | <b>Tiempos de operación</b> |
|---------------------------------|-----------------------------|
| $I_d = 3 \times I_{sr}$         | aprox. 32 ms                |
| $I_d = 10 \times I_{sr}$        | aprox. 29 ms                |
| $I_d = 2 \times I_{su}$         | 10 - 20 ms                  |

Tabla 4.26 - Tiempos de operación del relé tipo RADSB.

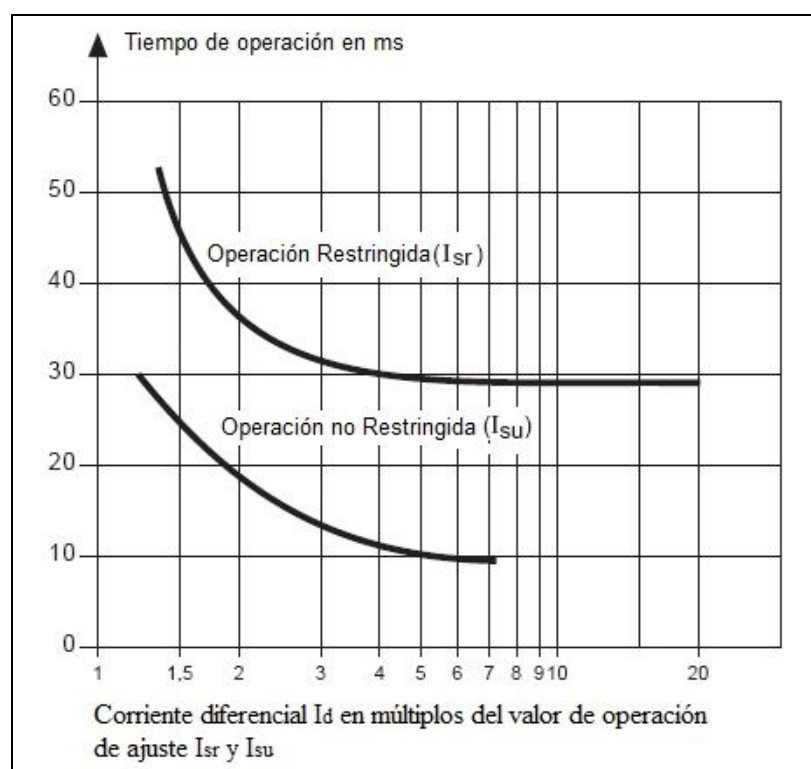


Figura 4.17 - Características de operación tiempo-corriente.

Los ajustes del relé tipo RADSB tanto para el transformador de poder principal como para el transformador de poder de servicios auxiliares de la Central Térmica Trinitaria, son como se muestran a continuación:

| Ajustes del relé 87 GT                                   | Transformador Principal            |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Operación restringida<br>( $3I_d > \text{ajuste}$ )      | $0,35 \times I_n = 0,35 \text{ A}$ |
| Operación no restringida<br>( $3I_d \gg \text{ajuste}$ ) | $13 \times I_n = 13 \text{ A}$     |

Tabla 4.27 - Ajustes del relé tipo RADSB.

#### 4.2.2.2 Relé de sobre-intensidad del Transformador Principal (51 MT).

Un relé de protección es un dispositivo lógico cuya función es la comparación de una o varias señales de entrada con respecto a una referencia. Si los valores de entrada se desvían de la referencia por encima de un valor de ajuste (Setting) entonces se realiza una acción como disparo (apertura), cierre o alarma. La Figura 4.18 muestra el esquema lógico de un relé de sobrecorriente.

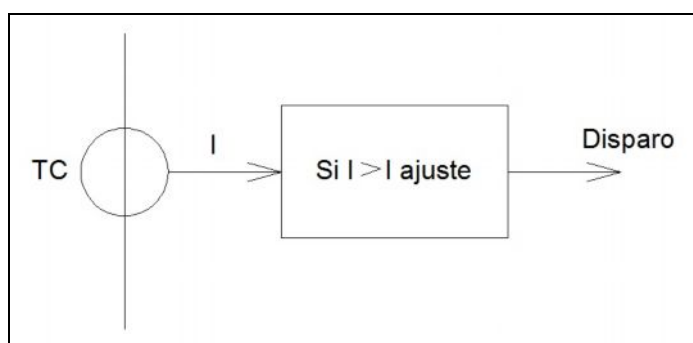


Figura 4.18 - Esquema lógico de un relé de sobrecorriente.

La corriente es la variable más utilizada en la detección de anomalías en los elementos del sistema eléctrico, dado el elevado incremento que se registra en su valor cuando se presentan fallas. Se define como sobrecorriente a cualquier valor que excede la corriente normal de operación de un dispositivo.

El tipo más simple de protección de respaldo es el relé de sobrecorriente 51. El relé 51 debe ser ajustado arriba de la corriente de carga y tener suficiente retardo de tiempo para permitir las oscilaciones del generador. Al mismo tiempo, debe ser ajustado lo suficientemente bajo para disparar con falla de fases remota para varias condiciones del sistema. El ajuste de pickup o corriente de arranque de este tipo de relé debe ser normalmente de 1.5 a 2.0 veces la corriente nominal máxima del generador para prevenir disparos en falso.

El relé de sobrecorriente que es utilizado en la Central es el tipo **RACID**, marca ABB; es un relé de sobrecorriente y de falla a tierra, a continuación se indican algunas características generales:

- ✓ Relé de sobrecorriente monofásico ó trifásico con función de arranque y funciones temporizada e instantánea.
- ✓ Relé de falla a tierra no direccional con función de arranque y funciones temporizada e instantánea.
- ✓ Característica de tiempo ajustable:
  - Tiempo Inverso; Normal Inverso, Muy Inverso, Extremadamente Inverso, Curva-RI.
  - Tiempo Definido; 0,1-1,2 s ó 1 -12 s.

- ✓ Rango amplio de ajustes.
- ✓ Baja carga (burden) en los circuitos de medición.
- ✓ La función instantánea puede ser retardada para obtener selectividad en redes con fusibles.
- ✓ Fácil de usar. Indicación numérica de valores ajustados, corriente normal de servicio y corriente de falla cuando se produce el disparo.
- ✓ Monitoreo continuo de circuitos internos.
- ✓ Voltaje auxiliar 48-220 V  $\pm$  20 %, CD ó CA para el mismo relé.
- ✓ Mantenimiento mínimo requerido.

La **función de arranque** ocurre instantáneamente cuando la corriente excede el valor ajustado I. La corriente ajustada es determinada por la capacidad de carga del objeto y por la menor corriente de falla dentro del rango de operación. El retraso de la señal de disparo es seleccionado en consideración a la demanda en la selectividad y las características térmicas de la instalación.

La **función instantánea** ocurre cuando la corriente I ha excedido el valor de operación. Es normalmente ajustada a actuar cerca de las fallas. El alcance depende de las variaciones en la potencia de cortocircuito y en el tipo de falla. Una potencia de cortocircuito constante aumenta la posibilidad de utilizar la función instantánea, también en redes que tienen impedancias moderadas.

La **función temporizada** ocurre después de un cierto tiempo cuando la actual corriente ha excedido el valor de ajuste de operación. Con la ayuda de los switches selectores, ubicado en la parte frontal del RACID, se puede elegir entre retardo de tiempo definido o cuatro diferentes retardos de tiempo inverso.

#### 4.2.2.2.1 Datos técnicos del relé tipo RACID.

En la tabla 4.28, se muestran los datos técnicos principales del relé de sobrecorriente tipo RACID.

| Característica     | Datos técnicos                                                                                                                                |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función            | : Protección de respaldo contra cortocircuitos en alternador, barras de fase aislada, transformador principal y subestación.                  |
| Tipo               | : RACID                                                                                                                                       |
| Fabricante         | : ABB                                                                                                                                         |
| Modelo             | : RK 671 213-AA                                                                                                                               |
| Esquema            | : 7431 154-CA                                                                                                                                 |
| Intensidad nominal | : 5 A                                                                                                                                         |
| Tensión nominal    | : ---                                                                                                                                         |
| Frecuencia         | : 60 Hz                                                                                                                                       |
| Tensión Auxiliar   | : 125 Vcc                                                                                                                                     |
| Rango de ajuste    | : 0,5-2,5 x $I_n$<br>0,1-12 s                                                                                                                 |
| Conexión           | : Transformadores de corriente de lado de Alta Tensión del transformador principal                                                            |
| Disparo            | : Interruptor de lado de Alta Tensión 52-1G2<br>Interruptor Generador 52G<br>Interruptor Servicios Auxiliares 52 MC1<br>Excitación<br>Turbina |

Tabla 4.28 - Datos técnicos principales del relé tipo RACID.

Para el estudio de la Central Térmica Trinitaria se considera la curva de operación Normal Inversa, donde el tiempo para operación es inversamente proporcional a la magnitud de la corriente observada, es decir, mientras mayor sea la corriente aplicada, menor es su tiempo de operación. Ver la figura 4.19.

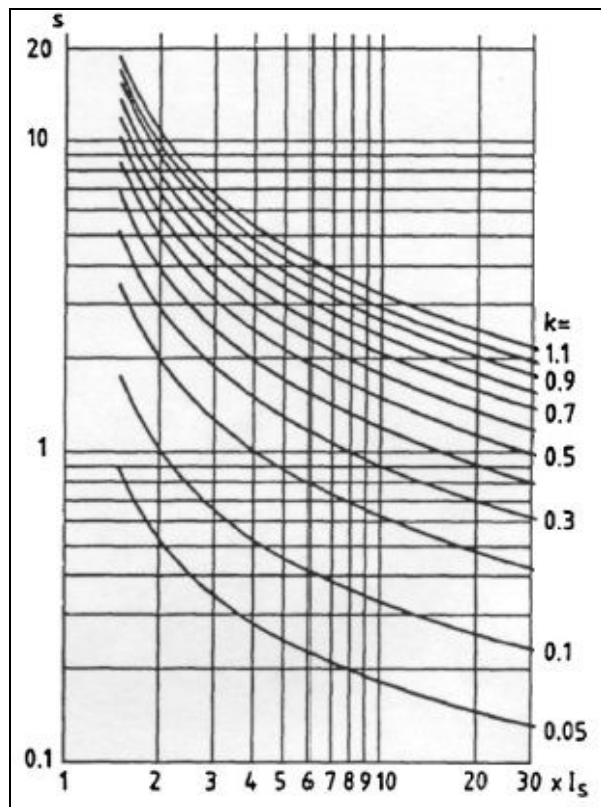


Figura 4.19 - Curva de operación de un relé de tiempo normal inverso.

La siguiente fórmula se aplica a la curva mostrada anteriormente para determinar el tiempo de operación en segundos del relé.

$$t = \frac{\beta}{I^\alpha - 1} \bullet k \text{ [segundos]}$$

Donde,

$t$  = Tiempo de operación del relé en segundos

$I$  = múltiplo de la corriente de ajuste  $I_s$

$I_s$  = Corriente de arranque del relé

$\alpha$  = Constante de ajuste del relé de conformidad con la norma IEC

$\beta$  = Constante de ajuste del relé de conformidad con la norma IEC

1 = Constante de ajuste del relé

$k$  = Factor de escala para un tipo de curva dado (DIAL)

La **corriente de arranque** es el valor a partir del cual comienza la operación temporizada del relé.

El valor **k** ó **DIAL**, permite obtener diferentes tiempos de operación para un mismo tipo de curva y una corriente dada.

El valor de **I** es el múltiplo de la corriente de arranque y es la relación entre la corriente observada por el relé y la corriente de arranque.

A continuación, se muestran los valores de las constantes de ajustes del relé de conformidad con la Norma IEC.

| Tipo de Curva          | $\alpha$ | $\beta$ |
|------------------------|----------|---------|
| Normal Inverso         | 0,02     | 0,14    |
| Muy Inverso            | 1        | 13,50   |
| Extremadamente Inverso | 2        | 80      |
| Inversa Larga          | 1        | 120     |

Tabla 4.29 - Constantes de ajuste del relé según norma IEC.

#### 4.2.2.2.2 Ajustes del relé tipo RACID.

Para los ajustes del relé se debe determinar la corriente de arranque  $I_s$  y el DIAL que permite definir los tiempos de operación según la curva de tiempo normal inverso.

La corriente de arranque debe ser mayor a la corriente de carga por un factor  $F_s$  que tiene en cuenta las variaciones diarias en la carga, su crecimiento, las corrientes de energización y el error de medida. El rango de valores de  $F_s$  es  $1,0 < F_s \leq 2,0$ . Un valor típico es 1,5.

Cuando se utiliza un valor alto de  $F_s$  debe verificarse que no se supere la capacidad térmica de los equipos debido a las sobrecargas.

Se determina la corriente de carga máxima de lado de la barra de 138 KV del transformador principal de la Central:

$$I_{CARGA-138} = \frac{160000 KVA}{\sqrt{3} * 138 KV} = 669,39 \text{ Amp}$$

La corriente de arranque del relé es determinada con la siguiente ecuación:

$$I_s = \frac{F_s * I_{CARGA-138}}{RTC}$$

Donde RTC, es la relación del transformador de corriente y el factor  $F_s$  es el múltiplo que tiene en cuenta la sobrecarga más un factor de seguridad.

Por tanto, la corriente de arranque del relé es:

$$I_s = \frac{1,5 * 669,39}{\frac{800}{5}} = 6,27 \text{ Amp}$$

La relación entre la corriente de arranque y la corriente nominal del relé definida como  $m$ , es:

$$m = \frac{I_s}{I_{n_{\text{relé}}}} = \frac{6,27}{5} = 1,25$$

Por lo tanto, los ajustes del relé tipo RACID en el lado de alta tensión del transformador principal de la Central, es como se indica a continuación:

| <b>Ajustes del relé 51 MT</b>      |                            |
|------------------------------------|----------------------------|
| Corriente de arranque $I_s$        | : 1,25 $I_{n-\text{relé}}$ |
| $k = \text{DIAL (Normal Inversa)}$ | : 0,1                      |

Tabla 4.30 - Ajustes del relé tipo RACID 51MT.

#### 4.3 Coordinación de las Protecciones del Sistema.

Coordinar la protección significa definir los tiempos de operación de la protección para permitir la actuación debidamente priorizada de los relés de protección, minimizando los tiempos de actuación y garantizando una apropiada graduación en los tiempos de actuación de todas las protecciones, tanto las principales como las de respaldo. Se cumplen los siguientes criterios:

*Selectividad*, cada relé o elemento de protección, operar en su zona

protegida.

*Respaldo*, los Relés dan protección primaria en la zona protegida y protección de respaldo a la zona adyacente.

*Tiempo de operación*, el tiempo de operación se ha ajustado para cumplir los criterios de selectividad y respaldo.

Simplicidad, la protección cumple este criterio, evitando la redundancia de la protección en las zonas protegidas.

De conformidad al estándar de IEEE para la coordinación de relés, se ha considerado un Intervalo de Coordinación entre 0,2 a 0,25 segundos en el punto de coordinación correspondiente a la contribución a la corriente de falla en la ubicación del relé.

La unidad instantánea se la ha ajustado para la corriente máxima de falla en la barra más cercana al relé o para la mayor corriente de contribución en la localidad del relé.

Para el estudio de la coordinación de protecciones de la Central Térmica Trinitaria, se considerará el relé de sobrecorriente 51MT tipo RACID del transformador principal y el relé de impedancia de generador 21G tipo RAKZB, como protección de respaldo del generador.

Existen dos razones por la cual se deben instalar protecciones de respaldo en un sistema de potencia. La primera es para asegurar que en caso que la protección principal falle en despejar una falla, la protección de respaldo lo haga. La segunda es para proteger aquellas partes del sistema de potencia que la protección principal no protege, debido a la ubicación de sus

transformadores de medida.

El objetivo de las protecciones de respaldo es abrir todas las fuentes de alimentación a una falla no despejada en el sistema. Para realizar esto en forma eficiente las protecciones de respaldo deben:

- Reconocer la existencia de todas las fallas que ocurren dentro de su zona de protección.
- Detectar cualquier elemento en falla en la cadena de protecciones, incluyendo los interruptores.
- Iniciar el disparo de la mínima cantidad de interruptores necesarios para eliminar la falla.
- Operar lo suficientemente rápido para mantener la estabilidad del sistema, prevenir que los equipos se dañen y mantener la continuidad del servicio.

La protección de respaldo debe proteger totalmente el sistema y eliminar cualquier tipo de falla en un tiempo máximo de 500 ms.

Para definir los tiempos de operación de los relés 51MT y 21G, se considera una corriente de falla trifásica producida en la barra de 138 KV a la salida del transformador principal. De acuerdo a la tabla 3.3 en el capítulo 3, el valor de la corriente de falla trifásica es de 12.512,60 Amperios, por consiguiente, la corriente que observa el relé 51MT tipo RACID, es:

$$I_{relé-51} = I_{f_{3\phi}} * RTC = 12512,60 * \frac{5}{800} = 78,20 \text{ Amp}$$

Entonces, la relación entre la corriente observada y la corriente de arranque del relé 51MT es:

$$I = \frac{I_{\text{relé-51}}}{I_s} = \frac{78,20}{6,27} = 12,47$$

De acuerdo a la curva de tiempo inverso mostrado en la figura 4.19, se obtiene un tiempo de operación del relé 51MT de 0,27 segundos para un valor de K igual a 0,1, cuando se presenta una falla trifásica a la barra de 138 KV del transformador principal de la Central.

El tiempo de operación del relé 51MT, también puede ser determinado de la siguiente manera

$$t_{51MT} = \frac{\beta}{I^\alpha - 1} \bullet k = \frac{0,14}{12,47^{0,02} - 1} * 0,1 = 0,27 \text{ s}$$

Considerando el tiempo de operación del relé 51MT, se coordina el tiempo de operación del relé 21G.

$$t_{21G} = t_{51MT} + 0,2 = 0,47 \text{ s}$$

Donde 0,2 s, es el intervalo de coordinación ó tiempo de adición entre la coordinación de relés.

Por lo tanto, el tiempo de operación para la protección de respaldo que se debe ajustar en el relé 21G, es de 0,5 s. Para ello, en la unidad de temporización RXKL 1 del relé tipo RAKZB, se ajustan los siguientes parámetros:

$$a = 0; b = 5; k = 0,1 \text{ seg.}$$

#### 4.4 Resumen de Ajustes.

| ÍTEM | RELÉ                                             | TIPO    | MODELO        | AJUSTE                                                                                                                                                                | DATOS TÉCNICOS                                                                                                                                                             |
|------|--------------------------------------------------|---------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Diferencial del Generador (87G)                  | RADHA   | RK-646.009-CA | 69 V, $t_{disp}=30$ ms                                                                                                                                                | 60 Hz; 70/100 V; 125 Vcc                                                                                                                                                   |
| 2    | Secuencia Negativa Generador (46G)               | RARIB 2 | RK-648.012-CA | Alarma: $I_{nsc} = 8\% I_n$ ; $t_{alarm} = 0,1$ s<br>Disparo: $I_{nsc} = 10\% I_n$ ; $t_{disp} = k(I_n/I_{nsc})^2$                                                    | 60 Hz; $I_n=5A$ ; 125 Vcc; $IM=0,7-1,1 \times I_n$ ; $I_{nsc} \text{ alarm}=3-9\% \times I_n$ ; $I_{nsc} \text{ start}=4-16\% \times IM$ ; $K=1-63$ s; $t_{alarm}=0,1-6$ s |
| 3    | Pérdida de Excitación Generador (40G)            | RAGPC   | RK-641.010-CA | Unidad Direccional ( $35\% I_n$ ): 1,75 A<br>Unidad Sobrecorriente ( $110\% I_n$ ): 5,5 A<br>Unidad Baja Tensión ( $90\% U_n$ ): 103,50 V<br>Tiempo de operación: 2 s | 60 Hz; $I_n=5A$ ; $U_n=100-120$ V; $I>=1-4$ A; 125 Vcc                                                                                                                     |
| 4    | Retorno de Energía Generador (32AG)              | RXPE-40 | RK-651.241-AA | $I_s=30$ mA; $t_{op}=1$ s                                                                                                                                             | 30-120mA; 20ms-99s; 60 Hz; 125 Vcc                                                                                                                                         |
| 5    | Sobretensión Generador (59G)                     | RXEG-21 | RK-651.264-BA | $115\% V_n = 132,25$ Vca; $t_{op}=2$ s                                                                                                                                | 60 Hz; 80-240 Vca; 20ms-99s                                                                                                                                                |
| 6    | Mínima tensión Generador (27G)                   | RXEG-21 | RK-651.200-BB | $80\% V_n = 92$ Vca; $t_{op}=55$ ms                                                                                                                                   | 80-240 V; $U>=40-120$ V; 125 Vcc                                                                                                                                           |
| 7    | Mínima Frecuencia Generador (81AG)               | RXFE-4  | RX-651.270-CA | 57 Hz; $t_{op}=3$ seg                                                                                                                                                 | $U_n=110$ V; 125 Vcc; 53-60 Hz; 20ms-99s                                                                                                                                   |
| 8    | Desequilibrio de Tensiones (60AG)                | RXBA 4  | XEC-500105-XB | $U_d > 20$ V; $t_{op}=8$ ms                                                                                                                                           | 60 Hz; $U_n=110$ V                                                                                                                                                         |
| 9    | Desequilibrio de Tensiones (60BG)                | RXBA 4  | XEC-500105-XB | $U_d > 20$ V; $t_{op}=8$ ms (alarma)                                                                                                                                  | 60 Hz; $U_n=110$ V                                                                                                                                                         |
| 10   | Falta a Tierra Estator Generador (64SG)          | RAGEA   | RK-646.001-CB | Sobrevoltaje (0-95%): 6 V<br>Bajo Voltaje (95-100%): 0,36 V<br>Tiempo de retardo: 0,44 s<br>Supervisión $85\% V_n=102$ V                                              | 60 Hz; $U_n>(0-95\%)= 5-15$ V; $U_n<(95-100\%)= 0.15-0.45$ V; $U>80-240$ V; 125 Vcc                                                                                        |
| 11   | Mínima Impedancia Generador (21G)                | RAKZB   | RK-654.001-BB | $Z_{f-relé}=70\% Z_{carga \text{ min.}}=11,33$ $\Omega$ /fase; $t_{op}=0,5$ s                                                                                         | $I_n= 5A$ ; $U_n=110v$ ; 5,7-213 ohm; 60 Hz; 125 Vcc                                                                                                                       |
| 12   | Diferencial del Grupo (87GT)                     | RADSB   | RK-625.005-DA | $3I_d > 0,35I_n$ ; $3I_d >> 13I_n$ ;                                                                                                                                  | 60 Hz; $I_n=1A$ ; 125 Vcc; 20-50% $I_n$                                                                                                                                    |
| 13   | Sobreintensidad Transformador Principal (51 MT1) | RACID   | RK-671-213-AA | $I_s=1,25 \times I_{n-relé}$ ; $k=0,1$ (DIAL)                                                                                                                         | 60 Hz; $I_n=5A$ ; 48-220 Vcc; $I>=(0.5-2.5) \times I_n$ ; $I>>=(2-30) \times I_n$ ; Tiempo definido $t>0.1-12s$ ; Tiempo inverso $K=0.05-1.1$                              |

Tabla 4.31 - Resumen de ajustes de la Central Térmica Trinitaria.

#### 4.5 Matriz de Disparos.

En la tabla 4.32, se muestra una matriz de disparos de la Central, considerando los relés de protección que se estudiaron en la sección 4.2.

| Tipos de Relés | Int. AT<br>52/1G2 | Int. Gen.<br>52 G | S. Aux.<br>52 MC1 | Excitación<br>41 F | Turbina<br>-- | Alarma<br>-- |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|--------------|
| 87 G           |                   | X                 |                   | X                  | X             | X            |
| 46 G           | X                 |                   |                   |                    |               | X            |
| 40 G           |                   | X                 |                   | X                  |               | X            |
| 32A G          |                   | X                 |                   | X                  |               | X            |
| 59 G           |                   | X                 |                   | X                  |               | X            |
| 27 G           |                   |                   |                   |                    |               | X            |
| 81A G          | X                 |                   |                   |                    |               | X            |
| 64 SG          |                   | X                 |                   | X                  | X             | X            |
| 21 G           | X                 | X                 | X                 | X                  | X             | X            |
| 87 GT          | X                 | X                 | X                 | X                  | X             | X            |
| 51 MT          | X                 | X                 | X                 | X                  | X             | X            |

Tabla 4.32 – Matriz de disparos de la Central Térmica Trinitaria.

#### 4.6 Conclusiones y Recomendaciones.

- ✓ En el sistema de protecciones del generador, la protección más importante en cuanto a proteger los devanados del estator, es la protección diferencial de alta velocidad la cual fue ajustada en base a la mayor corriente de falla que ve el generador, para ello, se utilizó la reactancia Subtransitoria del generador.
- ✓ El ajuste del relé (60G) tipo RXBA-4 es establecido por el fabricante por consiguiente, esta protección no requiere ningún tipo de ajuste por parte del ingeniero a cargo.

- ✓ La coordinación de protecciones de la Central Térmica Trinitaria, fue considerado el relé de sobrecorriente 51MT tipo RACID del transformador principal y el relé de impedancia del generador 21G tipo RAKZB, como protección de respaldo del generador. Es decir, se asegura que en caso que la protección principal 51MT falle en despejar una falla, la protección de respaldo 21G lo realice.
- ✓ La protección de respaldo del sistema consiste de relés con retardo de tiempo para detectar fallas en el sistema que no han sido adecuadamente aisladas por el relé de protección primaria, requiriendo el disparo del generador.
- ✓ La protección del lado de alta tensión del transformador principal (51) medirá el aporte del sistema a la falla y debe despejar la falla en un tiempo aproximado de 270 ms.
- ✓ Muchos de los relés fueron ajustados en base a valores típicos proporcionados por el fabricante y teniendo consideraciones tales como características eléctricas del generador, tipo de central e instrumentos de medición. El uso de las normas IEEE C50.13 y C37.102 para generadores sincrónicos fue importante para determinar las principales características de funcionamiento en condiciones normales y anormales.

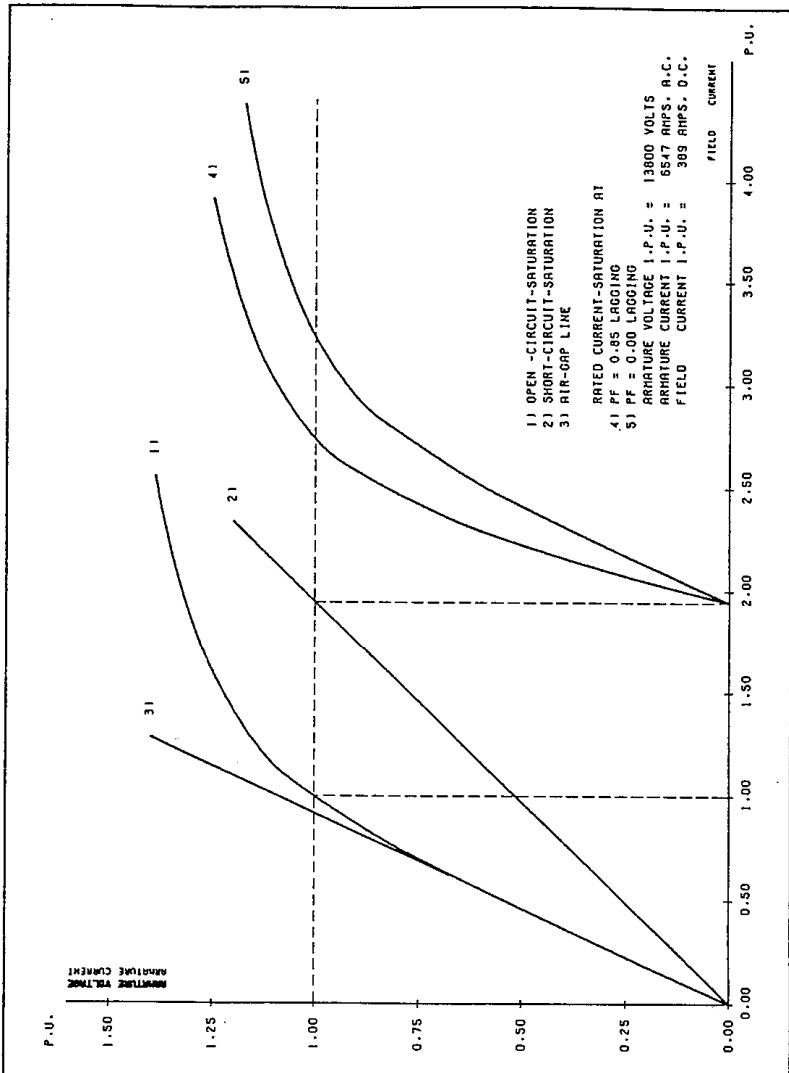
## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

1. Los estudios de flujo de carga revelan que el transformador principal y el transformador de servicios auxiliares de la subestación, no exceden de su capacidad y los voltajes de barras tanto para la Central como para el sistema en general están dentro de los rangos permitidos  $\pm 5\%$  del voltaje.
2. Con relación a los estudios de cortocircuito, se observó que la corriente de falla con mayor magnitud es debida a la falla trifásica y la corriente falla de menor magnitud es debida a la falla de línea a tierra en la barra del generador.
3. Para los ajustes de las diferentes funciones de protección fue de vital importancia realizar un estudio de las características eléctricas y constructivas de los equipos eléctricos mediante el uso de Normas. Algunas de las funciones ajustadas fueron en base a valores típicos proporcionados por el fabricante.

# **ANEXO No. 1**

- Curvas Características del Generador.
- Diagrama unifilar de la Central Térmica Trinitaria.
- Diagrama unifilar de los servicios auxiliares.

Characteristic Curves of the Generator



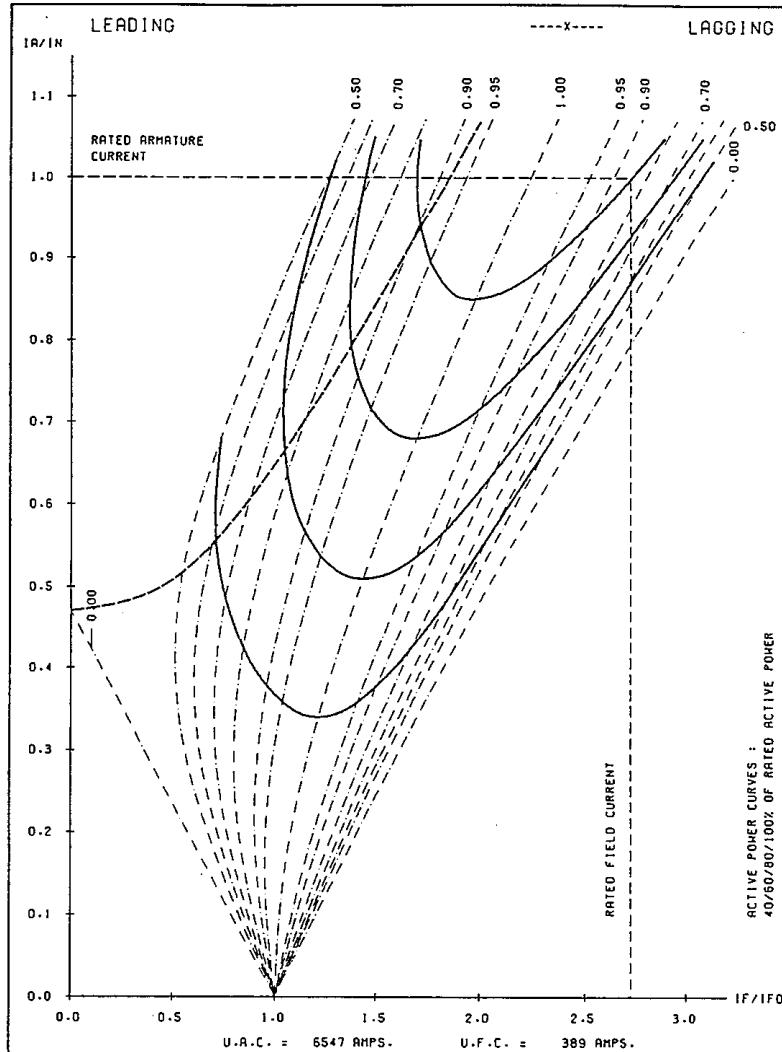
|           |
|-----------|
| AAZ       |
| 95-12-11  |
| AUZ       |
| 93-04-16  |
| Issued:   |
| KWDE13    |
| Comp. dpt |

|                                     |   |                   |                     |       |        |
|-------------------------------------|---|-------------------|---------------------|-------|--------|
| change                              | A | 0/ 09-02-95 17:30 | Issued: EICHMEDEGER | Area: | Appr.: |
| GENERATOR CHARACTERISTICS           |   |                   |                     |       |        |
| TRINITARIA WX18Z-090LL PZ.: 6306    |   |                   |                     |       |        |
| 156500 kVA 13800 V 60.0 Hz 3600 rpm |   |                   |                     |       |        |
| pf = 0.850 air overpr. = 0.0 bar    |   |                   |                     |       |        |
| Dep. KWDE13                         |   |                   |                     |       |        |
| HTCM 643 042                        |   |                   |                     |       |        |

|              |  |           |  |                                           |  |                                       |                |                     |                           |                      |  |  |
|--------------|--|-----------|--|-------------------------------------------|--|---------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------------|----------------------|--|--|
|              |  |           |  | Plant<br>Trinitaria                       |  | ABB-order number (WBZ)<br>1 – 363 402 |                | Language<br>EN      | Sheet no.<br>1            | Nos. of sheets.<br>1 |  |  |
|              |  |           |  | Denomination<br>Air-cooled Turbogenerator |  |                                       | Doc.-type<br>C | Document no.        |                           |                      |  |  |
|              |  |           |  | Identification no.<br>HM 300 994          |  |                                       | P 6501         |                     | Descr. no. HTCM 690 256 E |                      |  |  |
|              |  |           |  |                                           |  |                                       |                |                     | Y 5                       |                      |  |  |
| Modification |  | Factory * |  | Site *                                    |  | Price to<br>contract *                |                | After<br>contract * |                           |                      |  |  |

\* Enter Date where applicable

**V-Curves of the Generator**



|           |
|-----------|
| AAZ       |
| 95-12-11  |
| AUZ       |
| 93-04-16  |
| Issued:   |
| KWDE13    |
| Comp. dpt |

|                                                                                                                                                             |   |                   |                      |        |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------|----------------------|--------|--------------|
| Change                                                                                                                                                      | A | 07-09-02-95 17:30 | Issued: EICHENBERGER | Check: | Dep.: KWB 13 |
| <b>V - CURVES</b><br><b>ABB</b> TRINITARIA WX18Z-090LL PZ.: 6306<br>156500 kVA 13800 V 60.0 Hz 3600 rpm<br>pf = 0.850 air overpr. = 0.0 bar<br>HTCM 645 042 |   |                   |                      |        |              |

|              |  |           |  |                    |  |                     |  |                        |  |                           |  |          |           |                       |   |                 |   |  |  |
|--------------|--|-----------|--|--------------------|--|---------------------|--|------------------------|--|---------------------------|--|----------|-----------|-----------------------|---|-----------------|---|--|--|
|              |  |           |  | Plant              |  | Trinitaria          |  | ABB-order number (WBZ) |  | 1 – 363 402               |  | Language | EN        | Sheet no.             | 1 | Nos. of sheets. | 1 |  |  |
|              |  |           |  | Denomination       |  |                     |  |                        |  | Air-cooled Turbogenerator |  |          | Doc.-type | C                     |   |                 |   |  |  |
|              |  |           |  | Identification no. |  |                     |  |                        |  | HM 300 994                |  | P 6601   |           | Descr. no.            |   |                 |   |  |  |
|              |  |           |  |                    |  |                     |  |                        |  |                           |  |          |           | HTCM 690 256 E<br>Y 6 |   |                 |   |  |  |
| Modification |  | Factory * |  |                    |  | Prior to overhaul * |  |                        |  |                           |  |          |           |                       |   |                 |   |  |  |
|              |  | Site *    |  |                    |  | After overhaul *    |  |                        |  |                           |  |          |           |                       |   |                 |   |  |  |

\* Enter Date where applicable

|              |  |                  |  |                                                  |  |                                              |  |                       |                       |                                     |  |  |
|--------------|--|------------------|--|--------------------------------------------------|--|----------------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|--|--|
|              |  |                  |  | Plant<br><b>Trinitaria</b>                       |  | ABB-order number (WBZ)<br><b>1 – 363 402</b> |  | Language<br><b>EN</b> | Sheet no.<br><b>1</b> | No. of sheets.<br><b>1</b>          |  |  |
|              |  |                  |  | Denomination<br><b>Air-cooled Turbogenerator</b> |  |                                              |  | Doc.-type<br><b>C</b> | Document no.          |                                     |  |  |
|              |  |                  |  | Identification no.<br><b>HM 300 994</b>          |  |                                              |  | <b>P 6701</b>         |                       | Descr. no.<br><b>HTCM 690 256 E</b> |  |  |
|              |  |                  |  | Factory *                                        |  | Prior to overhaul *                          |  |                       |                       | <b>Y 7</b>                          |  |  |
| Site *       |  | After overhaul * |  |                                                  |  |                                              |  |                       |                       |                                     |  |  |
| Modification |  |                  |  |                                                  |  |                                              |  |                       |                       |                                     |  |  |

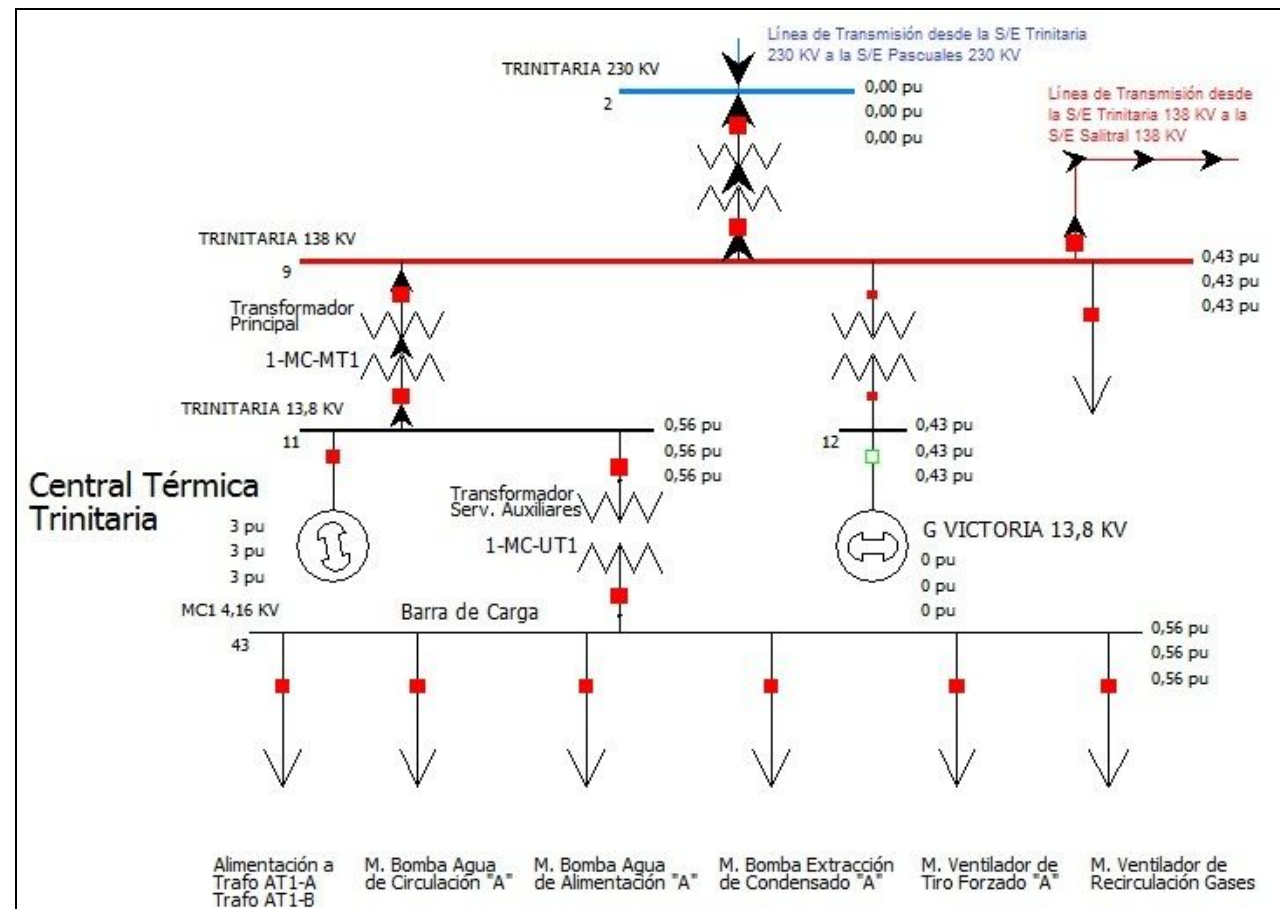
\* Enter Date where applicable

# **ANEXO No. 2**

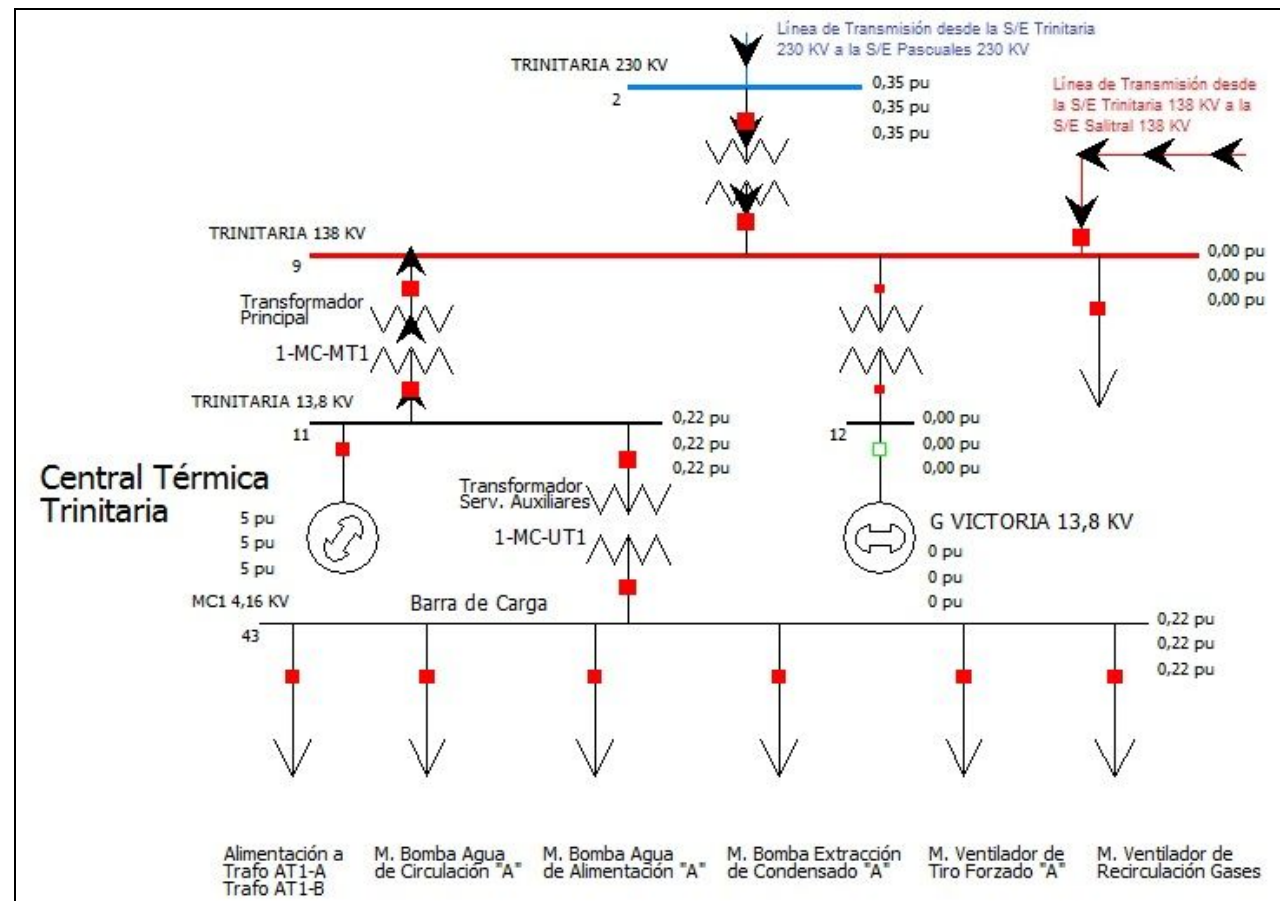
- Flujo de Carga del Sistema de Guayaquil.

# **Anexo No. 3**

- Corridas de Cortocircuito del Caso Base.

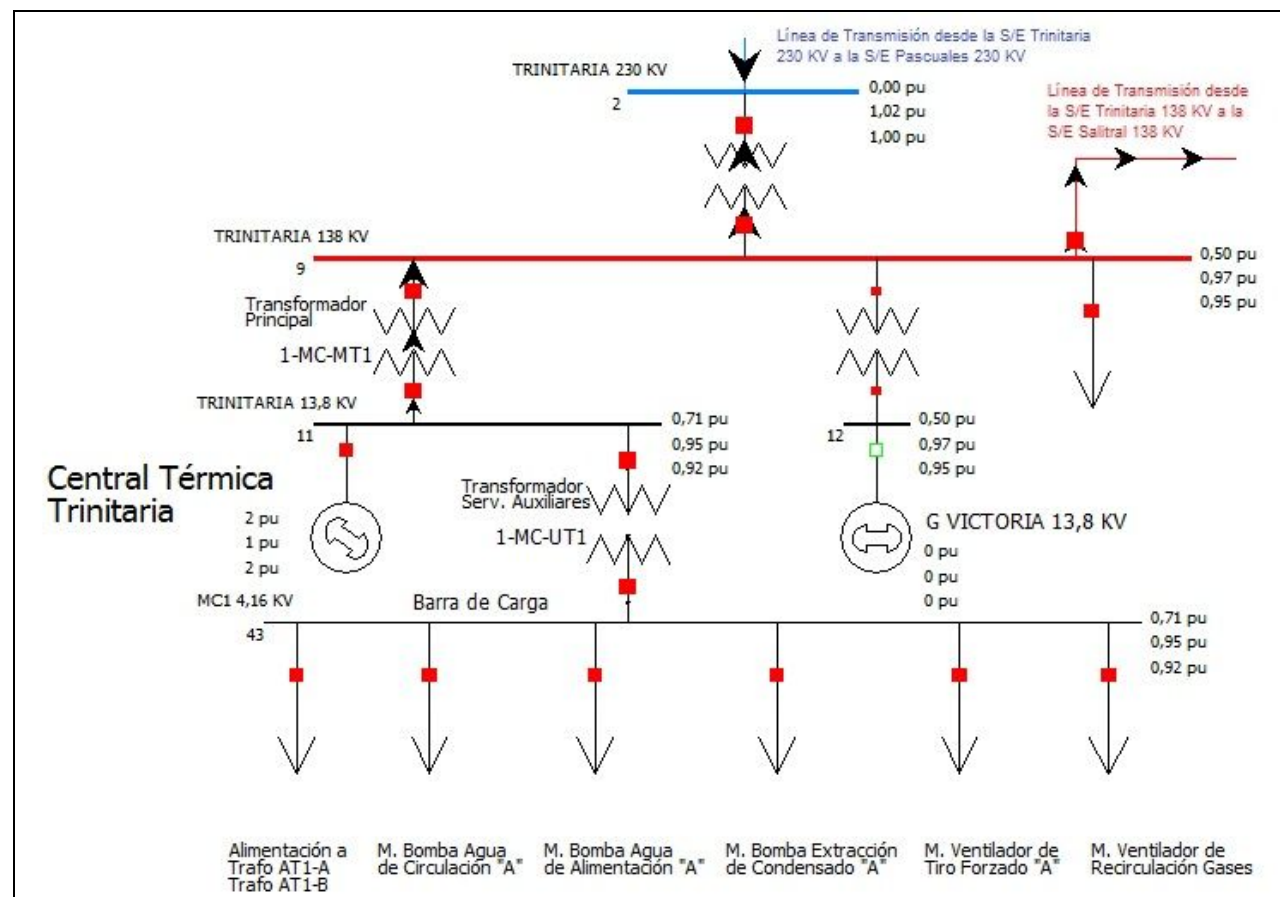


3.1 Falla trifásica en la Barra #2, Trinitaria 230 KV.

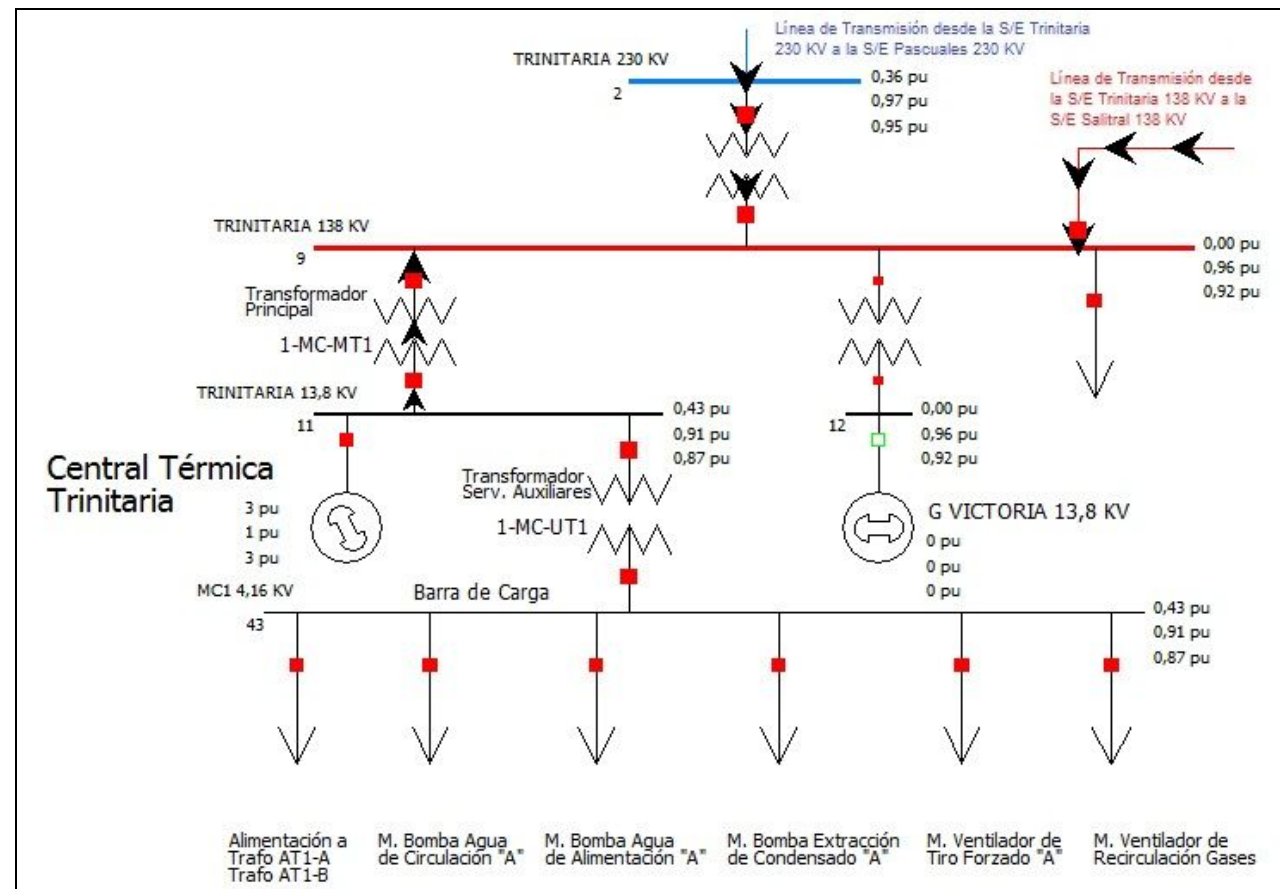


3.2 Falla trifásica en la Barra #9, Trinitaria 138 KV.

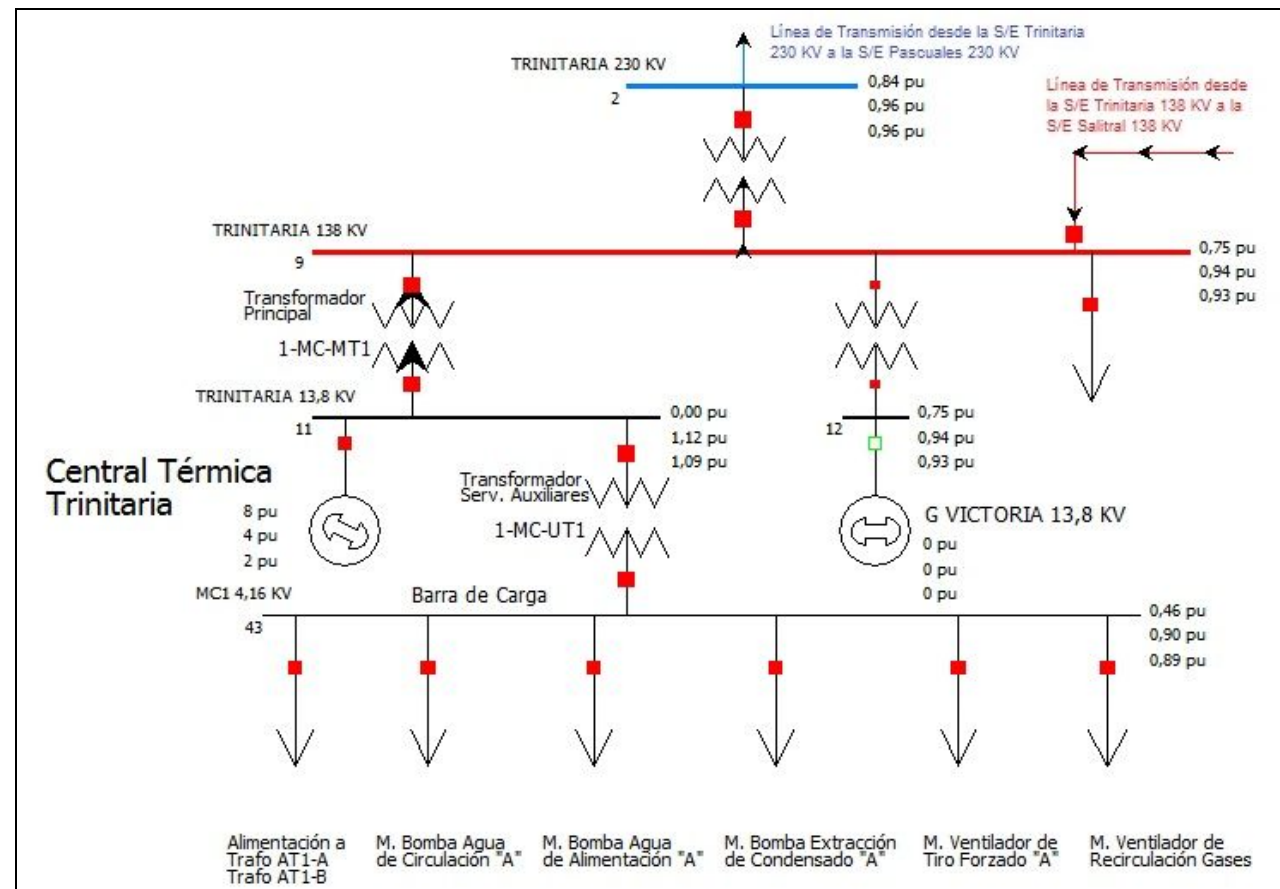




3.4 Falla de fase a tierra en la Barra #2, Trinitaria 230 KV.



3.5 Falla de fase a tierra en la Barra #9, Trinitaria 138 KV.



3.6 Falla de fase a tierra en la Barra #11, Trinitaria 13,8 KV

# **Anexo No. 4**

- Esquema de Protecciones de la Central Térmica Trinitaria.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] The Power Engineering Education Committee, Tutorial IEEE de Protección de Generadores Sincrónicos, 1992.
  
- [2] Stevenson William, Análisis de Sistemas de Potencia, Editorial McGRAW-HILL, México 2004.
  
- [3] ABB, Type RADHA High impedance differential relay, 1MRK 509 015-BEN, April 2006.
  
- [4] ASEA, Protección de corriente de secuencia negativa RARIB, RK 648-300 Sp, April 1981.
  
- [5] ASEA, Loss-of-field relays type RAGPA and RAGPC for synchronous generators, Edition 1 RK 641-303 E, August 1978.
  
- [6] ASEA, Relé direccional RXPE 4, RK 511-300 Sp, Febrero 1983.
  
- [7] ABB, Type RXEG Voltage relay and protection assemblies, 1MDB09009-EN, March 1992.
  
- [8] ABB, Types FCN, -81 and RXFE Frequency relays, 1MDB08007-EN, March 1992.

- [9] ABB, Types RXBA and RXETA Fuse supervision relays, 1MDB08009-EN, March 1992.
- [10] ABB, Type RAGEA 100% generator stator ground-fault relay, B03-4012E, January 1987.
- [11] ABB, Type RAKZB Impedance protection relay, 1MDB09016-EN, March 1992.
- [12] ABB, Transformer differential protection RADSB, 1MRK 504 002-UEN, September 1997.
- [13] ABB, Type RACID Time-lag overcurrent and earth fault relay, 1MDU07006-EN, March 1991.