

**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE  
MANABÍ FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA  
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Título del proyecto Investigativo previo a obtener el Título  
Profesional de Ingeniero Eléctrico**

**Modalidad Proyecto de Investigación**

**ESTUDIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS APLICADAS A LOS  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA SUPERIORES A 1 MVA  
MEDIANTE EL USO DE RELES DIGITALES**

**Realizado por:**

**BARBERÁN CASTRO VERÓNICA GEOVANNA**

**Asesor académico:**

**ING. GARY LEÓN**

Manta – Ecuador

26 de septiembre 2021

Ing. Gary León Valencia, Docente de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí de la facultad de Ingeniería, carrera Ingeniería Eléctrica en calidad de tutor del trabajo de titulación.

CERTIFICO:

Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, cumpliendo el total de 80 horas, bajo la modalidad investigativa, cuyo tema del proyecto es “ESTUDIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS APLICADAS A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA SUPERIORES A 1 MVA MEDIANTE EL USO DE RELES DIGITALES”, el mismo que ha sido desarrollado de acuerdo a los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado corresponde a la señorita Verónica Geovanna Barberán Castro, estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica, período académico 2020(2)-2021(1) quien se encuentra apto para el acto de sustentación de su trabajo de titulación.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 26 de septiembre, 2021.

Lo certifico,

---

Ing. Gary León Valencia

Docente tutor

Docente de la carrera de Ing. Eléctrica

Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

## **AUTORÍA**

Yo, VERÓNICA GEOVANNA BARBERÁN CASTRO, declaro que el presente proyecto de titulación es de mi autoría, los resultados, recomendaciones y conclusiones de este proyecto son estrictamente responsabilidad de los autores, en el cual se tiene como respaldo las citas bibliográficas correspondientes y necesarias para la ejecución de esta, respetando todos los derechos de los autores vigentes. El patrimonio intelectual de este proyecto de titulación corresponderá a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Manta, 26 de septiembre 2021

---

VERÓNICA GEOVANNA BARBERAN CASTRO  
AUTOR/A

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL**

Sometida a consideración del honorable tribunal examinador de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, como requisito previo a la obtención de título de: INGENIERO(A) ELÉCTRICO(A)

### **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

FIRMAS

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### **CALIFICACIÓN TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Calificación trabajo escrito: \_\_\_\_\_

Calificación sustentación de tesis: \_\_\_\_\_

Nota final de trabajo de graduación: \_\_\_\_\_

Lo certifico,

Lcda. Rosa García Marcos.

Secretaria de la Facultad de Ingeniería

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación se lo dedico a Dios, a mi madre Verónica Castro quien siempre luchó y me defendió hasta el cansancio demostrándole a todos que soy muy brillante en todo lo que hago y a mi abuelita Zoila Vélez quien estuvo siempre conmigo aconsejándome, sin permitir que me rindiera, a ellas le dedico este logro, a mis dos madres, quienes me han dicho que el estudio es la mejor herencia que se le puede dejar a los hijos, espero se sientan muy orgullosas de mí.

Verónica Barberán Castro

## AGRADECIMIENTO

De manera muy especial y respetuosa me encantaría agradecerle primero a Dios, por la paciencia, por la salud y la vida que me ha dado y como si fuera poco, agradecerle por la fuerza que me ha dado a diario para alcanzar mis metas y culminar mi carrera con éxito.

Quiero agradecerle también a mi madre Verónica Castro, quien a pesar de todo siempre me ha apoyado, por dar todo su esfuerzo, en darme lo mejor y repetirme desde que nací que “lo que uno empieza debe ser terminado si o si”, a mis abuelitos Zoila y Daniel, que, con sus valores, consejos, cariño, etc. han estado siempre para mí, cuando más los he necesitado; son mi soporte de vida, a mi papá de corazón Jhonny, a mis hermanos Alisson y Erick, a mis tías Susana, Silvana y Margarita, quienes siempre se han sentido orgullosos de mí y cuando he querido rendirme me regañan si es necesario, sin mi familia yo no estaría aquí.

A mi persona favorita, Raymond, gracias por escucharme, por ser el segundo en darme fuerzas de seguir, el primero es Dios, por recordarme que soy una hija de Dios y que él nunca me deja sola, por darme tu amor, tu cariño, por decirme que no me rinda, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por ser mi maestro, por tenerme paciencia y explicarme mil veces la misma cosa, por ser mi soporte diario, por eso y por muchas cosas más, gracias.

Quiero agradecer a cada uno de los ingenieros, que me brindaron sus conocimientos, me apoyaron y siempre creyeron en mí, en especial al Ing. Carlo Cano, quien siempre ha confiado en mí y a mi tutor de tesis el Ing. Gary León, quién con mucha paciencia, me ha brindado su apoyo hasta el último momento con la labor de este trabajo de titulación.

Y a mis compañeras quienes me brindaron ayuda de manera desinteresada y contribuyeron en todo lo que estuvo a su alcance haciendo posible este final de carrera.

Verónica Barberán Castro

## **RESUMEN**

Los sistemas de distribución de energía eléctrica deben cumplir con varios requisitos indispensables para realizar prestaciones de servicios con niveles de calidad y de seguridad para el usuario final, mediante normas y procedimientos precisos durante las etapas de construcción y operación de sistemas de potencia, con el fin de minimizar los efectos de las fallas, los tiempos de interrupción y mejorar la continuidad del servicio a los consumidores.

Es por esta razón que los transformadores son equipos que requieren cuidados tanto de mantenimiento como de funcionamiento, debido a su importancia en el sistema eléctrico y en conjunto a los equipos al que están conectados, por lo cual se utilizan los relés diferenciales, cuyo funcionamiento principal es servir como protección primaria para grandes transformadores.

Cabe recalcar que esta investigación se ha realizado con la finalidad de darle la importancia a los distintos tipos de protección que son normalmente utilizados en los transformadores de potencia, ya que este es el elemento más importante del sistema eléctrico y con la ayuda de trabajos de investigación relacionado al tema, se han encontrado con soluciones prácticas para detectar la falla de una manera eficaz y precisa, mediante softwares empleados en relés digitales.

## **PALABRAS CLAVES**

Transformadores de potencia; Relés de protección; Protección Diferencial

## **ABSTRACT**

Electric power distribution systems must meet several essential requirements to provide services with quality and safety levels for the end user, through precise standards and procedures during the construction and operation stages of power systems, in order to minimize the effects of failures, interruption times and improve the continuity of service to consumers.

It is for this reason that transformers are equipment that requires both maintenance and operation care, due to their importance in the electrical system and in conjunction with the equipment to which they are connected, for which differential relays are used, whose main function is to serve as primary protection for large transformers.

It should be noted that this research has been carried out in order to give importance to the different types of protection that are normally used in power transformers, since this is the most important element of the electrical system and with the help of research work Related to the subject, they have found practical solutions to detect the fault in an efficient and precise way, using software used in digital relays.

## **KEYWORDS**

Power transformers; Protection relays; Differential protection

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| AUTORÍA .....   | 3         |
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL .....   | 4         |
| CALIFICACIÓN TRABAJO DE GRADUACIÓN .....                              | 4         |
| DEDICATORIA.....  | 5         |
| AGRADECIMIENTO .....  | 6         |
| RESUMEN .....   | 7         |
| PALABRAS CLAVES.....  | 7         |
| ABSTRACT .....  | 8         |
| KEYWORDS.....   | 8         |
| ÍNDICE DE CONTENIDO .....   | 9         |
| INDICE DE IMAGEN .....  | 15        |
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | 19        |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....   | 21        |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCION Y GENERALIDADES .....                        | 22        |
| <b>1.1. Introducción.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>1.2. Antecedentes.....</b>   | <b>23</b> |
| <b>1.3. Justificación.....</b>  | <b>25</b> |
| <b>1.4. Planteamiento del problema.....</b>                           | <b>25</b> |
| <b>1.5. Hipótesis .....</b>   | <b>26</b> |
| <b>1.6. Objetivo general .....</b>                                    | <b>26</b> |
| <b>1.7. Metodología de investigación .....</b>                        | <b>26</b> |
| <b>1.7.1. Explicativa .....</b>                                       | <b>27</b> |
| <b>1.7.2. No experimental .....</b>                                   | <b>27</b> |
| CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE.....                                     | 28        |
| <b>2.1. Marco teórico .....</b>                                       | <b>28</b> |
| <b>2.2. Transformadores de potencia .....</b>                         | <b>30</b> |
| <b>2.3. Partes de un transformador de potencia .....</b>              | <b>30</b> |
| <b>2.3.1. Accesorios .....</b>  | <b>31</b> |
| <b>2.4. Tipo de transformadores de potencia .....</b>                 | <b>32</b> |
| <b>2.4.1. Por el tipo de núcleo .....</b>                             | <b>32</b> |
| <b>2.4.1.1. Transformadores de potencia de núcleo de aire.....</b>    | <b>32</b> |
| <b>2.4.1.2. Transformador Ferromagnético / núcleo de hierro .....</b> | <b>33</b> |
| <b>2.4.2. Por el tipo de enfriamiento.....</b>                        | <b>33</b> |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.4.3.   | Por el número de fase .....   | 34 |
| 2.4.3.1. | Transformadores Monofásicos .....   | 34 |
| 2.4.3.2. | Transformadores Trifásicos.....   | 35 |
| 2.4.4.   | Por su localización.....  | 36 |
| 2.4.4.1. | Interior .....  | 36 |
| 2.4.4.2. | Intemperie.....   | 36 |
| 2.4.5.   | Por su capacidad .....  | 36 |
| 2.4.6.   | Por su aplicación .....   | 37 |
| 2.4.7.   | Por su conexión.....  | 37 |
| 2.5.     | Niveles de voltaje de los transformadores de potencia.....  | 38 |
| 2.6.     | Tipo de conexiones de los transformadores de potencia. ....                                       | 39 |
| 2.6.1.   | Delta – estrella .....  | 39 |
| 2.6.2.   | Estrella – Estrella.....  | 40 |
| 2.6.3.   | Delta – delta.....  | 41 |
| 2.6.4.   | Zigzag.....   | 43 |
| 2.6.5.   | Estrella – delta .....  | 44 |
| 2.7.     | Costos y otros factores a considerar .....  | 45 |
| 2.8.     | Clase de fallas en los Sistemas Eléctricos de Potencia .....                                      | 45 |
| 2.9.     | Fallas eventuales que ocurren en los sistemas eléctricos de potencia.....                         | 45 |
| 2.9.1.   | Sobrecargas simétricas y asimétricas .....  | 46 |
| 2.9.1.1. | Falla trifásica .....   | 47 |
| 2.9.1.2. | Falla línea a línea.....  | 47 |
| 2.9.1.3. | Falla línea a tierra.....   | 48 |
| 2.9.2.   | Sobreexcitación.....  | 49 |
| 2.9.3.   | Sobretensiones electromagnéticas.....   | 49 |
| 2.9.4.   | Problemas con el aceite.....  | 50 |
| 2.9.5.   | Cortocircuito entre espiras de un devanado .....  | 50 |
| 2.10.    | Causas de las fallas en los sistemas eléctricos de potencia .....                                 | 50 |
| 2.11.    | Proceso Transitorios en los Sistemas Eléctricos de Potencia .....                                 | 51 |
| 2.11.1.  | Corriente de inrush .....   | 52 |
| 2.11.2.  | Corrientes de carga fría.....   | 54 |
| 2.12.    | Fallas más comunes en los transformadores de potencia .....                                       | 55 |
| 2.1.     | Dispositivos de Relés digitales para protección de transformadores de potencia en el mercado..... | 57 |
| 2.2.     | Dispositivos de Relés digitales para protección de transformadores de potencia en el mercado..... | 57 |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.2.1.  | Relés SEL (Schweitzer Engineering Laboratories).....  | 58        |
| 2.2.1.1.  | Relé SEL para protecciones de los transformadores de potencia. ....   | 58        |
| 2.2.1.2.  | Relé SEL de protección diferencial.....   | 59        |
| 2.2.2.  | SIEMENS.....  | 59        |
| 2.2.3.  | SCHNEIDER.....  | 60        |
| 2.2.3.1.  | MiCOM P64x .....  | 60        |
| 2.2.4.  | ABB.....  | 60        |
| 2.2.4.1.  | RET615.....   | 60        |
| 2.3.  | <b>Tipos de codificaciones de relés de protección para los transformadores de potencia, según la normativa ANSI. ....</b> | <b>61</b> |
| <b>CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b> |   | <b>62</b> |
| 3.1.  | <b>Definiciones básicas de Protecciones eléctricas.....</b>   | <b>62</b> |
| 3.1.1.  | Misión .....  | 62        |
| 3.1.2.  | Importancia.....  | 62        |
| 3.1.3.  | Definición .....  | 62        |
| 3.1.4.  | Objetivo de las protecciones eléctricas .....   | 63        |
| 3.1.5.  | Funciones de las protecciones eléctricas.....   | 64        |
| 3.1.6.  | Coordinación de los dispositivos de protección. ....  | 64        |
| 3.1.7.  | Magnitudes eléctricas que controlan los relés de protección.....  | 65        |
| 3.1.8.  | Clasificación y codificación de relés de protección .....   | 66        |
| 3.2.  | <b>Instrumentos y elementos de protección para los Sistemas Eléctricos de Potencia. ....</b>                              | <b>68</b> |
| 3.2.1.  | Transformadores de medición.....  | 69        |
| 3.2.2.  | Relés de protección.....  | 71        |
| 3.2.3.  | Interruptores.....  | 73        |
| 3.2.4.  | Fusibles.....   | 75        |
| 3.2.5.  | Reconectores o restauradores automáticos.....   | 78        |
| 3.2.6.  | Sistema de comunicaciones.....  | 80        |
| 3.3.  | <b>Protección de transformadores de potencia.....</b>   | <b>82</b> |
| 3.3.1.  | <b>Tipos y criterios basados en la protección del transformador de potencia .....</b>                                     | <b>83</b> |
| 3.3.2.  | <b>Función principal de la codificación de relés de protección para transformadores según las normativas ANSI .....</b>   | <b>84</b> |
| 3.3.2.1.  | Relés utilizados en fallas internas.....  | 84        |
| 3.3.2.2.  | Relés utilizados en condiciones de funcionamiento anormales .....   | 85        |
| 3.3.2.3.  | Relés utilizados en Fallas externas .....   | 85        |
| 3.3.2.3.1.  | Proteccion 24 (sobrecitación) .....   | 85        |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| 3.3.2.3.1.1.  | Características principales de la sobreexcitación.....  | 86  |
| 3.3.2.3.1.2.  | Criterio de Ajuste de la protección 24.....   | 86  |
| 3.3.2.3.1.3.  | Curva de sobreexcitación en el transformador de potencia.....   | 88  |
| 3.3.2.3.2.    | Proteccion 27 (Subtensión).....   | 89  |
| 3.3.2.3.3.    | Proteccion 46 (Proteccion sobrecorriente de secuencia negativa).....  | 91  |
| 3.3.2.3.3.1.  | Criterio de Ajuste de la protección 46.....   | 92  |
| 3.3.2.3.4.    | Proteccion 49 (Sobrecarga Térmica).....   | 93  |
| 3.3.2.3.4.1.  | Criterio de Ajuste de la protección 46.....   | 95  |
| 3.3.2.3.5.    | Protección 50/51 (Sobrecorriente de fase instantánea).....  | 96  |
| 3.3.2.3.5.1.  | Criterio de Ajuste de la protección 50/51.....  | 97  |
| 3.3.2.3.6.    | Proteccion 50G/ 50N (Sobrecorriente instantánea de tierra y de neutro)<br>98  |     |
| 3.3.2.3.7.    | Proteccion 50BF (Fallo del interruptor).....  | 100 |
| 3.3.2.3.7.1.  | Criterio de Ajuste de la protección 50BF.....   | 100 |
| 3.3.2.3.8.    | Proteccion 51G (Sobrecorriente de tiempo inverso).....  | 101 |
| 3.3.2.3.9.    | Proteccion 51N (Sobrecorriente de tiempo inverso neutral).....  | 101 |
| 3.3.2.3.9.1.  | Criterio de Ajuste de la protección 51N.....  | 102 |
| 3.3.2.3.10.   | Proteccion 81U (Subfrecuencia).....   | 103 |
| 3.3.2.3.10.1. | Criterio de Ajuste de la protección 81U.....  | 104 |
| 3.3.2.3.11.   | Proteccion 87T (Protección Diferencial).....  | 105 |
| 3.3.2.3.11.1. | Criterio de ajuste.....   | 106 |
| 3.4.          | Diagramas unifilares de protección para un transformador de potencia.....   | 107 |
| 3.4.1.        | Esquema de protecciones para transformadores de potencia de 1 MVA a 10<br>MVA de dos devanados con conexión DELTA-ESTRELLA..... | 108 |
| 3.5.          | Protección diferencial de los transformadores de potencia (ANSI 87).....  | 108 |
| 3.5.1.        | Ventajas de la protección diferencial.....  | 111 |
| 3.5.2.        | Problemas comunes que se aplican en la protección diferencial.....  | 112 |
| 3.5.3.        | Consideraciones básicas de la protección diferencial.....   | 112 |
| 3.5.4.        | Tipo básicos de relés diferenciales de protección.....  | 113 |
| 3.5.4.1.      | Protección diferencial utilizando relés de sobre corriente temporizados<br>(ANSI 87T). 114                                      |     |
| 3.5.4.2.      | Protección diferencial usando relés diferenciales porcentuales (ANSI 87GD)<br>114   |     |
| 3.5.4.3.      | Proteccion 87HS (Diferencial de fase sin restricciones).....  | 115 |
| 3.5.4.4.      | Protección diferencial utilizando relés diferenciales porcentuales con<br>restricción de armónicos (ANSI 87G).....              | 115 |

|  |     |
|--|-----|
| CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE RELÉS DIFERENCIALES .....                    | 116 |
| 4.1. Selección de la protección diferencial en función de la capacidad del transformador | 116 |
| 4.2. Relés diferenciales más usados .....  | 119 |
| 4.2.1. SEL- 487E .....   | 119 |
| 4.2.1.1. Ventajas.....   | 119 |
| 4.2.1.2. Características .....   | 120 |
| 4.2.1.3. Especificaciones técnicas del dispositivo .....                                 | 123 |
| 4.2.2. SEL – 787- 2/- 3/- 4 .....  | 124 |
| 4.2.2.1. Características .....   | 124 |
| 4.2.2.2. Elementos de protección .....   | 125 |
| 4.2.2.3. Diagrama funcional de Relé 787 3E .....   | 127 |
| 4.2.3. SEL – 387 .....   | 127 |
| 4.2.3.1. Diagrama funcional del Relé SEL- 387 .....                                      | 128 |
| 4.2.4. SEL – 387 E .....   | 128 |
| 4.2.5. SEL – 387 A .....   | 129 |
| 4.2.5.1. Diagrama funcional del Relé SEL-387A .....                                      | 132 |
| 4.2.6. SEL – 587 / 587Z .....  | 132 |
| 4.2.6.1. Descripción funcional del relé SEL - 587 .....                                  | 133 |
| 4.2.7. SIPROTEC 7UT612 .....   | 133 |
| 4.2.7.1. Funciones .....   | 135 |
| 4.2.7.2. Funciones de control.....   | 135 |
| 4.2.8. MiCOM P64x .....  | 135 |
| 4.2.8.1. Ventajas.....   | 136 |
| 4.2.9. ABB – RET 615 .....   | 136 |
| 4.2.9.1. Diagrama funcional del relé ABB - RET 615 .....                                 | 137 |
| 4.3. Valoración económica de relés diferenciales .....                                   | 138 |
| CAPÍTULO V: PROPUESTA.....   | 144 |
| 5.1. Diseño metodológico.....  | 144 |
| 5.1.1. Tareas de investigación.....  | 144 |
| 5.2. Campo de acción.....  | 144 |
| 5.3. Beneficiario.....   | 144 |
| CAPITULO VI: CONCLUSION .....  | 146 |
| 6.1. Conclusiones .....  | 146 |
| 6.2. Recomendaciones.....  | 148 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>6.3. Referencias Bibliográficas.....</b> | <b>149</b> |
|---|------------|

## INDICE DE IMAGEN

|  |           |
|--|-----------|
| Figura 1.....  | 30        |
| <i>Partes de un transformador de potencia convencional.....</i>                  | <i>30</i> |
| Figura 2.....  | 32        |
| <i>Simbología de transformador de núcleo de aire. ....</i>                       | <i>32</i> |
| Figura 3.....  | 33        |
| <i>Simbología de transformador de núcleo de aire ....</i>                        | <i>33</i> |
| Figura 4.....  | 35        |
| <i>Núcleo de un transformador monofásico ....</i>                                | <i>35</i> |
| Figura 5.....  | 36        |
| <i>Banco trifásico con conexión delta-delta ....</i>                             | <i>36</i> |
| Figura 6.....  | 39        |
| <i>Conexión delta – estrella.....</i>  | <i>39</i> |
| Figura 7.....  | 41        |
| <i>Conexión Estrella – Estrella.....</i>   | <i>41</i> |
| Figura 8.....  | 42        |
| <i>Conexión delta-delta.....</i>   | <i>42</i> |
| Figura 9.....  | 43        |
| <i>Conexión zigzag.....</i>  | <i>43</i> |
| Figura 10.....   | 44        |
| <i>Conexión Delta - Estrella.....</i>  | <i>44</i> |
| Figura 11.....   | 47        |
| <i>Diagrama falla Trifásica.....</i>   | <i>47</i> |
| Figura 12.....   | 48        |
| <i>Falla línea a línea.....</i>  | <i>48</i> |
| Figura 13.....   | 48        |
| <i>Falla de línea a tierra.....</i>  | <i>48</i> |
| Figura 14.....   | 53        |
| <i>Corriente de Inrush. ....</i>   | <i>53</i> |
| Figura 15.....   | 54        |
| <i>Gráfico de pico de carga fría con respecto al tiempo de desconexión. ....</i> | <i>54</i> |
| Figura 16.....   | 55        |
| <i>Núcleo del transformador de potencia.....</i>                                 | <i>55</i> |

|  |           |
|--|-----------|
| Figura 17.....   | 56        |
| <i>Tanques del transformador de potencia.....</i>                      | <i>56</i> |
| Figura 18.....   | 57        |
| <i>Refrigeración de los transformadores de potencia .....</i>          | <i>57</i> |
| Figura 19.....   | 65        |
| <i>Simulador CYMTCC, muestra de Protección de un alimentador. ....</i> | <i>65</i> |
| Figura 20.....   | 69        |
| <i>Tipos de transformadores de instrumento o de medición.....</i>      | <i>69</i> |
| Figura 21.....   | 70        |
| <i>Conexión Estrella .....</i>   | <i>70</i> |
| Figura 22.....   | 70        |
| <i>Conexión en Delta Rota más común de los TP's.....</i>               | <i>70</i> |
| Figura 23.....   | 71        |
| <i>Conexión en Delta Rota más común de los TP's.....</i>               | <i>71</i> |
| Figura 24.....   | 71        |
| <i>Relé de protección en una subestación eléctrica.....</i>            | <i>71</i> |
| Figura 25.....   | 76        |
| <i>Fusibles de potencia .....</i>                                      | <i>76</i> |
| Figura 26.....   | 76        |
| <i>Fusible de potencia.....</i>  | <i>76</i> |
| Figura 27.....   | 77        |
| <i>Corriente de cortocircuito y tiempo de fusión .....</i>             | <i>77</i> |
| Figura 28.....   | 80        |
| <i>Tabla características de un reconectador marca NOVA. ....</i>       | <i>80</i> |
| Figura 29.....   | 80        |
| <i>Reconectador Automático marca NOVA.....</i>                         | <i>80</i> |
| Figura 30.....   | 81        |
| <i>Niveles de control en subestaciones eléctricas.....</i>             | <i>81</i> |
| Figura 31.....   | 86        |
| <i>Panel de ajuste de protección 24.....</i>                           | <i>86</i> |
| Figura 32.....   | 88        |
| <i>Curva de sobreexcitación. ....</i>                                  | <i>88</i> |
| Figura 33.....   | 92        |
| <i>Ajustes de la protección 46.....</i>                                | <i>92</i> |
| Figura 34.....   | 93        |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Ajuste del relé de secuencia negativa ANSI 46</i> .....  | 93  |
| Figura 35.....  | 94  |
| <i>Proteccion de sobrecarga térmica.</i> .....  | 94  |
| Figura 36.....  | 96  |
| <i>Esquema de los ajustes de protección ANSI 50/51 de los transformadores de potencia.</i><br>..... | 96  |
| Figura 37.....  | 97  |
| <i>Curva tiempo vs corriente, del ajuste 51 ANSI.</i> .....   | 97  |
| Figura 38.....  | 98  |
| <i>Curva de ajuste de las protecciones 50 -51</i> .....   | 98  |
| Figura 39.....  | 99  |
| <i>Ajustes de la protección 50N/50G</i> .....   | 99  |
| Figura 40.....  | 101 |
| <i>Ajustes para la protección 51G.</i> .....  | 101 |
| Figura 41.....  | 102 |
| <i>Curva de la protección de sobrecorriente de tiempo inverso</i> .....                             | 102 |
| Figura 42.....  | 104 |
| Condiciones de operación de protección de baja frecuencia. ....                                     | 104 |
| Figura 43.....  | 105 |
| <i>Esquema de la protección diferencial en transformadores.</i> .....                               | 105 |
| Figura 44.....  | 106 |
| <i>Curva características del relé 87T</i> .....   | 106 |
| Figura 45.....  | 107 |
| <i>Diagrama unifilar de las protecciones de un transformador de potencia</i> .....                  | 107 |
| Figura 46.....  | 108 |
| <i>Esquema de protección de transformadores de dos devanados de 1 a 10 MVA.</i> .....               | 108 |
| Figura 47.....  | 109 |
| <i>Esquema de un transformador monofásico utilizando Relé diferencial.</i> .....                    | 109 |
| Figura 48.....  | 109 |
| <i>Esquema de un relé diferencial en un transformador de potencia.</i> .....                        | 109 |
| Figura 49.....  | 110 |
| <i>Curva de la pendiente porcentual y bloqueo de armónicos</i> .....                                | 110 |
| Figura 50.....  | 113 |
| <i>Ondas durante su estado y falla estables</i> .....   | 113 |
| Figura 51.....  | 114 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Funcionamiento del Relé diferencial porcentual.</i> .....   | 114 |
| Figura 52.....   | 116 |
| <i>Esquema referencial de la protección diferencial ANSI / IEE C37.91</i> .....                                  | 116 |
| Figura 53.....   | 117 |
| <i>Curvas de entradas y salidas del sistema de protección en función de la potencia del transformador.</i> ..... | 117 |
| Figura 54.....   | 120 |
| <i>Lado frontal del relé SEL 487E con su respectiva descripción</i> .....  | 120 |
| Figura 55.....   | 121 |
| <i>Software de configuración.</i> .....  | 121 |
| Figura 56.....   | 122 |
| <i>Vista posterior del relé 487-E</i> .....  | 122 |
| Figura 57.....   | 123 |
| <i>Descripción del diagrama funcional</i> .....  | 123 |
| Figura 58.....   | 123 |
| <i>Diagrama funcional</i> .....  | 123 |
| Figura 59.....   | 124 |
| <i>Parte frontal del Relé SEL787</i> .....   | 124 |
| Figura 60.....   | 125 |
| <i>Parte superior del relé de 787</i> .....  | 125 |
| Figura 61.....   | 127 |
| <i>Diagrama funcional del relé SEL 787-3E</i> .....  | 127 |
| Figura 62.....   | 127 |
| <i>Relé SEL – 387</i> .....  | 127 |
| Figura 63.....   | 128 |
| <i>Diagrama funcional del Relé SEL – 387</i> .....   | 128 |
| Figura 64.....   | 128 |
| <i>Relé SEL- 387E</i> .....  | 128 |
| Figura 65.....   | 129 |
| <i>Esquema de uso de Relé de protección SEL 387E</i> .....   | 129 |
| Figura 66.....   | 130 |
| <i>Relé SEL – 387A</i> .....   | 130 |
| Figura 67.....   | 130 |
| <i>Panel frontal SEL – 387A</i> .....  | 130 |
| Figura 68.....   | 132 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Diagrama funcional de SEL 387A Relé</i> .....   | 132 |
| Figura 69.....   | 133 |
| <i>Parte frontal del relé SEL – 587</i> .....  | 133 |
| Figura 70.....   | 133 |
| <i>Diagrama funcional de SEL – 587</i> .....   | 133 |
| Figura 71.....   | 134 |
| <i>Relé SIPROTEC 7UT612</i> .....  | 134 |
| Figura 72.....   | 134 |
| <i>Diagrama de utilización del Relé 7UT612 en un transformador de potencia</i> .....   | 134 |
| Figura 73.....   | 136 |
| <i>Relé de protección diferencial MiCOM P64x</i> .....   | 136 |
| Figura 74.....   | 137 |
| <i>Relé de protección ABB-RET 615</i> .....  | 137 |
| Figura 75.....   | 137 |
| <i>Diagrama de protección de transformador de potencia de dos devanados con la configuración estándar A del RET615</i> ..... | 137 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.....  | 30 |
| Partes de un transformador de potencia convencional .....             | 30 |
| Tabla 2.....  | 34 |
| Tipos de enfriamiento de los transformadores de potencia .....        | 34 |
| Tabla 3.....  | 38 |
| Niveles de voltaje y su relación de transformación.....               | 38 |
| Tabla 4.....  | 61 |
| Tipos de ajustes para relés según las normativas ANSI .....           | 61 |
| Tabla 5.....  | 66 |
| Clasificación de relés numéricos de protección .....                  | 66 |
| Tabla 6.....  | 66 |
| Codificación ANSI de los distintos tipos de Relés de protección ..... | 66 |
| Tabla 7.....  | 72 |
| Clasificación de relés de protección.....                             | 72 |
| Tabla 8.....  | 74 |
| Clasificación de interruptores.....                                   | 74 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 9.....  | 78  |
| Características y aplicación de un transformador tipo E .....                                       | 78  |
| Tabla 10.....   | 83  |
| Clasificación de las fallas que ocurren en el transformador de potencia.....                        | 83  |
| Tabla 11.....   | 84  |
| Criterios de operación.....   | 84  |
| Tabla 12.....   | 87  |
| Descripción de los ajustes de contenidos de la función de protección ANSI 24.....                   | 87  |
| Tabla 13.....   | 87  |
| Limites V/Hz de las normas establecidas .....   | 87  |
| Tabla 14.....   | 89  |
| Esquema y características del uso de la protección de Subtensión .....                              | 89  |
| Tabla 15.....   | 103 |
| Criterios de ajuste de la protección ANSI 51N .....   | 103 |
| Tabla 16.....   | 104 |
| Esquema y características de la protección 81U .....  | 104 |
| Tabla 17.....   | 105 |
| Criterio de ajuste para la protección 81U .....   | 105 |
| Tabla 18.....   | 107 |
| Identificación de las protecciones del diagrama unifilar de la fig. 41 .....                        | 107 |
| Tabla 19.....   | 117 |
| Grupo de transformadores según su potencia.....   | 117 |
| Tabla 20.....   | 118 |
| Sistema de protección asociado a cada grupo de transformador según su potencia.....                 | 118 |
| Tabla 21.....   | 120 |
| Características de la parte frontal del Relé SEL-487E. ....   | 120 |
| Tabla 22.....   | 122 |
| Descripción de la parte trasera del Relé 487E .....   | 122 |
| Tabla 23.....   | 123 |
| Especificaciones técnicas del Relé 487E.....  | 123 |
| Tabla 24.....   | 126 |
| Elementos de protección, para equipos tales como SEL -787-2x / 787-21/ 2E / 3S / 4X<br>.....        | 126 |
| Tabla 25.....   | 126 |
| Elementos de protección, para equipos tales como SEL -787-2x / 787-21/ 2E / 3S / 4X<br>PARTE 2..... | 126 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 26.....   | 129 |
| Ajuste de protección para un Relé 387E .....                  | 129 |
| Tabla 27.....   | 131 |
| Descripción de los LED's del Relé SEL 387A.....               | 131 |
| Tabla 28.....   | 138 |
| Presupuesto económico de Relés diferenciales del mercado..... | 138 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1. Clase de fallas .....  | 45 |
| Ilustración 2. Relés de protección de la marca SEL.....                                     | 58 |
| Ilustración 3. Relés de protección diferencial para transformadores de potencia. ....       | 59 |
| Ilustración 4. Relés de protección para transformadores de la marca SIEMENS.....            | 59 |
| Ilustración 5. Relé MiCOM P64x y sus ventajas .....   | 60 |
| Ilustración 6. Relé de la marca ABB – RET615 .....  | 60 |
| Ilustración 7. Secuencia de la detección de falla en el sistema Eléctrico del sistema.....  | 63 |
| Ilustración 8. Relés de protección que se utilizan en sistemas eléctricos de potencia. .... | 65 |
| Ilustración 9. Protocolos de comunicación.....  | 81 |

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCION Y GENERALIDADES**

### **1.1. Introducción**

En los sistemas eléctricos de potencia, se encuentran componentes o dispositivos primarios tales como; seccionadores de potencia, interruptores de potencia, transformador de potencia, descargadores o supresores, transformadores de instrumentación, seccionadores de fusibles, entre otros elementos importantes de nuestras subestaciones.

Los transformadores son el enlace entre dos niveles de tensión de la red eléctrica, siendo su principal principio la inducción electromagnética y el cual se encuentra en todas las etapas, tales como; la generación, cuya función es elevar el nivel de tensión a niveles de transmisión para reducir las pérdidas eléctricas por transmisión, entre otros, cabe recalcar que dentro de nuestro sistema eléctrico de potencia se encuentran otros dispositivos que también son importantes, es decir que ningún elemento es más o menos importante que el otro, sin embargo, por ser el elemento más grande y costoso se debe implementar una correcta aplicación de protecciones y conocer sus distintos tipos de protecciones.

Debido a esto es indispensable garantizar su correcto funcionamiento ante cualquier falla o en caso de que exista una condición transitoria. Es por esta razón que se han implementado una serie de protecciones para transformadores, en donde cada una de ellas cumplen con diferentes propósitos para la protección de este.

Este trabajo se desarrolla con el objetivo de conocer y estudiar los diferentes tipos de protecciones, incluyendo la protección diferencial, la cual es empleada como protección primaria, ya que esta detecta fallas internas donde si llegase a ocurrir una falla interna en un transformador de potencia podría ocasionar la perdida de continuidad en la transmisión de energía eléctrica y esto ocurre hasta que la falla es liberada o atendida, cabe recalcar que este tipo de protección es normalmente utilizada en transformadores de capacidades mayores a 10 MVA debido a sus altos costos, sin embargo la protección diferencial será investigada con nuevas fuentes e

investigaciones, con el propósito de conocer y de mejorar su mejor desempeño ante las condiciones transitorias tales como lo es la energización del transformador.

## **1.2. Antecedentes**

Para su desarrollo se han tomado como referencia los siguientes trabajos de investigación.

### 1.2.1. Protecciones en líneas eléctricas (Bregante Checa, 2015).

Empleando las palabras de los autores (Bregante Checa, 2015), las líneas de transmisión son la parte más importante de la distribución de energía, debido a que proporcionan, generan y cargan energía, debido a que las líneas de transmisión funcionan a nivel de voltaje desde los 30 kV hasta los 500KV; dicho esto, si no se detecta y se aísla rápidamente, la falla se producirá en cascada, es decir que causaría en el sistema una gran interferencia y estos se verán estrechamente interconectados y funcionando cerca de sus límites, es aquí cuando entran los sistemas de protección, cuyo objetivo es la protección y sobre todo confiabilidad para detectar y aislar las fallas críticas garantizando la seguridad en nuestro sistema y porque no para nuestros usuarios finales.

### 1.2.2. Modelamiento, simulación y sintonización del sistema de protecciones eléctricas de la red de subtransmisión de la provincia de Manabí (Sierra Cruz, 2018).

De acuerdo con (Sierra Cruz, 2018), la modelación del sistema de protecciones eléctricas para una subestación tiene una gran importancia que nos permite salvaguardar la integridad de los elementos constitutivos de una red eléctrica.

Dicho esto, este trabajo de titulación que se encuentra en manos de los autores antes mencionados, muestra una metodología que sirve como guía para la instalación de una correcta sintonización y simulación del sistema de protecciones sobre la red de transmisión, cabe recalcar que en este proyecto se

detalla también la sintonización de los relés de sobre corriente (50/51) el cual se aplica como protección en transformadores de potencia y en generadores, entre otros tipos de relés que utilizan para realizar dicha simulación, relés de los que se hablara a lo largo de esta investigación.

#### 1.2.3. Sistema de Protecciones Eléctricas a nivel de 500KV aplicación subestación PIFO (Richard, 2018).

De acuerdo con las palabras de (Richard, 2018) la demanda energética en nuestro medio, según el gobierno de nuestro país, pretende evitar en un futuro cortes de energía, tratando de reducir costos de la energía y usos de los derivados del petróleo, para satisfacer dicha demanda se han planteado varios proyectos hidroeléctricos, para cumplir con los objetivos y abastecer satisfactoriamente al usuario, por lo cual, este trabajo muestra un estudio sobre las protecciones eléctricas, con características particulares de los relés considerando aspectos de confiabilidad, selectividad etc. y también se hace una reseña de los relés según su evolución y los más utilizados en los sistemas de protección.

#### 1.2.4. Protección Diferencial de Transformadores de Potencia Mediante Técnicas Basadas en la Transformada Wavelet (Sánchez Martos, 2017).

(Sánchez Martos, 2017), plantea el desarrollo de un sistema de protección diferencial para transformadores de potencia, la cual evite el disparo no deseado durante la energización del transformado utilizando la transformada de wavelet, para el desarrollo de esta tesis el autor desarrollo un modelo de relé diferencial completo el cual es sometido a ensayos de comportamiento de diferentes situaciones en funcionamiento del transformador, este proyecto se desarrolló mediante una simulación en la herramienta de trabajo “Simulink”.

#### 1.2.5. Análisis de criterios y filosofía de Protección de Transformadores de Potencia: Aplicación a Transformador 220/132 KV de 150 MVA (Amparo M. , 2016).

(Amparo M. , 2016) presenta por medio de un trabajo de titulación un análisis de implementación de un sistema de protección para transformadores, bajo conceptos de sustitución de una plataforma y un sistema de protección más actual, cuyo objetivo, sería eliminar los posibles errores o falsa operación que se den en la red de alta y baja frecuencia a un nivel mayor de protección.

### **1.3. Justificación**

Dentro de la operación de los sistemas de potencia es imposible de efectuar la operación sin eliminar por completo la posibilidad de ocurrencia de alteraciones, ya sean fallas o de exigencias, provocadas por medio de maniobras o de accidentes mal intencionados, por esto resulta fundamental contar con una adecuada coordinación de aislación en toda la instalación, por medio de un sistema de protecciones que los permita despejar de manera pronta y oportuna todo tipo de circulación de corriente que este causando la destrucción de los equipos del sistema eléctrico de potencia.

Esta investigación se basa en los relés de protección de los transformadores y de su importancia, incluyendo a la protección diferencial, cuyos dispositivos digitales emplean soluciones para evitar tanto fallas internas como fallas externas.

### **1.4. Planteamiento del problema**

En el Ecuador el sector eléctrico se incrementa a diario con la demanda de energía eléctrica, por lo cual es de vital importancia que el servicio de energía eléctrica se mantenga siempre adecuado y funcional sin interrupciones, es por esto que, en él, se aplican las distintas protecciones para un correcto funcionamiento de los transformadores.

Estos equipos se encargan de transformar el voltaje utilizándose como elevador o como reductor de voltaje, cabe recalcar que los transformadores de potencia son elementos muy costosos que generalmente no cuentan con unidad de respaldo, por cuestiones económicas y al existir fallas en estos equipos se constituye un grave problema, pues su reposición no es de manera inmediata, por lo que muchos transformadores son protegidos únicamente por las protecciones internas,

desconociendo las protecciones adicionales, como sobre corriente, alto y bajo voltaje, alta y baja frecuencia, sobre todo la más importante, la protección diferencial, entre otras, de aquí nace la principal problemática de este trabajo de titulación, la cual es investigar acerca de todas las protecciones utilizadas y adecuadas para los transformadores de potencia. Muchos usuarios que disponen de transformadores de potencia (Mayor de 1 MVA), en el sector de la industria moderna no son conscientes o desconocen de esta problemática, más aún se desconoce de los dispositivos de protecciones inteligentes como lo son los relés digitales, los cuales pueden ser implementados actuando con seguridad y selectividad ante las protecciones y ante la falla.

Al final de este proyecto llegar a una conclusión de cuál de todas las protecciones es la más adecuada para dicho elemento.

### **1.5. Hipótesis**

Son necesarias las diferentes protecciones eléctricas mediante usos de dispositivo como relés digitales, para actuar ante problemas de averías internas o externas que pudieran presentarse en los transformadores de potencia aplicados en los sistemas de distribución, evitando daños mayores en los equipos y evitando la interrupción del servicio eléctrico de manera continua.

### **1.6. Objetivo general**

Realizar investigación sobre las protecciones eléctricas que se aplican en los transformadores eléctricos de potencia y que sean adecuados para que este funcione de manera adecuada sin interrupciones.

### **1.7. Metodología de investigación**

Este tipo de investigación utilizara métodos e instrumentos que nos permitirán alcanzar el objetivo de este proyecto de la manera más adecuada.

Sera de las siguientes maneras:

### **1.7.1. Explicativa**

Desde este punto se procede a recolectar información de fuentes importantes, como trabajos de titulación, artículos, libros con temas que estén relacionados directamente a las protecciones eléctricas aplicadas en los transformadores de potencia superiores a 1 MVA poniendo mucho énfasis en la protección diferencial con aplicación de relés inteligentes y todos sus componentes, este tipo de investigación puede usarse de tanto de manera exploratoria como descriptiva.

### **1.7.2. No experimental**

Bajo este concepto no se construirá ni se manipularán variables de forma física, ni económica como de aportaciones y el trabajo de investigación tendrá únicamente datos de fuentes considerables y por su puesto basado en fuentes importantes para su desarrollo. Es decir, no se construirá ningún prototipo para experimentación.

## **CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE**

### **2.1.Marco teórico**

De acuerdo con (Luis, 2015), la continuidad y la calidad de servicios son dos de los requisitos íntimamente ligados a un sistema eléctrico de potencia.

Dentro de un Sistema Eléctrico de potencia se deberán prestar atención de manera obligatoria a los siguientes puntos:

- Seguridad de las personas.
- Fiabilidad de las protecciones.
- Calidad de la energía eléctrica.
- Economía.

Cada SEP deberá contar con:

- **Sistema de supervisión y control (SCADA)**

El cual es un sistema de adquisición de datos y supervisión de las magnitudes eléctricas y de los estados de los equipos, con la finalidad de tomar decisiones preventivas y sus respectivas acciones (Luis, 2015).

- **Sistema de protección**

El cual es un sistema de supervisión de las magnitudes eléctricas que permite detectar fallas en los equipos o en las instalaciones en condiciones anormales de operación del sistema y el estado inapropiado de los equipos, con la finalidad de tomar acciones correctivas y sobre todo de manera inmediata y eficaz (Luis, 2015).

- **Sistema de registro de perturbaciones**

Este sistema permite la recopilación de información de las magnitudes eléctricas del sistema, de esta manera se pueden analizar dichas perturbaciones con la finalidad estudiar las causas que originaron el defecto, así como la posible necesidad de acciones preventivas y/o correctivas al objeto de minimizar el impacto de estas sobre la vida útil de los distintos equipos (Luis, 2015).

- **Sistema de medición de la energía.**

Este sistema sirve para la recopilación de información de las magnitudes eléctricas del sistema, relativas a las potencias y energías entregadas en determinados puntos del sistema con fines comerciales o estadísticos (Luis, 2015).

Sin embargo, en este proyecto de investigación nuestro enfoque es hacia las protecciones de los transformadores de potencia, debido a que estos son uno de los componentes más importantes del Sistema Eléctrico, ya sean asociados tanto en sistemas de transmisión o en los sistemas de distribución, si necesitamos elevar tensión, existen subestaciones de elevación y si tenemos que reducir tensión tendremos subestaciones de distribución, es por esto que el transformador juega un papel muy importante dentro de la transmisión de energía eléctrica, por lo tanto deben estar correctamente protegidos ante fallas que se puedan presentar, ya sean externas o internas.

Por esta razón es importante conocer las protecciones que se utilizan en la respectiva protección de los transformadores de potencia, específicamente la protección diferencial, ya que es la más utilizada en la actualidad en subestaciones, debido a que su principio de funcionamiento se basa en la diferencia de corriente que se presenta en la entrada respecto de la salida del transformador y este sistema de protección no solo protege al transformador de fallas internas, también lo protege de otros tipos de falla.

## 2.2.Transformadores de potencia

Los transformadores de potencia son elementos que tienen como misión transmitir energía, mediante un campo electromagnético alterno, con una determinada tensión, a otro sistema, con la tensión que se espera. Es así como estos elementos ganan concreción y en términos ideales y útiles, para finalmente añadir la función de esta máquina la cual consiste en transformar energía o potencia, es decir que alteran sus factores según su relación. (Ras, 7ma edición).

## 2.3.Partes de un transformador de potencia

Las partes principales de un transformador de potencia se detallan en la figura 1.

**Figura 1**  
*Partes de un transformador de potencia convencional*



Nota: En la fig. 1 Mostramos las partes de un transformador de potencia. Tomado de (energeticaHoy, 2018).

**Tabla 1.**  
**Partes de un transformador de potencia convencional**

| N° | Detalle                  | N° |   |
|----|--------------------------|----|---|
| 1  | Tanque del Transformador | 7  | Terminal del Sistema de Puesta a Tierra |

|   |                                 |    |  |
|---|---------------------------------|----|--|
| 2 | Bushing de Alto Voltaje         | 8  | Válvula de Drenaje                           |
| 3 | Bushing de Bajo Voltaje         | 9  | Deshidratación y Respiradero (No Mostrado).  |
| 4 | Aletas de Enfriamiento/Radiador | 10 | Temperatura del Aceite/Manómetro.            |
| 5 | Ventiladores de Enfriamiento    | 11 | Bushing de los Transformadores de Corriente. |
| 6 | Tanque Conservador.             | 12 | Panel de Control.                            |

Nota: En la tabla 1 se detalla mediante enumeraciones las partes de un transformador de potencia haciendo referencia de la figura 1. Recuperado de (energeticaHoy, 2018).

### 2.3.1. Accesorios

- Boquillas.
- Cambiador de tomas.
- Radiadores.
- Moto ventiladores.
- Termómetros, indicadores de nivel, relé BUCHHOLZ, válvula de alivio de presión, relé de presión súbita, respiradores de aire, etc.
- Transformador de corriente de boquilla.
- Descargadores de sobretensión.
- Panel de mando, control y protecciones
- Sensores y monitoreo.

## 2.4. Tipo de transformadores de potencia

Los transformadores de potencia se utilizan en las subestaciones o en transformaciones de media y alto voltaje, este tipo de transformadores se construyen en base a normativas estandarizadas según su potencia, voltajes, frecuencias ya que estos son aplicados en centrales generadoras, subestaciones, entre otros usuarios de grandes potencias.

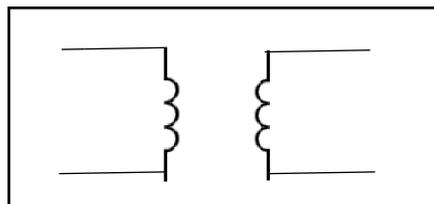
Sin embargo, los transformadores pueden clasificarse en diferentes tipos dependiendo del uso o funcionamiento que se le vayan a dar los cuales son:

### 2.4.1. Por el tipo de núcleo

#### 2.4.1.1. Transformadores de potencia de núcleo de aire

Este tipo de transformadores de potencia, usan plástico o aire como núcleo, el aire de estos tiene muy baja permeabilidad magnética, es decir que no existe el flujo entre las bobinas que normalmente se encuentran unidas a través del aire. Sin embargo, la ausencia del núcleo reduce las pérdidas del núcleo ya que estas pérdidas aumentan dependiendo de la frecuencia, aunque el núcleo ferromagnético cuenta con sus desventajas, una de ellas es que este tipo de núcleo también causa distorsión de la señal de alta frecuencia, por ende, el transformador con núcleo de aire es el más adecuado para la corriente de radiofrecuencia, otra ventaja de este es que son livianos y adecuados para dispositivos eléctricos móviles (ElectroMundo, 2020).

**Figura 2.**  
**Simbología de transformador de núcleo de aire.**

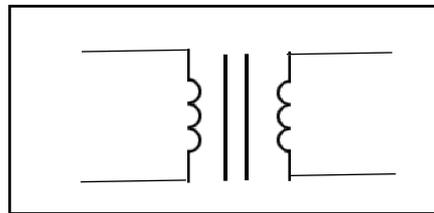


Nota: esta figura representa al transformador de núcleo de aire.  
Tomado de (*Simbolos Electricos y Electronicos*, 2021).

### 2.4.1.2. Transformador Ferromagnético / núcleo de hierro

El material del núcleo de este transformador es ferromagnético, este tipo de núcleo se utiliza para aumentar su campo magnético, este campo magnético depende de la permeabilidad magnética del material utilizado, los tipos de transformadores de potencia con núcleo de hierro se utilizan para aplicaciones de carga pesada que tienen baja frecuencia, como fuentes de alimentación. El núcleo de hierro incluye sus pérdidas de núcleo dependientes de la frecuencia, como la corriente de Foucault y las pérdidas por histéresis. (ElectroMundo, 2020).

**Figura 3.**  
***Simbología de transformador de núcleo de aire***



Nota: esta figura representa al transformador de núcleo de aire.

Tomado de (Símbolos Electricos v Electronicos, 2021).

### 2.4.2. Por el tipo de enfriamiento

Este tipo de método es muy fundamental, debido a que el sobrecalentamiento provoca desgaste en sus componentes mecánicas, estos sistemas de enfriamiento de los transformadores de potencia se dividen en dos categorías principales (Coursehero, 2020):

- Enfriamiento por aire.
- Enfriamiento por inmersión en aceite.

Sin embargo, cada una de estas dos categorías se dividen en otras dos ramas, las cuales son circulación natural o forzada. (Coursehero, 2020). A continuación, para su mayor facilidad de estudio podremos apreciar la tabla 2 que habla de cada una de las subdivisiones que este tipo de enfriamiento contiene:

**Tabla 2.**  
**Tipos de enfriamiento de los transformadores de potencia**

|                                      | Tipo  | Descripción  |
|--------------------------------------|-------|--|
| Enfriamiento por aire                | AN    | Este proceso se debe a un proceso natural de convección, es decir que el aire caliente es reemplazado por el aire frío del ambiente                      |
|                                      | AF    | Este proceso sucede cuando aumenta la temperatura y se encienden abanicos para iniciar la disipación de calor.   |
| Enfriamiento por inmersión en aceite | ONAN  | Este evento disipa el calor por medio de la circulación natural del aire.  |
|                                      | ONAF  | Incrementa la temperatura del aceite y se encienden los abanicos para enfriarlos.  |
|                                      | OFAF  | Este método de enfriamiento hace que un intercambio de calor mediante el uso de una bomba para la circulación de aceite caliente y abanicos para el aire |
|                                      | OFWFS | Se utiliza mediante la instalación de un intercambiador de calor, para que circule el aceite y el agua   |

Nota: esta tabla representa sus dos clases de enfriamiento, sus tipos y su descripción.

Recuperado de (Coursehero, 2020).

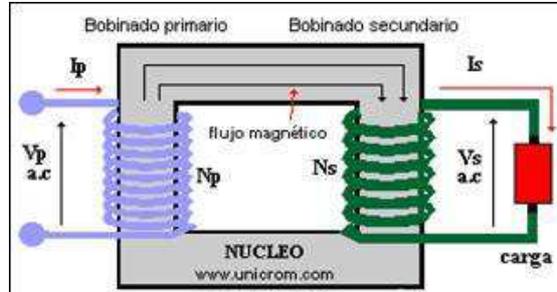
### **2.4.3. Por el número de fase**

#### **2.4.3.1. Transformadores Monofásicos**

Un transformador monofásico tiene la ventaja de una larga vida útil siempre y cuando se utilicen en condiciones normales, este tipo de transformadores por lo general se utilizan en poste, ya que son utilizados para bajas tensiones, en caso de que se requieran altas potencias, se utilizaría un banco de

transformadores monofásicos para así elevar sus potencias y transformarlo finalmente en un banco trifásico (Lino, 2017).

**Figura 4.**  
**Núcleo de un transformador monofásico**



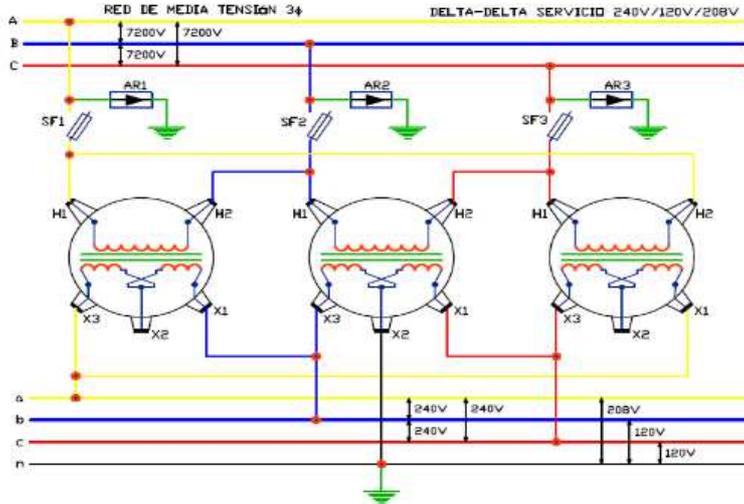
Nota: La figura 4 nos muestra el núcleo del transformador convencional  
Tomado de: (Faradayos , 2020).

#### 2.4.3.2. Transformadores Trifásicos

Los transformadores trifásicos son los más utilizados en fábricas o industrias ya que son los que normalmente producen menos pérdidas, frente a cargas asimétricas y armónicos, este tipo de transformador tiene un rendimiento aceptable, lo cual es muy deseable por los consumidores principalmente para las redes de distribución de energía eléctrica (Noberto A., 2015).

Otra de las ventajas que este elemento tiene para las líneas de distribución y de transmisión son los temas de costos, tamaños y transporte, sin embargo, cuando se requieren potencias muy grandes, por ejemplo, cientos de MVA, o en centrales eléctricas se necesite cierta cantidad de máquinas de grandes potencias es cuando se utilizan bancos trifásicos los cuales están normalmente armados por tres transformadores monofásicos (Electronica, 2021).

**Figura 5.**  
**Banco trifásico con conexión delta-delta**



Nota: En la figura 5 observamos las conexiones de los transformadores trifásico con conexión delta-delta. Tomado de: (Faradayos , 2020)

#### 2.4.4. Por su localización

##### 2.4.4.1. Interior

Un transformador que se utilice para el interior tiene como características una tensión de dos fases y los terminales de tierra a su plena tensión de aislamiento es un transformador seco aislado en resina (Mario H., 2015).

##### 2.4.4.2. Intemperie

Este tipo de condición de los transformadores quiere decir que estos están exclusivamente construidos para resistir la humedad, polvo, incluso lluvias, entre otras (Mario H., 2015).

#### 2.4.5. Por su capacidad

Cuando hablamos de capacidad de transformación, nos referimos a cuantos KVA o MVA soporta un transformador, en este caso cuando hablamos de

potencia hablaremos de 500 KVA y mayores potencias, mientras que cuando hablamos de sistemas de distribución sus valores son de menos 500KVA (Mario H., 2015).

#### **2.4.6. Por su aplicación**

Transformadores por su aplicación o transformador elevador o reductor de tensión, estos se usan en subestaciones para permitir el transporte de energía eléctrica con la finalidad de reducir pérdidas, sin embargo, debido a las resistencias de los conductores, conviene transportar la energía eléctrica a tensiones más elevadas sin olvidar que se deben reducir las tensiones para que estas puedan ser adaptadas a las tensiones de normalización (Lino, 2017).

Ente estos tipos de aplicación tenemos los siguientes (Electronica, 2021):

- Relevadores.
- Elevadores.
- Reductor.
- De instrumento.
- De tierra.

#### **2.4.7. Por su conexión**

Dentro de las conexiones más utilizadas por los transformadores de potencia son (Electronica, 2021):

- Delta – estrella.
- Estrella – estrella.
- Estrella – estrella – delta.
- Delta – delta.
- Zig – zag (estrella rota).
- Estrella – delta.

## 2.5. Niveles de voltaje de los transformadores de potencia.

Dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia el control de voltaje es una labor operativa la cual tiene como objetivo principal conservar los cuatro niveles de voltaje principales dentro de los intervalos definidos como valor nominal y así proporcionar un flujo de potencia adecuado. De esta manera satisfacer correctamente la demanda de potencia reactiva y realizar un elevado transporte de potencia activa. (Adriana, 2019).

En cuanto a los transformadores de potencia, podemos destacar que son equipos que ofrecen una alta resistencia en ambientes de condiciones extremas y de trabajo pesado, que son equipos que proveen operaciones seguras en cuanto a interconexiones de otros equipos, pueden operar dependiendo el tipo de enfriamiento seleccionado (OA o FA) y por ultimo y no menos importante, ofrece versatilidad de conexión en estructuras tipo H, como por ejemplo instalaciones a nivel de piso o con líneas eléctricas subterráneas, es por esto que a continuación se mostraran los niveles de voltajes más utilizados en la comercialización del mismo.

**Tabla 3.**  
**Niveles de voltaje y su relación de transformación.**

| Capacidad (KVA) | Voltaje primario | Voltaje Secundario |
|-----------------|------------------|--------------------|
| 225             | 4160             | 220/127            |
| 300             | 13200            | 440/254            |
| 500             | 13800            | 460/266            |
| 750             | 22860            | 480/277            |
| 1000            | 23000            | 4160/2402          |
| 1250            | 33000            | Etc.               |
| 1500            | 34500            |                    |
| 2000            | Etc.             |                    |
| 2500            |                  |                    |
| 3000            |                  |                    |
| Entre otros     |                  |                    |

Nota: en esta tabla se muestran los niveles de voltaje y su relación de transformación de los transformadores de potencia según sus KVA. Recuperado de (RTE, 2021).

## 2.6. Tipo de conexiones de los transformadores de potencia.

A continuación, se estudiarán las conexiones más comunes de los devanados primarios y secundario de los transformadores de potencia, tomando en cuenta que existen numerosos tipos de conexión, pero se han tomado en cuenta únicamente los más importantes para el sistema.

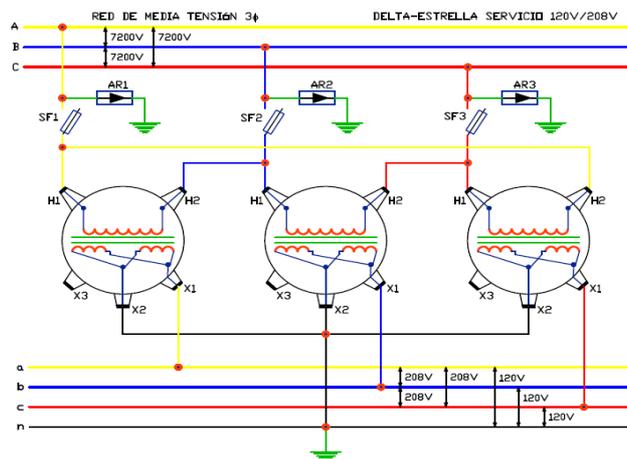
### 2.6.1. Delta – estrella

Este tipo de conexión tiene ventajas similares a las de la conexión estrella – delta en cuanto al desplazamiento de fases, este se tipo de conexión es comúnmente utilizado en transformadores elevadores en las redes de alta tensión (Rivera, 2015).

La conexión delta – estrella permite acoplar tanto cargas monofásicas como trifásicas debido que al conectar cargas monofásicas este produce desequilibrios los cuales son compensados por el primario (Rivera, 2015).

Figura 6.

#### Conexión delta – estrella



Nota: En la figura 6 observamos las conexiones de los transformadores trifásico con conexión delta-Estrella. Tomado de: (Faradayos , 2020)

La conexión delta – estrella de la fig. 6 explica que existe un banco de transformadores, el cual delta está conectada en el primario y en la conexión Y está conectado el secundario (Faradayos , 2020).

De acuerdo con las fórmulas expresadas por el autor (Faradayos , 2020)

El voltaje del primario será igual al voltaje de la línea Ecuación 1

$$V_f = V_L \quad (1)$$

Y la corriente de línea es 1,73 veces la corriente entre fase Ecuación 2

$$I_L = \sqrt{3} * V_f \quad (2)$$

Mientras que, para el secundario, su voltaje de línea será 1.73 veces el de fase ecuación 3 y para la corriente de línea esta será igual a la corriente de fase ecuación 4.

$$V_L = \sqrt{3} * V_f \quad (3)$$

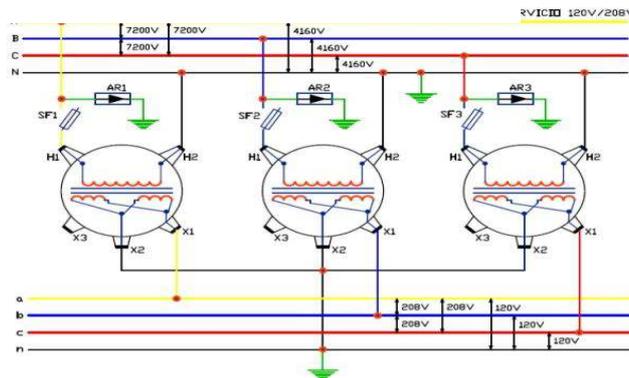
$$I_f = I_L \quad (4)$$

Este tipo de conexiones es normalmente utilizado para sistemas de 4 hilos es decir tres hilos de potenciales, los cuales están identificados por (a, b y c) y el cuarto hilo es el neutro, quien permite tener un voltaje más equilibrado, aunque la corriente de carga ya este desequilibrado (Faradayos , 2020).

### **2.6.2. Estrella – Estrella**

Este tipo de conexión tiene como ventaja disminuir la tensión por fase del transformador, sin embargo, presenta inconvenientes cuando las cargas no están equilibradas, para solucionar estos inconvenientes se dispone de un arrollamiento terciario el cual está conectado en triangulo y cerrado en cortocircuito sobre sí mismo (Carlos C. , s.f.).

**Figura 7.**  
**Conexión Estrella – Estrella**



Nota: En la figura 7 observamos las conexiones de los transformadores trifásico con conexión Estrella-Estrella. Tomado de (Faradayos , 2020).

Debido a estas sobrecargas los devanados primarios y secundarios se compensan en cada columna, desapareciendo los inconvenientes que resultaban de las cargas desequilibradas (Carlos C. , s.f.).

Por otro lado, el devanado terciario puede utilizarse para suministrar cargas locales con la tensión más adecuada para el transformador y a su vez alimenta a los circuitos de control y las instalaciones auxiliares (Carlos C. , s.f.).

La conexión estrella – estrella, por lo general se utiliza cuando el neutro del primario puede fácilmente unirse al neutro de la fuente a través de la tierra, en caso de que los neutros no estén unidos, tensión entre línea y neutro se verá no senoidal, con lo cual puede emplearse la conexión estrella – estrella sin unir los neutros, siempre y cuando cada transformador cuente con el devanado terciario del mismo, este a su vez, se conectaría en delta para alimentar los servicios de subestaciones en las que se encuentran instalados los transformadores (Faradayos , 2020).

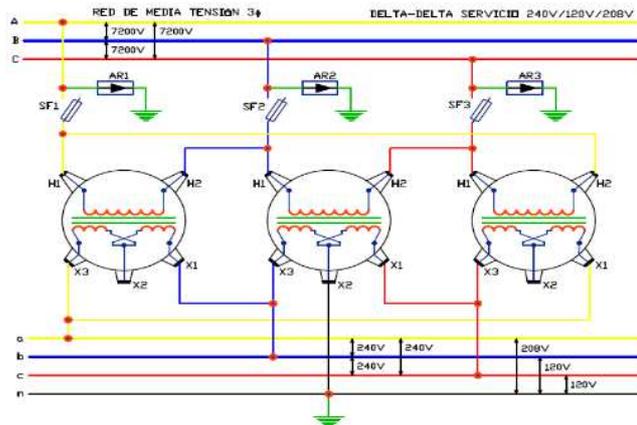
### 2.6.3. Delta – delta

Esta conexión también se la conoce como triángulo – triángulo y la relación de voltajes entre primario y secundario la cual viene dada por la siguiente Ecuación 5:

$$\frac{V_{LP}}{V_{SP}} = \frac{V_{OP}}{V_{OS}} \quad (5)$$

Este tipo de conexiones se utiliza normalmente en autotransformadores cuando se necesita recuperar la caída de tensión que ocurre por longitud de los alimentadores y de alguna manera recuperar las pérdidas. (Pablo, 2013).

**Figura 8.**  
**Conexión delta-delta**



Nota: En la figura observamos las conexiones de los transformadores trifásico con Conexión delta – delta. Tomado de (Faradayos , 2020)

De este tipo de conexión podemos destacar algunas de sus ventajas y desventajas (Faradayos , 2020):

### Ventajas

- No tiene desplazamiento de fase.
- No tiene problemas con cargas desequilibradas o armónicas.
- Los desequilibrios se reparten por las cargas en el secundario se reparten igualmente entre las fases del primario, evitando desequilibrios de flujos magnéticos.

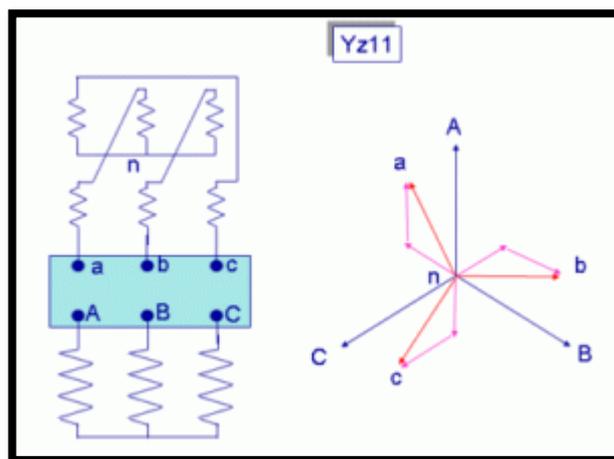
## Desventajas

- Cada bobinado debe soportar la tensión de red, con el consiguiente aumento del número de espiras.
- Los voltajes de terceros armónicos pueden ser muy grandes.
- Cuando este tipo de conexión opera en altas tensiones de línea, sus cosos de bobinados son mayores.

### 2.6.4. Zigzag

Este tipo de conexión solo se emplean en el lado de menor tensión, el cual consiste en subdividir en partes iguales los devanados secundarios, es decir una parte se conecta en estrella y luego cada rama se une en serie con las bobinas invertidas de las fases adyacentes en orden cíclico (Diego, 2007).

Figura 9.  
Conexión zigzag.



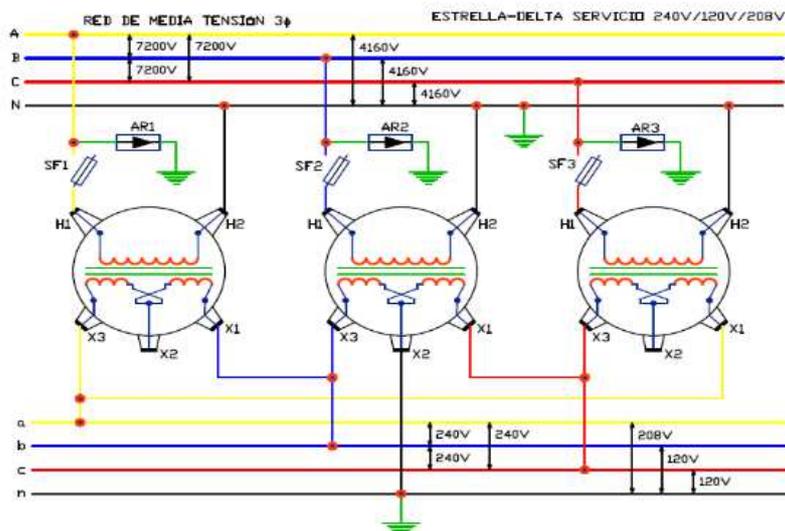
Nota: conexiones de los transformadores trifásico con Conexión Zigzag.  
Tomado de (Diego, 2007).

Una de las ventajas se comporta de manera correcta frente a desequilibrios de cargas, es decir que las tensiones del secundario se requieren un 15% más espiras que una conexión en estrella convencional, dentro de las aplicaciones que existen en este tipo de conexión están los transformadores de red donde la carga que está en el neutro es igual a la carga nominal y tiene una potencia limitada a en 400 KVA. (Diego, 2007).

### 2.6.5. Estrella – delta

Este tipo de conexión por lo general se utiliza en sistemas de alto voltaje para solucionar los problemas de armónicos debido a que la corriente circulante se genera en el secundario, es decir que al permanecer a la conexión delta en el secundario no se desequilibra con cargas desequilibradas. A pesar de las ventajas este tipo de conexión tiene inconvenientes al conectar en paralelo a los secundarios de los transformadores, esto se debe a que ellos están desfasados en  $30^\circ$  y el secundario respecto al primario (Victor, 2010).

**Figura 10.**  
**Conexión Delta - Estrella**



Nota: Conexiones de los transformadores trifásico Conexión delta – estrella.

Tomado de: (Faradayos , 2020)

Este diagrama se trata de un banco de transformadores conectado en estrella en el primario y en delta en el secundario siendo sus conexiones similares al tipo de conexión estrella – delta, este tipo de conexiones pueden manejar grandes cargas desequilibradas, por lo general este tipo de conexión se utiliza normalmente para la reducción de tensión en los sistemas de transmisión (Faradayos , 2020).

## 2.7. Costos y otros factores a considerar

A continuación, se detallará lo que sucedería en el caso de que ocurra alguna avería en el transformador de potencia (Adriana, 2019).

- Costo de reparación de daños.
- Costo de producción o pérdida.
- Efectos adversos sobre el equilibrio del sistema.
- El periodo de indisponibilidad del equipo dañado.

## 2.8. Clase de fallas en los Sistemas Eléctricos de Potencia

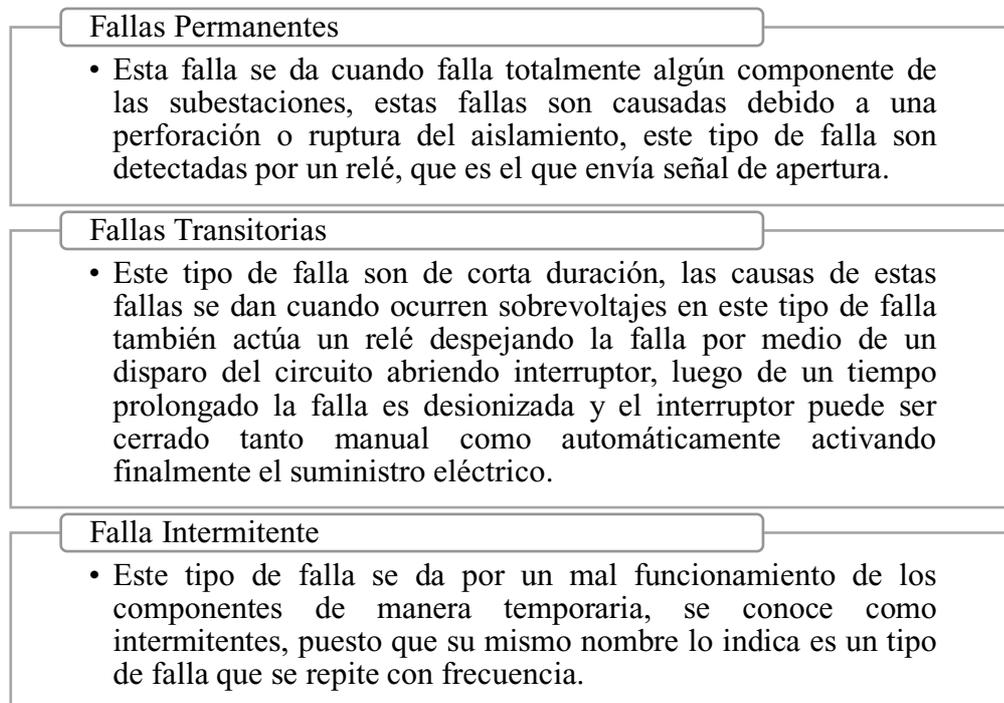


Ilustración 1. Clase de fallas  
Fuente: (Villalaz, 2015)

## 2.9. Fallas eventuales que ocurren en los sistemas eléctricos de potencia

Dentro del sistema eléctrico de potencia encontramos un conjunto de elementos, los cuales permiten la interconexión de grandes centros de generación, lo que significa que permite transmitir grandes cantidades de potencia a niveles elevados de consumo. Sin embargo, existen fallas y a estas las llamamos eventos que

interfieren con el flujo normal de corriente, la mayoría de los fallos son ocasionados por descargas atmosféricas y por otros tipos de fallas eventuales, como por ejemplo pájaros, ramas de árboles, fallas humanas, averías en pararrayos o en aisladores entre otras (Villalaz, 2015).

De acuerdo con (Hjauer, 2015), dentro del sistema eléctrico encontramos diversos tipos o características de fallas ocasionando desbalance en el sistema.

A continuación, se enumerarán los regímenes anormales tomando en cuenta que este tipo de fenómenos puede aparecer en los transformadores dependiendo del tipo y características de el mismo.

Entre estos sucesos anormales encontramos:

- Sobrecargas simétricas y asimétricas.
  - ✓ Falla trifásica.
  - ✓ Fallas de línea a línea.
  - ✓ Fallas de línea a línea a tierra.
- Sobreexcitación.
- Sobretensiones electromagnéticas.
- Problemas con el aceite.
- Fallas externas.
- Fallas internas.

(Hjauer, 2015)

### **2.9.1. Sobrecargas simétricas y asimétricas**

Desde el punto de vista matemático este método, se basa en el teorema de Fortescue, el cual analiza fallas en los sistemas trifásicos de tipo simétricos y también puede solucionar problemas donde las condiciones sean asimétricas (Illustrationprize, 2020).

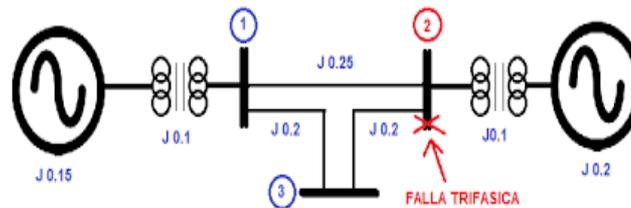
Este tipo simétrico habla de que las corrientes de las tres fases del sistema son iguales en el instante del cortocircuito, a este tipo de falla también se lo conoce como cortocircuitos balanceados. Mientras que a las fallas asimétricas se las conoce como desbalanceadas. Sin embargo, la falla asimétrica, ocurre cuando la corriente que fluye tiene dos componentes, un componente de corriente alterna y un componente de corriente directa, igual que lo que sucede con los circuitos RL, de esta manera el valor máximo de este tipo de falla ocurre a partir del medio ciclo desde el instante en el que se da el cortocircuito (Illustrationprize, 2020).

Estas se dividen en los siguientes tipos de fallas, ya sean asimétricas o simétricas (Villalaz, 2015).

### 2.9.1.1.Falla trifásica

Este tipo de falla es la que menos probabilidades tiene de suceder, pero, aun así, si este tipo de falla sucediera tendría los valores más altos dentro de una corriente de cortocircuito. (Aguas, 2011).

Figura 11.  
Diagrama falla Trifásica

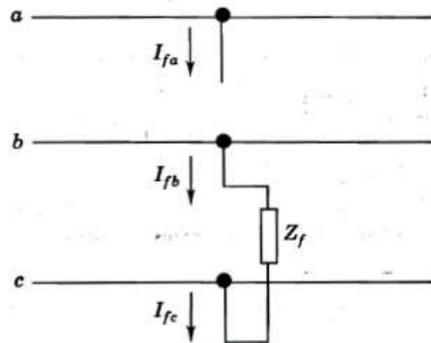


Nota: Diagrama falla Trifásica. Tomado de (Curso Tesla, s.f.)

### 2.9.1.2.Falla línea a línea

Este tipo de falla es el más parecido a la falla antes mencionada, sin embargo, este suele ser el 0.87 más que el de la falla trifásica (Aguas, 2011).

**Figura 12.**  
**Falla línea a línea**

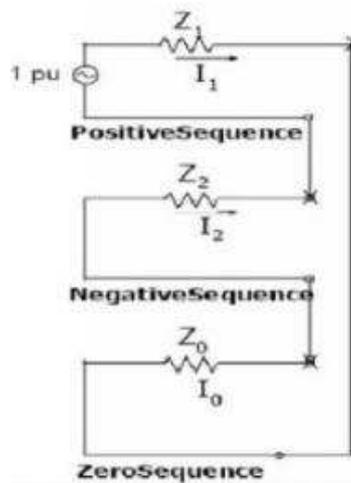


Nota: Falla línea a línea. Tomado de (*Potencia Literaria, 2015*)

### 2.9.1.3. Falla línea a tierra

Finalmente nos encontramos con la falla línea a línea a tierra la cual suele ser similar a la falla línea a tierra debido a que esta tiene un segundo conductor, este tipo de falla es normalmente el doble que una falla trifásica, sin embargo, la falla línea a tierra es la más común en suceder, pero esta es la menos dañina o perturbadora del sistema. (Alberto G. , 2014).

**Figura 13.**  
**Falla de línea a tierra**



Nota: Falla de línea a tierra. Tomado: (*Jorge, 2011*).

### **2.9.2. Sobreexcitación**

Según (Alberto G. , 2014) Este tipo de falla que ocurre en un transformador de potencia se da debido a la cantidad de flujo por el núcleo de un transformador el cual es limitado por su tamaño y por las características de su material, la sobreexcitación en un transformador puede provocar varios fenómenos los cuales son:

- Contaminación de armónicos.

Este primer punto es el que debido a su nivel de contaminación en el que estamos cada día viviendo es el más recurrente, debido a que se está presentando en los consumidores de electrodomésticos, lámparas ahorradores etc. Siendo insertadas en el consumo diario (Orlys T. , PDF).

- Sobre voltajes y Baja frecuencia

Estas causas no se dan generalmente en las subestaciones, más bien se encuentran en plantas generadoras y suceden cuando el generador esta fuera de línea en el proceso de sincronización (Orlys T. , PDF).

### **2.9.3. Sobre tensiones electromagnéticas**

Este tipo en cambio afecta directamente todo el interior del transformador, en consecuencia, de estos daños, se dan cortocircuitos entre espiras o entre fases y tierra tanto en el primario como en el secundario del transformador, sin embargo, al igual que las fallas anteriores existen causas que provocan este tipo de fallas tales como (Villalaz, 2015):

- Reducción súbita de la carga.
- Exceso de reactivo capacitivo.
- Efecto Ferranti.
- Resonancia y Ferro resonancia.

Estas causas provocarían sobretensiones desde 1.05 hasta 10 veces su corriente nominal y cabe recalcar que cualquier sobretensión que supere los 1.2 de corriente nominal se convierte en una sobretensión altamente peligrosa para los transformadores de potencia (Orlys T. , PDF).

#### **2.9.4. Problemas con el aceite**

De acuerdo con (Orlys T. , PDF), los problemas con el aceite del transformador son muy poco probables, su efecto es producir orificios al tanque y provocaría una oxidación muy grande en el metal que lo conforma. Sin embargo, al ocurrir esta falla se disminuyen los niveles de aceite y se reduce tanto la capacidad de refrigeración como la capacidad de aislamiento.

#### **2.9.5. Cortocircuito entre espiras de un devanado**

Entre los tipos de fallas más difíciles de detectar en un transformador se encuentran los problemas entre espiras, sin embargo, es el más común de todas las fallas.

Esta falla se da cuando ocurre un deterioro en el aislamiento del conductor, el cual es producido por estrés térmico o dieléctrico limitando así el aumento de la corriente primaria. Este pequeño defecto se comporta como un devanado secundario y es el aislamiento de una corriente limitada únicamente por su propia impedancia y la resistencia en su punto de falla. Sin embargo, cuando se trata de corrientes altas, el aumento de corriente local conducirá el deterioro de las demás espiras provocando así que la falla se extienda aún más.

### **2.10. Causas de las fallas en los sistemas eléctricos de potencia**

Dentro de las causas más comunes en los sistemas eléctricos de potencia encontramos los siguientes:

- **Perdida del aislamiento**

La falla de aislamiento resulta en corrientes de falla o corrientes de cortocircuito, es decir que estos se pueden encontrar en valores de 10 a 30 veces de su corriente nominal. Normalmente la corriente de falla decrece desde las fallas ocasionadas, es decir, desde la falla trifásica, luego a la falla línea – línea a tierra, línea – línea y finalmente línea a tierra.

- **Envejecimiento del aislamiento**

Este tipo de falla puede causar interrupciones de voltajes, pero con frecuencias normales.

- **Causas externas**

Este tipo de fallas, pueden ser ocasionadas, por ramas de árboles, aves, roedores entre otros o también juntando dos conductores energizados a tierra.

## **2.11. Proceso Transitorios en los Sistemas Eléctricos de Potencia**

El proceso transitorio o régimen normal es toda variación que posean los parámetros eléctricos y que los alejen de sus valores normales establecidos puedan o no regresar o aproximarse después al valor deseado.

Esto quiere decir que los valores de corrientes pueden aumentar bruscamente y las tensiones pueden disminuir ligeramente, lo cual pueden confundir a las protecciones eléctricas y hacer que operen de forma incorrecta desconectando los circuitos sin que existan averías.

Esto sucede en el funcionamiento de los siguientes parámetros eléctricos como:

- Tensiones.
- Corrientes.
- Potencias.
- Frecuencias.

Los cuales varían constantemente, tomando en cuenta que cada uno de estos parámetros tienden a desviarse a los valores establecidos pero estos cambios son lo suficientemente pequeños los cuales se consideran como magnitudes constantes.

Dichos regímenes provocan en ocasiones desconexiones de las protecciones, debido a los niveles que alcanzan las corrientes durante su ocurrencia, es así que le damos paso a:

- La corriente de inrush.
- La corriente de carga fría.

### **2.11.1. Corriente de inrush**

La corriente de inrush es un evento transitorio, como ya se dijo anteriormente, es decir que este tipo de corriente puede generar una operación indebida en los sistemas de protección asociados al transformador, poniendo en riesgo la vida útil del mismo y perjudicando la calidad de servicio para el consumidor la cual podría generar efectos secundarios, tales como:

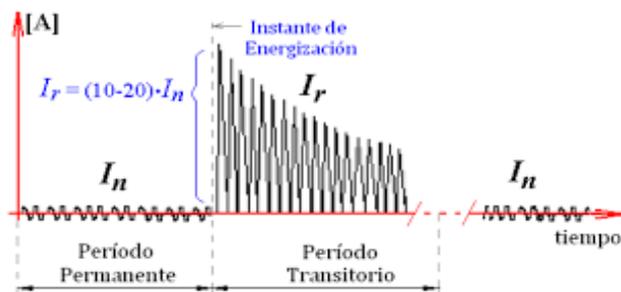
- Huecos de tensión temporarios en los SEP.
- Radio interferencias.
- Sobretensiones debido a fenómenos de resonancia de armónicos.
- Elevados calentamientos en el bobinado debido a las fuerzas magnéticas inducidas.

Cabe recalcar que la corriente de Inrush es una corriente que aparece únicamente en el lado primario del transformador y solo durante un corto periodo durante la energización.

Los flujos instantáneos pueden alcanzar valores de hasta 2.5 veces su valor máximo, provocando la circulación de corriente con valores máximos de hasta 10 veces su corriente nominal.

Sin embargo, la corriente transitoria es amortiguada debido a las resistencias del mismo, dada la relación R/L al cabo de unos ciclos y rápidamente esta comienza a disminuir hasta alcanzar los valores de corriente de vacío o según se encuentre operando el transformador de potencia.

**Figura 14.**  
**Corriente de Inrush.**



Nota: Grafico demostrativo de la corriente de inrush. Tomado de (M. O. Oliveira, 2012).

En la figura 14 analizamos que la corriente de Inrush no siempre tiene el mismo valor inicial elevado, uno de los factores que provoca dicha variación sobre la corriente inicial del inrush, es el ángulo de la tensión en el momento de la energización, por ejemplo, en ángulos de 0 grados las corrientes alcanzan valores positivos elevados, mientras que para ángulos de 120 grados, no ocurre ningún incremento en la corriente, lo mismo ocurre para ángulos mayores de 180 grados donde las corrientes o los picos de inrush son negativos.

Otro factor que podría provocar la corriente de inrush, es la tensión, se dice que, si la corriente de inrush es menor a menor tensión, los transformadores que se encuentren más alejados en las redes, donde la tensión es mucho menor, tendrán un inrush de menor magnitud.

Otra de las causas o factores que podrían provocar una corriente de inrush son:

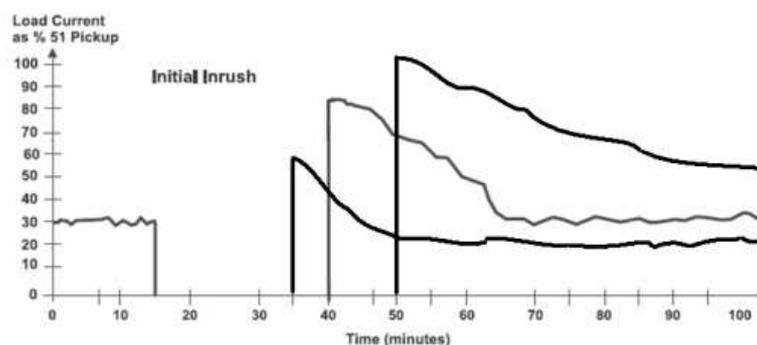
- Energización del transformador.
- Conexión de otro transformador en paralelo, lo cual se considera como un inrush por simpatía.
- Recuperación de la tensión luego de un cortocircuito en el primario, o más conocido como inrush por recuperación.
- Cuando es conectado un generador fuera de paso o fuera de sincronismo en un bloque de generador-transformador.

Finalmente podemos concluir con que el inrush es un fenómeno como su mismo nombre lo indica, transitorio y aleatorio es decir que este puede ocurrir, como puede no ocurrir.

### 2.11.2. Corrientes de carga fría.

Estas grandes corrientes que aparecen al momento de energizar un alimentador que tenía mucho tiempo de estar desconectado, la cual es conocida también como “pico de carga fría”.

**Figura 15.**  
**Gráfico de pico de carga fría con respecto al tiempo de desconexión.**



Nota: La siguiente figura muestra el Gráfico de pico de carga fría con respecto al tiempo de desconexión. Recuperado del documento pdf (*Leon I. G., REGIMENES NORMALES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION*).

## 2.12. Fallas más comunes en los transformadores de potencia

### 2.12.1. Falla del núcleo

Cuando el aislamiento del núcleo se vuelve defectuoso, el calentamiento resultante puede alcanzar una magnitud suficiente para dañar el devanado.

La pérdida del núcleo adicional, causando graves calentamiento local, este es un transformador inmerso en aceite, calentamiento de núcleo suficiente para causar daños en el aislamiento del bobinado lo cual también causara la descomposición de parte del petróleo con una evolución de gas que lo acompaña, este gas se escapara al conservador y se utiliza para operar un relé mecánico.

**Figura 16.**  
**Núcleo del transformador de potencia**



Nota: En la figura 16 podemos observar el núcleo de un transformador de potencia desde una subestación. Tomado de (TECSA, 2020).

### 2.12.2. Falla del tanque

El tanque tiene como función contener el aceite, el cual es usado para el aislamiento y refrigeración del transformador.

Este tipo de falla se da cuando existe algún tipo de estrés ambiental, humedad alta o radiación solar, ocasionando daños en el transformador, tales como grietas o filtraciones en las paredes del tanque lo cual provocara escases de aceite.

Este tipo de falla tiene como consecuencia, la reducción del aislamiento en el transformador y daños en los devanados y el sobrecalentamiento, provocando daños a diferentes partes del transformador.

**Figura 17.**  
**Tanques del transformador de potencia**



Nota: En la figura 17 se observan los tanques de un transformador de potencia de una subestación. Tomado de (Dreamstime, 2021).

### **2.12.3. Falla en el sistema de protección**

El sistema de protección de un transformador es resguardar al transformador ante cualquier falla y detectarla y resolverla lo más rápido posible, en el caso de que no sea posible aislar la falla, entonces esta la aísla evitando daños mayores.

Entre sus componentes de protección propia del transformador encontramos:

- Relé buchholz.
- Válvula de alivio de presión.
- Protección contra sobrecargas y el relé de presión súbita.

### **2.12.4. Falla en el sistema de refrigeración**

Las fallas más comunes dentro del sistema de refrigeración de un transformador de potencia son:

- Filtraciones en las bombas de aceite y agua.
- Descompostura de los ventiladores.

- Un termostato defectuoso.

Normalmente esta posible falla se debe al incremento de calor y acumulación de gas.

**Figura 18.**  
**Refrigeración de los transformadores de potencia**



Nota: En la figura 18 observamos los ventiladores de los transformadores de potencia que se encuentran en subestaciones, cumpliendo la función de Refrigeración para dicho elemento. Tomado de (*GlobeCore, 2021*).

### **2.1. Dispositivos de Relés digitales para protección de transformadores de potencia en el mercado.**

Presentamos a continuación, una serie de relés digitales con su marca código, especificaciones y uso, con el fin de tener una visión más clara de las diferentes protecciones aplicadas en los transformadores.

### **2.2. Dispositivos de Relés digitales para protección de transformadores de potencia en el mercado.**

Presentamos a continuación, una serie de relés digitales con su marca código, especificaciones y uso, con el fin de tener una visión más clara de las diferentes protecciones aplicadas en los transformadores.

## 2.2.1. Relés SEL (Schweitzer Engineering Laboratories).

A continuación, se los relés de la marca SEL más utilizados en el mercado.

### 2.2.1.1. Relé SEL para protecciones de los transformadores de potencia.

A continuación, se muestran los Relé para protecciones de transformadores de potencia.



Ilustración 2. Relés de protección de la marca SEL  
Fuente: (SEL, 2021)

### 2.2.1.2. Relé SEL de protección diferencial

Se muestran a continuación, los dos tipos de Relés de la marca SEL que son específicamente utilizados para la protección diferencial de los transformadores de potencia



#### SEL 587Z

- Protección diferencial de bus de alta impedancia
- Protección contra la sobretensión
- Implementación Simple
- Detección de falla del interruptor / eliminación de fallas



#### SEL 587

- Protección diferencial para dos devanados
- Protección integral contra sobrecorriente
- Supervisión del elemento diferencial

Ilustración 3. Relés de protección diferencial para transformadores de potencia.  
Fuente: (SEL, 2021)

### 2.2.2. SIEMENS

Se muestran a continuación, los dos tipos de Relés de la marca SEL que son específicamente utilizados para la protección diferencial de los transformadores de potencia.



#### SIPROTEC 7UT612

- La protección diferencial SIPROTEC 7UT612 es una protección selectiva y rápida contra cortocircuitos para transformadores de todos los niveles de tensión, para máquinas rotativas como motores y generadores, así como para líneas cortas y barras.

Ilustración 4. Relés de protección para transformadores de la marca SIEMENS  
Fuente: (SIEMENS - SIPROTEC 7UT613, 2021)

### 2.2.3. SCHNEIDER

A continuación, se presenta un relé que es comúnmente utilizado por las empresas eléctricas del Ecuador.

#### 2.2.3.1. MiCOM P64x

Como se mencionó anteriormente, el relé MiCOM P64x de la marca SCHNEIDER es un dispositivo que es comúnmente utilizado por las empresas eléctricas del Ecuador.



Entre sus ventajas tenemos:

- \* Cuenta con un EDE universal para todas las configuraciones de transformador
- \* permite proteger, controlar y supervisar mediciones y registros en un solo dispositivo
  - \* copia de seguridad y registro de fallas pasantes
  - \* Fácil de especificar, instalar y poner en marcha
  - \* Teclas de función programables

Ilustración 5. Relé MiCOM P64x y sus ventajas  
Fuente: (MiCOMP64x Schneider Electric , 2021)

### 2.2.4. ABB

#### 2.2.4.1. RET615

El Relé RET615 al igual que el anterior Relé de protección se presenta a continuación, un relé que es comúnmente utilizado por las empresas eléctricas del Ecuador



- Solución compacta y versátil
- servicios públicos con integración de protección, control, monitoreo y supervisión en un solo relé
- Amplia gama de funciones de protección y control para transformadores de potencia de dos devanados, incluida protección diferencial
- Unidad enchufable extraíble para una instalación y prueba rápidas

Ilustración 6. Relé de la marca ABB – RET615  
Fuente: (ABB - RET615, 2021)

### 2.3. Tipos de codificaciones de relés de protección para los transformadores de potencia, según la normativa ANSI.

Dentro de las normativas ANSI existen numerosos dispositivos de protección como lo son los relés, los cuáles se han enumerado para facilitar la identificación de estos en la tabla 4, en los capítulos que se encuentran a continuación, se detallara el concepto y la función de cada una de las codificaciones.

**Tabla 4.**  
**Tipos de ajustes para relés según las normativas ANSI**

| <b>N°</b>   | <b>Nombre</b>  |
|-------------|--|
| <b>24</b>   | Sobreexcitación (V/Hz)   |
| <b>27</b>   | Subtensión   |
| <b>46</b>   | Sobre corriente de secuencia negativa                                      |
| <b>49</b>   | Sobre carga térmica  |
| <b>50</b>   | Sobre corriente de fase instantánea  |
| <b>50G</b>  | Sobre corriente de tierra instantánea                                      |
| <b>50N</b>  | Sobre corriente Neutro Instantánea   |
| <b>50BF</b> | Fallo del interruptor  |
| <b>51G</b>  | Sobre corriente de tiempo inverso a tierra                                 |
| <b>51N</b>  | Sobre corriente de tiempo inverso con neutro                               |
| <b>63</b>   | relé de presión repentina  |
| <b>81U</b>  | Sobre frecuencia   |
| <b>87HS</b> | Diferencial de fase sin restricciones                                      |
| <b>87T</b>  | Diferencial de fase del transformador con restricciones                    |
| <b>87GD</b> | Diferencial de tierra (también conocido como "falla a tierra restringida") |

Nota Tipos de relé según las normativas ANSI, asunto que se tratara en los siguientes capítulos, recuperado de (Leon G. , 2019).

## **CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1. Definiciones básicas de Protecciones eléctricas**

#### **3.1.1. Misión**

“Desconectar tan rápido como sea posible y necesario, la parte del sistema eléctrico que se encuentre averiada”

(Leon G. , 2019)

#### **3.1.2. Importancia**

“Evitar daños mayores en el elemento averiado y la propagación de estos daños a otros elementos del Sistema Eléctrico de Potencia”

(Leon G. , 2019)

#### **3.1.3. Definición**

El sistema de protección es el conjunto de protecciones, equipos de telecomunicación, alimentadores, bobinas de disparo, transformadores de corriente y de potencia y todo lo necesario para detectar o eliminar las fallas que ocurran en las distintas zonas de protección, cubiertas por su alcance con el fin de minimizar los daños que puedan causar estas fallas.

De acuerdo con (Amparo, 2016), la zona de protección es una parte del sistema de potencia delimitada por interruptores capaces de aislarla del resto del sistema, es requisito esencial que la energía suministrada por el sistema de potencia garantice la calidad de la energía y la operación en condiciones normales de servicio de todos los equipos conectados a la red.

La actuación del sistema de protección debe mantener por tanto la calidad y la continuidad de manera simultánea eliminando los defectos en el mínimo tiempo posible.

Como resultado tenemos que una protección es un relé o un conjunto de relés que detectan las fallas para las que han sido diseñados, el cual envía ordenes

designadas dentro del tiempo definido, atendiendo así criterios de fiabilidad, rapidez y selectividad

### 3.1.4. Objetivo de las protecciones eléctricas

Los objetivos generales de un sistema de protección son:  
(Ramirez, 2003).

- Proteger efectivamente a las personas y los equipos.
- Reducir la influencia de las fallas sobre las líneas y los equipos.
- Cubrir de manera ininterrumpida el sistema de potencia.
- Detectar condiciones de falla monitoreando continuamente las variables del SP.

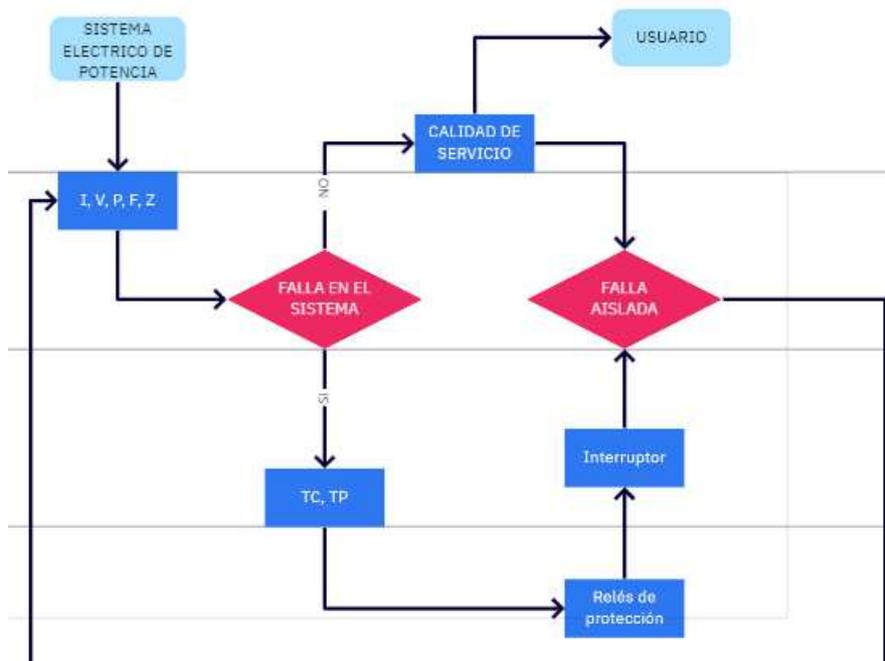


Ilustración 7. Secuencia de la detección de falla en el sistema Eléctrico del sistema.

Fuente: (Verónica Barberán, 2021)

### **3.1.5. Funciones de las protecciones eléctricas**

Dentro de las funciones que se utilizan para las protecciones son:

- Aislar las fallas permanentes.
- Minimizar el número de salidas y de fallas permanentes.
- Minimizar el tiempo de localización de fallas.
- Prevenir daños a los equipos.
- Minimizar la probabilidad de la falla disruptiva.
- Minimizar los riesgos.
- Minimizar la probabilidad de rotura de conductores.

### **3.1.6. Coordinación de los dispositivos de protección.**

De acuerdo con lo que dice (CENACE, 2013) podemos detallar lo siguiente:

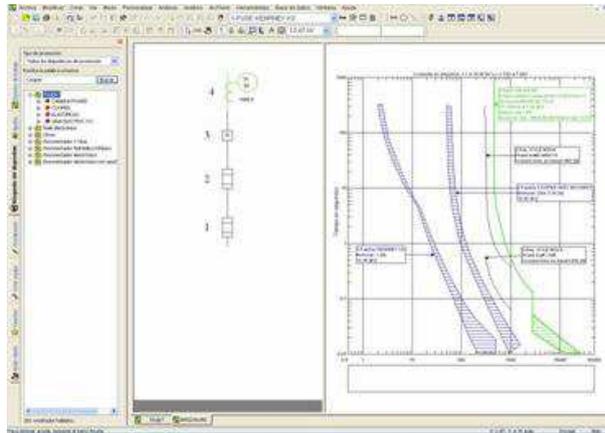
La base para la realización de ajustes y coordinación en cualquier sistema de protección es el flujo de potencia y el análisis de cortocircuito.

Para la realización de la coordinación y sus respectivos ajustes, normalmente las empresas eléctricas del país utilizan el software CYMTCC donde se ingresan datos de los equipos de protección utilizados y elementos presentes en la subestación de distribución.

Este Software es muy útil debido a que permite corregir diagramas de protección, cambiar la secuencia de operación y realizar los respectivos análisis de falla, además presenta una sola grafica de tiempo con la corriente de curva de operación de protección.

Esta herramienta muestra curvas de los elementos tales como, curvas de arranque del motor, curva de daño térmico de cables y de conductores y curvas de resistencias de puntos de corriente de arranque del transformador, la curva de la corriente de inrush, entre otras. (CENACE, 2013).

**Figura 19.**  
**Simulador CYMTCC, muestra de Protección de un alimentador.**



Nota: en la figura 19 observamos la ventana del simulador CYMTCC donde muestra la protección de un alimentador. Tomado de (CYME, 2020).

Otra de las ventajas que surgen a través de esta plataforma computacional es que puede ir instalado como sistema aplicativo dentro del simulador CYMDIST, gracias a esta ventaja el usuario puede realizar un diseño de esquema de coordinación y finalmente efectuar el análisis que se realiza en CYMDIST, todo desde una misma plataforma.

### 3.1.7. Magnitudes eléctricas que controlan los relés de protección

Las magnitudes eléctricas más comunes que controlan los relés de protección son:

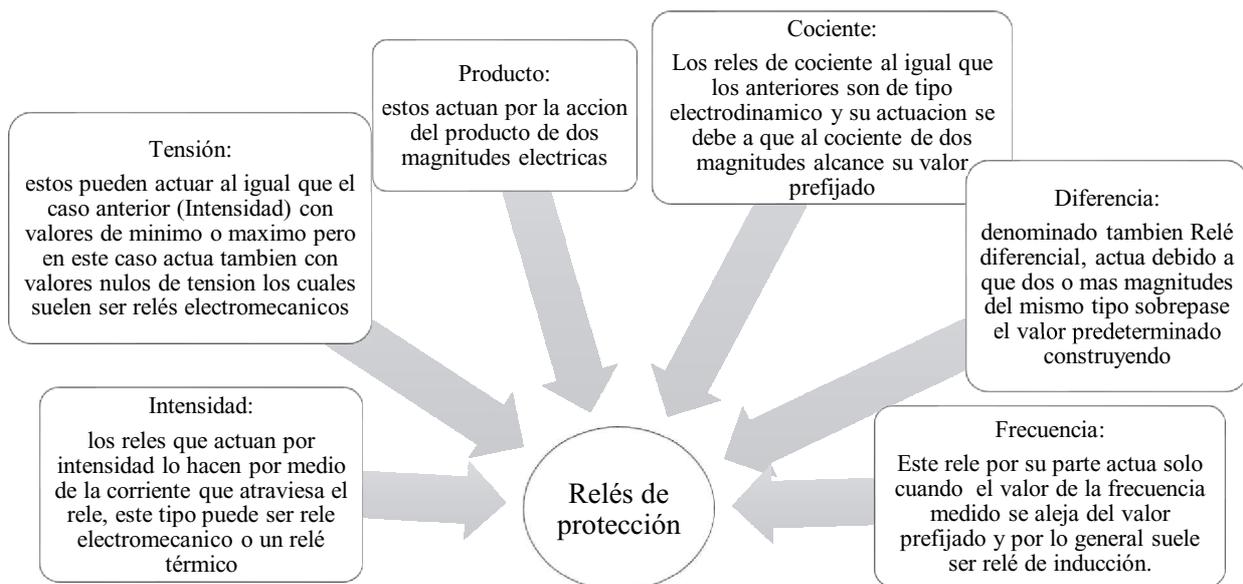


Ilustración 8. Relés de protección que se utilizan en sistemas eléctricos de potencia.  
 Fuente: (Ing. Margil S., 2005)

### 3.1.8. Clasificación y codificación de relés de protección

Los relés numéricos de protección se clasifican en:

Tabla 5.

Clasificación de relés numéricos de protección

| <b>Clasificación de Relés de protección</b>       | <b>Codificación ANSI</b> |
|---|--------------------------|
| Relé de sobrecorriente                            | 50                       |
| Relé de sobrecorriente de fase instantánea        | 50/50P                   |
| Relé de sobrecorriente de tiempo inverso a tierra | 51G                      |
| Relé sobrecorriente de tiempo inverso a tierra    | 51N                      |
| Relé de sobre y bajo voltaje                      | 27                       |
| Relé de distancia                                 | 21                       |
| Relé direccional                                  | 67/67N                   |
| Relé de frecuencia                                | 81                       |
| Relé diferencial                                  | 87                       |

Nota: en la tabla 5 se muestra la clasificación de Relés de protección y sus respectivas codificaciones según las normativas ANSI. Recuperado de (Festo, 2021).

A continuación, se presenta la tabla de codificación general de relés de protección según su código ANSI. Los cuadros pintados de color verde están asociados a la protección de transformadores, las cuales profundizaremos más adelante.

Tabla 6.

Codificación ANSI de los distintos tipos de Relés de protección

| <b>Descripción</b>        | <b>Codificación ANSI</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| Relé de retardo de tiempo | 2                        |
| Relé de distancia         | 21                       |
| Sobreexcitación           | 24                       |

|  |       |
|--|-------|
| Relé de verificación de sincronismo                  | 25    |
| Relé de Subtensión                                   | 27    |
| Relé de Subtensión de tercer armónico                | 27TN  |
| Dispositivo anunciador                               | 30    |
| Relé de potencia inversa                             | 32    |
| Relé de subcorriente o subpotencia                   | 37    |
| Relé de excitación de campo                          | 40    |
| Relé de sobrecorriente de secuencia negativa         | 46    |
| Relé de sobretensión de secuencia negativa           | 47    |
| Relé térmico   | 49    |
| Relé de sobrecorriente CA instantáneo                | 50    |
| Diferencial de fase dividida                         | 50 DT |
| Energización inadvertida                             | 50/27 |
| Fallo del interruptor                                | 50 BF |
| Relé de sobrecorriente de tiempo inverso de CA       | 51    |
| Cortacircuitos                                       | 52    |
| Relé de sobretensión                                 | 59    |
| Relación diferencial de voltaje de tercer armónico   | 59D   |
| Equilibrio de voltaje o pérdida de relé de potencial | 60    |
| Dispositivo de presión                               | 63    |
| Relé de tierra de campo                              | 64F   |
| Detección de despegue del cepillo                    | 64B   |
| 100% protección de tierra del estator por baja       | 64S   |

|  |     |
|--|-----|
| Inyección de frecuencia                  |     |
| Relé de sobrecorriente direccional de CA | 67  |
| Bloqueo de oscilación de potencia        | 68  |
| Relé permisivo                           | 69  |
| Relé de alarma                           | 74  |
| Relé de sobrecorriente                   | 76  |
| IDC Relé de desfase                      | 78  |
| Relé de reconexión CA                    | 79  |
| Relé de frecuencia                       | 81  |
| Relé de frecuencia de tasa de cambio     | 81R |
| Dispositivo de transferencia             | 83  |
| Relé de cable piloto o portador          | 85  |
| Bloquee el relé                          | 86  |
| Relé diferencial                         | 87  |
| Relé de disparo auxiliar                 | 94  |

Nota: Codificación ANSI de los distintos tipos de Relés de protección y señalado de color verde observamos los relés que son únicamente para transformadores de potencia. Recuperado de (*Juan Manuel Gers, 2013*).

### **3.2. Instrumentos y elementos de protección para los Sistemas Eléctricos de Potencia.**

Si bien sabemos, el objetivo del sistema eléctrico de potencia es generar, transmitir y distribuir energía eléctrica al usuario final. Por lo cual es diseñado para entregar energía de manera segura, confiable y lo más económicamente posible, no obstante, pueden ocurrir defectos, fallas, perturbaciones e incluso regímenes anormales de funcionamiento de los diferentes elementos del sistema.

Por esto se han diseñado sistemas de protección los que rápidamente detectan una condición anormal dentro del sistema, las cuales actúan de manera rápida y eficaz desenergizando los equipos que se encuentran defectuosos, para así retornar al sistema eléctrico lo más rápido posible. (Agustin, 2012).

A continuación, se presentarán los instrumentos de protección que detectan una falla dentro del sistema de potencia.

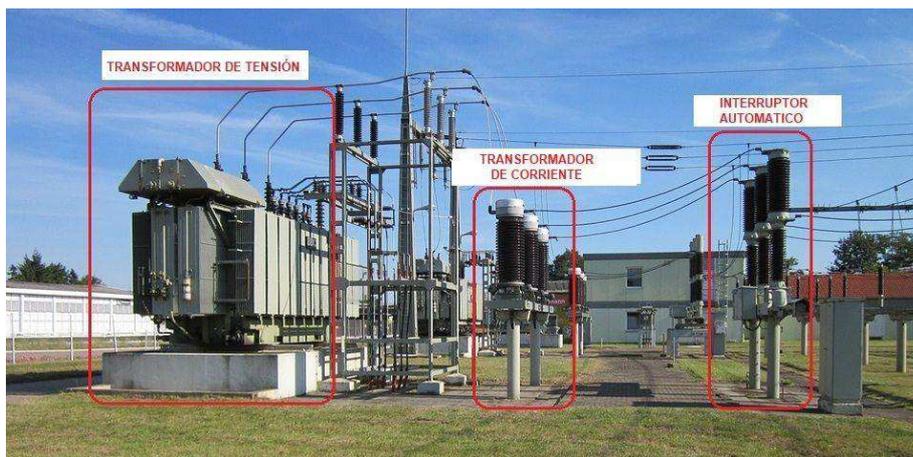
### 3.2.1. Transformadores de medición.

Este instrumento de protección se utiliza debido a que ni los aparatos de medida y los relés de protección no son capaces de soportar ni elevadas tensiones, ni elevadas corrientes, de esta manera encarecerían su construcción.

Por lo cual es fundamental evitar las elevadas tensiones a esos dispositivos incluso por que se encontraran al alcance de las personas. Dicho esto, este elemento reduce las señales de intensidad de corriente y voltaje, respectivamente, usando valores adecuados para la respectiva conexión en las entradas para los relés de protección.

Estos se clasifican en transformadores de corriente y en transformadores de voltaje. Los cuales son equipos que cuentan con una interfaz entre el sistema de potencia y los relés de protección.

**Figura 20.**  
***Tipos de transformadores de instrumento o de medición.***



Nota: la figura 20 nos muestran los tipos de transformadores que se encuentran en las subestaciones. Tomado de (*AreaTecnologia, 2016*)

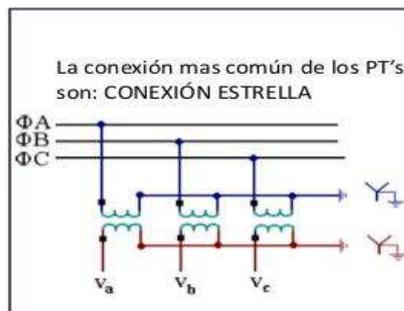
Para la aplicación de los TC Se debe tener muy en cuenta.

- La relación de transformación
- La precisión
- El burden (carga)
- Las características generales

En cuando a los TP's él es necesario que el voltaje del devanado secundario este lo más cercano posible a su relación. (Para esto la saturación debe se baja como su corriente de magnetización). Su impedancia de magnetización es casi constante en todo su rango de voltaje

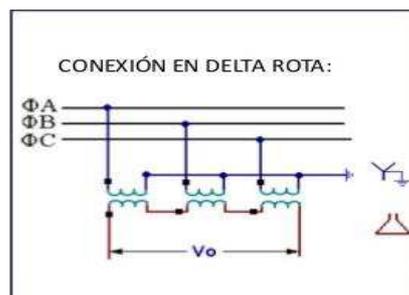
A continuación, observaremos las distintas formas de conexión del TP, según su tipo de conexión:

**Figura 21**  
**Conexión Estrella**



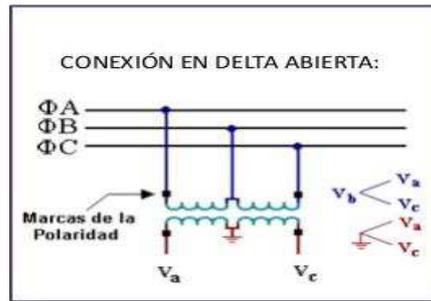
Nota: esta imagen nos muestra las distintas formas de conexión en los TP's en este caso es la conexión Estrella. Tomado de (Dorf, s.f.)

**Figura 22.**  
**Conexión en Delta Rota más común de los TP's.**



Nota: esta imagen nos muestra las distintas formas de conexión en los TP's en este caso es la conexión delta Rota la cual es la más común de todas las conexiones. Tomado de (Dorf, s.f.)

**Figura 23.**  
**Conexión en Delta Rota más común de los TP's.**



Nota: esta imagen nos muestra las distintas formas de conexión en los TP's en este caso es la delta abierta. Tomado de (Dorf, s.f.)

Condiciones anormales de operación para los TC.

- Su corriente primaria es demasiado grande.
- La impedancia de carga es demasiado grande.
- Circuito secundario se encuentra abierto.

### 3.2.2. Relés de protección

Este tipo de protección ordena disparos automáticos en caso de que ocurra una falla. Estos son sin duda la parte principal del sistema de protección, los cuales contienen una lógica que deben seguir los interruptores, comunicándose con el sistema de potencia, mediante los elementos de medidas, estos a su vez son los encargados de ordenar su operación a los dispositivos tales como interruptores, reconectores entre otros.

**Figura 24.**  
**Relé de protección en una subestación eléctrica**



Nota: en la figura 24 se observa a un trabajador instalando un relé de protección en una subestación eléctrica. Tomado (OMICRON, 2012)

Los relés se suelen clasificar como relés primarios y secundarios. Se denominan relés primarios aquellos sensores que están conectados directamente en circuitos que protegen, a diferencia de los relés secundarios que son aquellos cuyos elementos de medición están conectados al circuito que protegen a través de transformadores de instrumentos. Dichos relés secundarios se pueden clasificar en:

**Tabla 7.**  
**Clasificación de relés de protección.**

| <b>Tipos de relés de protección</b>   | <b>Descripción</b>   |
|---|--|
| Sobretensión (ANSI 59), sobreintensidad (ANSI 50/51) y relé de sobrecorriente (ANSI 76) | El relé opera cuando el voltaje, potencia o a corriente surgen por encima de un valor específico.  |
| Relé de baja tensión, corriente baja y baja potencia (ANSI 27)                          | Los relés operan cuando los valores caen por debajo de un valor específico   |
| Relé de corriente direccional (ANSI 67)   | El relé opera cuando la corriente supone un cambio de fase específico en la tensión y el relé se compensa por la caída de tensión.         |
| Relé de potencia direccional (ANSI 32)  | Este opera cuando el voltaje y la corriente aplicados suponen un desplazamiento de espacio específico y no se permite ninguna compensación |
| Relé diferencial (ANSI 87)  | Este tipo de relé funciona cuando se produce alguna diferencia de fase o magnitud especificada entre más cantidades                        |
| Relé de distancia (ANSI 21)   | En este relé opera dependiendo de la relación entre la tensión y corriente.  |
| Según sus características de temporización, estos relés se pueden dividir               |  |

| en las siguientes clases:                     |   |
|---|---|
| Relés instantáneos (ANSI 50)                  | Los tiempos de operación requeridos para que este relé emplee su función es inferior a 0.2 segundos, realizando su protección ante la falla después del poco tiempo de la misma |
| Relés de retardo de tiempo definido (ANSI 51) | Este tipo de relé es sensiblemente independiente de la magnitud de la corriente y otra cantidad que cause su operación.   |
| Relés de retardo de tiempo inverso (ANSI 2)   | La magnitud de su operación y otra cantidad que causa la operación es inversamente igual al tiempo requerido para su operación  |

Nota: en esta tabla se puede apreciar los tipos de relés ajustes de relé y sus descripciones. Recuperado de (*Illustrationprize, s.f.*)

### 3.2.3. Interruptores

El interruptor eléctrico o disyuntor, es un dispositivo utilizado para desviar o interrumpir el curso de una corriente eléctrica, actualmente el interruptor es utilizado cumpliendo varias funciones, desde un simple interruptor que apaga o enciende un bombillo hasta un complicado selector de transferencia automático siendo este controlado por una computadora.

El interruptor de potencia es el dispositivo encargado de desconectar una carga o una parte del sistema eléctrico, tanto en condiciones de operación normal, como en condición de cortocircuito.

La operación del interruptor puede ser manual o accionada por la señal de un relé encargado de vigilar la correcta operación del sistema. Finalmente podemos decir que el interruptor eléctrico, es el elemento que hace posible la conexión y desconexión de las redes eléctricas en nuestro sistema, ya sea que funcione con o sin carga, sin embargo, estos son operados también y controlados por los relés directamente.

La selección de un interruptor de potencia consiste en definir un conjunto de valores que limitan las condiciones de operación máxima del interruptor, a continuación, se indican unos de los parámetros más importantes de este elemento que se deben de tener en cuenta para su correcta utilización:

- Tensión nominal
- Frecuencia nominal
- Corriente nominal
- Tipo de aislación o rigidez dieléctrica
- Ciclo de trabajo
- Corriente cortocircuito momentánea y de interrupción

Los interruptores se clasifican en:

**Tabla 8.**

**Clasificación de interruptores.**

| <b>Tipo de interruptor</b>    | <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>  |
|-------------------------------|---|---|
| Interruptores al vacío        | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tiempo de operación rápida.</li> <li>✓ Rigidez dieléctrica entre los contactos.</li> <li>✓ Son menos pesados y más baratos.</li> <li>✓ No requieren de mantenimiento y tienen una vida útil mucho más prolongada que los interruptores convencionales.</li> <li>✓ Utilizados especialmente para sistemas de baja y media tensión.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dificultad para mantener la condición de vacío</li> <li>✓ Generan sobretensiones</li> <li>✓ Tienen una capacidad limitada de interrupción</li> </ul> |
| Interruptores de hexafluoruro | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El gas SF<sub>6</sub> no es inflamable y es químicamente estable. Sus productos no son</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El gas SF<sub>6</sub> de alguna forma esta sofocado</li> <li>✓ La entrada de</li> </ul>  |

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| de azufre | explosivos<br>✓ El arco eléctrico se reduce debido a la alta resistencia dieléctrica del SF6<br>✓ Su rendimiento no se ve afectado debido a variaciones en las condiciones atmosféricas<br>✓ Requiere menos mantenimiento y no se requiere un costoso sistema de aire comprimido. | humedad en el tanque del interruptor SF6 es muy dañina para el interruptor el cual provoca ciertas fallas<br>✓ Las partes internas necesitan limpieza<br>✓ La instalación especial requiere transporte y mantenimiento de calidad del gas |
|-----------|---|---|

Nota: mediante esta tabla, conoceremos los tipos de interruptores y sus ventajas y desventajas. Recuperado de (Leon G. , 2019)

### 3.2.4. Fusibles

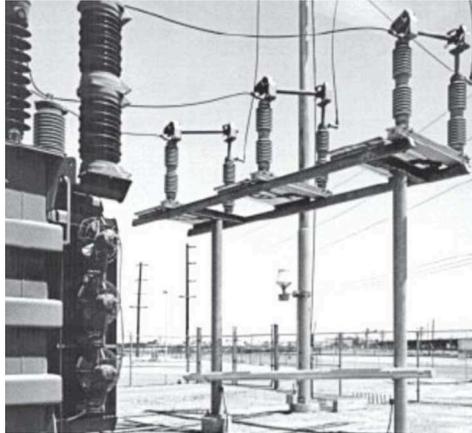
Los fusibles de potencia, de alto voltaje proveen beneficios económicos junto con una confiable protección de pequeños hasta medianos transformadores de carga.

Estos dispositivos son utilizados en empresas eléctricas y subestaciones industriales, el fusible en si es mucho menos costoso que otro equipo de protección debido a que no necesita una estación de baterías, por ejemplo, u operadores motorizados e incluso relés de protección.

Cabe recalcar que la Empresa Eléctrica Publica Estratégica Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP), no utiliza fusibles primarios como protección en transformadores mayores a 5 MVA.

Los fusibles de potencia tienen curvas características de corriente de tiempo, de libre mantenimiento físico. (S&C Electric company, 2004).

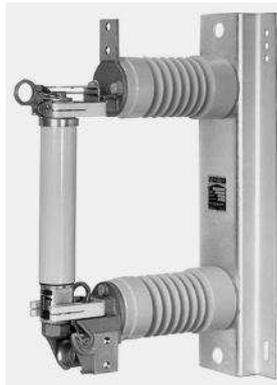
**Figura 25.**  
**Fusibles de potencia**



Nota: fusibles presentados por electric company.  
Tomado de (S&C Electric company, 2004)

El fusible del lado primario puede operar rápidamente en respuesta a la falla localizada, entre el transformador y el equipo de protección de sobrecorriente más cercano del lado del secundario proporcionando un soporte de protección para el transformador de potencia, en caso de que el equipo de protección del lado secundario llegará a fallar, debido a un mal funcionamiento, una operación demasiado lenta o debido a rangos y ajustes incorrectos.

**Figura 26.**  
**Fusible de potencia**



Nota: en la siguiente figura podemos observar un fusible de potencia. Tomado de (S&C Electric Company, 2020)

Para la selección adecuada de un fusible de protección a un transformador deben ser considerados los siguientes puntos:

- Tienen ser capaces de soportar sin quemarse la corriente nominal incrementada.
- Un margen de seguridad que permita sobrecargas controladas o que asegure la posibilidad de aumentar la capacidad del transformador mediante ventilación adicional.
- Deben ser capaces de soportar 1,5 veces de su corriente nominal
- Su curva características deben quedar a la derecha de la recta vertical que tiene abscisa ese valor corriente.
- Deben ser capaces de soportar la corriente de inrush por lo menos 0,1 segundos.
- Esta corriente es del orden de 8 a 10 veces la corriente nominal del transformador.

Las siguientes figuras, corresponde a los valores establecidos por las normas ASA (NEMA) para las corrientes máximas de cortocircuito simétricas, que pueden soportar los transformadores durante tiempos determinados. (Academia.edu, 2005).

**Figura 27.**  
**Corriente de cortocircuito y tiempo de fusión**

| <b>% Impedancia</b> | <b>Corriente efectiva de cortocircuito simétrico</b> | <b>Tiempo (seg)</b> |
|---------------------|--|---------------------|
| 4% o menos          | 25,0 I nominal                                       | 2                   |
| 5%                  | 20,0 I nominal                                       | 3                   |
| 6%                  | 16,6 I nominal                                       | 4                   |
| 7% o más            | 14,3 o menos veces la I nominal                      | 5                   |

Nota: Corriente de cortocircuito y tiempo de fusión. Tomado de (Academia.edu, 2005)

Para transformadores de potencia, se utiliza normalmente fusibles tipo H y de tipo E.

A continuación, se muestra una tabla de caracterización y su aplicación según un catálogo del fusible COOPER BUSSMAN FLC-E.

Para que un fusible de uso general obtenga la clasificación E se deben cumplir con las siguientes condiciones:

El elemento de respuesta de corriente debe fundirse en 300 segundos a una

corriente RMS dentro del rango de 200% a 240% del valor de corriente continua del fusible. (ANSI C37.46). (Concha, s.f.)

**Tabla 9.**  
**Características y aplicación de un transformador tipo E**

| <b>Características</b>   | <b>Aplicación</b>  |
|--|--|
| Limitación de corriente con indicación y sin indicación                    | Los fusibles de los transformadores de potencia deben tener una capacidad suficiente para manejar transcientes los cuales deberían permitir el paso de la corriente por efecto magnético del transformador.    |
| Casquillos plateados   | La corriente pico máxima varía según el diseño del transformador.  |
| Valores de voltaje (Diseño máximo)<br>2475,2750,5500,8300,1<br>5.500 Volts | Las corrientes, por efecto magnético, se denotan usualmente como un porcentaje de la corriente del transformador a plena carga. La duración de la corriente pico máxima usualmente se da en se da en segundos. |
| Valores de corriente<br>1/4E a 10E   | En el evento de no existir información, la norma general es dimensionar el fusible a un valor equivalente del al 300% de la corriente de plena carga del primario del transformador.                           |

Nota: Características y aplicación de un transformador tipo E. Recuperado de (Concha, s.f.)

### **3.2.5. Reconectores o restauradores automáticos**

El reconector es un interruptor con reconexión automática, instalado preferentemente en líneas de distribución.

Es un dispositivo de protección capaz de detectar una sobrecorriente, interrumpirla y reconectar automáticamente para reenergiza la línea. Es un elemento del sistema eléctrico de potencia que permite realizar varias reconexiones sucesivas, además, variar el intervalo y la secuencia de estas reconexiones. De esta manera, si la falla es de carácter permanente el reconector abre en forma definitiva después

de cierto número programado de operaciones, de modo que aísla la sección fallada de la parte principal del sistema.

Los reconectores trifásicos son utilizados cuando se requieren aislar las tres fases para cualquier falla permanente, con el fin de evitar el funcionamiento monofásico de cargas trifásicas.

Este elemento se utiliza también en cualquier punto de un sistema de distribución donde el rango es el adecuado para los requerimientos del sistema.

Para aplicar este elemento en el sistema se debe considerar los siguientes factores:

- La tensión nominal del sistema debe ser igual o menor a la tensión de diseño del reconector.
- La corriente máxima permanente de carga en el punto del sistema donde se ubicará debe ser menor o igual a la corriente nominal de reconector.
- Debe tener una capacidad de ruptura mayor o igual, a la corriente máxima de falla en el punto de aplicación.

Este equipo puede servir como protección primaria del alimentador y en caso de varios alimentadores, tendrán su respaldo de protección del interruptor controlados por relés digitales que a su vez servirá como protección de respaldo en el lado secundario del transformador, independiente de la protección propia del transformador.

A continuación, se presenta una tabla de características de un reconector marca NOVA, la cual se presenta en 3 presentaciones (NOVA 15, NOVA 27, NOVA 38) donde cada uno de ellos cuentan con dos configuraciones, tales como:

- Alimentación por control
- Alimentación Auxiliar, batería o por transformador

**Figura 28.**

**Tabla características de un reconfigurador marca NOVA.**

|  |           |           |           |           |             |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Voltaje máximo                           | 15,5 kV   | 15,5 kV   | 27,0 kV   | 27,0 kV   | 38,0 kV     |
| Nivel básico de impulso nominal          | 110,0 kV  | 125,0 kV  | 125,0 kV  | 150,0 kV  | 170,0 kV*** |
| Corriente continua nominal               | 630 A*      |
| Corriente en cortocircuito simétrica     | 12,5 kA** | 12,5 kA** | 12,5 kA** | 12,5 kA** | 12,5 kA     |
| Corriente de cierre de cresta asimétrica | 32,0 kA     |
| Corriente de carga de cable              | 10 A      | 10 A      | 25 A      | 25 A      | 40 A        |

Nota: Tabla características de un reconfigurador marca NOVA. Tomado de (Dielco, 2020)

**Figura 29.**

**Reconfigurador Automático marca NOVA.**



Nota: en la siguiente figura se muestra un reconfigurador automático NOVA (Dielco, 2020)

### 3.2.6. Sistema de comunicaciones

Una red de comunicaciones es un conjunto de medios físicos que permiten la transmisión de datos, audio y videos entre equipos a distancia. Dicha información puede ser transmitida en forma digital, analógica o mixta a través de ondas electromagnéticas o algunos otros medios, por ejemplo, cables de cobre, ethernet o fibra óptica.

Este sistema permite conocer el estado de los equipos de protección con el fin de realizar las respectivas operaciones y analizar el estado del sistema eléctrico de potencia. (Leonardo Alvarez, 2020).

Las redes se pueden clasificar en:

- Por su extensión: entre ellas existen, PAN, LAN, WAN
- Por su topología: Estrella, bus, anillo, malla, mixta
- Por su conexión física: se clasifican en redes punto a punto (unicast) y redes multipunto o de difusión

- Por su térmica transmisión de datos: se clasifican en redes punto a punto (unicast) y redes multipunto o de difusión
- Por su uso: se clasifican en redes privadas o corporativas y redes públicas.

En las subestaciones suelen existir gran cantidad de dispositivos que tienen que ser comunicados constantemente. Es por esto que las comunicaciones se dividen de la siguiente manera:

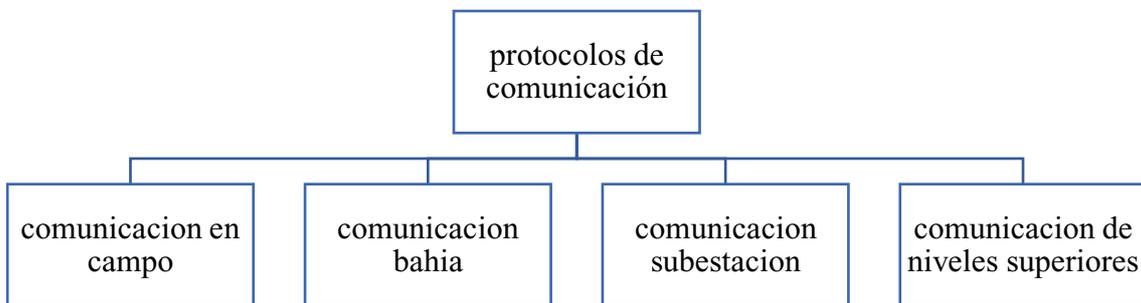


Ilustración 9. Protocolos de comunicación  
Fuente (Carlos R. , 2017)

**Figura 30.**  
*Niveles de control en subestaciones eléctricas*



Nota: a continuación, en la figura 30 podemos observar los distintos niveles de control que hay en las subestaciones, tomando como referencia la ilustración 9. Tomado de (INEL, 2020).

Cada nivel o protocolo de comunicación se creó con la finalidad de dar soluciones a un problema en particular hablamos de comunicación en campo cuando existe comunicación entre el equipo primario y los IED's, en este caso se utiliza como protocolo el "PROFIBUS", en el caso de comunicación bahía se usa el protocolo de IEC 61850, en la comunicación subestación se utiliza el protocolo DNP3 y en los niveles de comunicación superiores es donde se comunica la subestación con los centros de control mediante sus protocolos de DNP3

### **3.3. Protección de transformadores de potencia**

Generalmente no hay normas específicas para la aplicación de protecciones para los transformadores, e incluso existen transformadores idénticos pero que cumplen con aplicaciones diferentes.

Sin embargo, en la protección de transformadores es necesario considerar protecciones de respaldo, en caso de averías, por ejemplo:

La avería de un relé o de un interruptor durante la falla de un transformador puede provocar un daño agravante en el transformador de potencia.

Las fallas externas son aquellas que se producen fuera del transformador, es decir en cualquier lugar de la red, ya sea esta provocadas por alguna sobretensión, cortocircuito, sobrecargas, descargas atmosféricas, entre otras. Dichas fallas podrían llegar a provocar problemas tanto en el sistema, como para el transformador.

Así como existen las fallas externas, existen las fallas internas que son aquellas fallas que se pueden dar en cortocircuitos de bobinas, cortocircuitos entre vueltas, entre fases o en fallas en el núcleo, siendo así que cuando hablamos de ubicación del fallo, los sistemas de protección se pueden dividir en fallas externas e internas.

A continuación, detallaremos los tipos de fallas externas e internas que se dan en los transformadores de potencia.

**Tabla 10.**

**Clasificación de las fallas que ocurren en el transformador de potencia.**

| <b>Fallas externas</b>  | <b>Fallas internas</b>    |  |
|-------------------------|---------------------------|--|
|                         | <b>Fallas incipientes</b> | <b>Fallas activas</b>                    |
| Sobrecargas             | Sobrecalentamiento        | Cortocircuitos en el devanado            |
| Sobretensiones          | Sobre flujo               | Fallas en el núcleo                      |
| Sobre frecuencia        | Sobrepresión              | Defectos en aisladores                   |
| Cortocircuitos externos |                           | Defectos en el sistema de refrigeración. |

Nota: Clasificación de las fallas que ocurren en el transformador de potencia. Recuperado de (Alberto R. , 2021)

El principal objetivo de los sistemas de protección del transformador de potencia es el de separar al transformador del suministro de energía eléctrica lo antes posible evitando daños en el equipo, este sistema de protección está diseñado para poder señalar si se ha producido irregularidades en el sistema eléctrico y que este actúe de manera instantánea.

En el caso de que ocurra algún bloqueo en el sistema, el relé preestablecido, envía una señal al interruptor, el cual es el encargado de impedir que la falla afecte al transformador (Maria, 2019)

### **3.3.1. Tipos y criterios basados en la protección del transformador de potencia**

En la siguiente tabla podemos identificar los diferentes criterios de operación

Tabla 11.

Criterios de operación.

| Criterios de operación           | Sistema de protección              | Ubicación de falla           |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Altas corrientes                 | Protección contra sobretensión     | Protección interna o externa |
| Evaluación de gases              | Relé buchholz                      | Protección interna           |
| Altas temperaturas               | Protección de sobrecargas térmicas | Protección interna           |
| Criterio de diferencias actuales | Protección diferencial             | Protección interna o externa |
| Criterios de secuencia cero      | Protección de falla a tierra       | Protección externa           |
| Impedancia de la línea           | Protección a distancia             | Protección externa           |

Nota: en la siguiente tabla observamos los criterios de observación, su sistema de protección y en qué tipo de protección se encuentran ubicados, ya sea en falla externa o en falla interna. Recuperado de (Maria, 2019).

### 3.3.2. Función principal de la codificación de relés de protección para transformadores según las normativas ANSI

A continuación, se detalla la función principal de cada Relé, según su ubicación y código de protección de acuerdo con la tabla 4 del capítulo 2 del apartado 3.1.8.

#### 3.3.2.1. Relés utilizados en fallas internas

- 87T: Diferencial de fase del transformador con restricciones
- 87H: Diferencial de fase sin restricciones
- 87GD: Diferencial de tierra (también conocido como "falla a tierra restringida").

### **3.3.2.2. Relés utilizados en condiciones de funcionamiento anormales**

- 24: Sobreexcitación (V/HZ)
- 27: Subtensión
- 49: sobrecarga térmica
- 81U: sobre frecuencia
- 50BF: Fallo del interruptor

### **3.3.2.3. Relés utilizados en Fallas externas**

- 50/51: sobre corriente de fase
- 50G/51G: Sobre a tierra.
- 50N/51N: Sobre corriente con Neutro
- 46: sobrecorriente de secuencia negativa

Como ya pudimos observar estos códigos cumplen su función específica, sin embargo, hablaremos más detalladamente de cada codificación como tal:

#### **3.3.2.3.1. Protección 24 (sobreexcitación)**

La sobreexcitación del transformador ocurre cuando el nivel de voltios por Hertz aumenta, ocasionando sucesos inadecuados para el sistema tales como (Gers J. , 2013):

- Rechazo de la carga
- Voltaje defectuoso
- Soporte reactivo
- Disyuntores y protección de líneas defectuosas
- AVR del generador averiado
- Practicas operativas deficiente en la plata de energía
- A medida que empieza a saturarse el transformador este crea un 5to armónico
- La corriente que ingresa al transformador es menor que la corriente que sale debido a la saturación

### 3.3.2.3.1.1. Características principales de la sobreexcitación

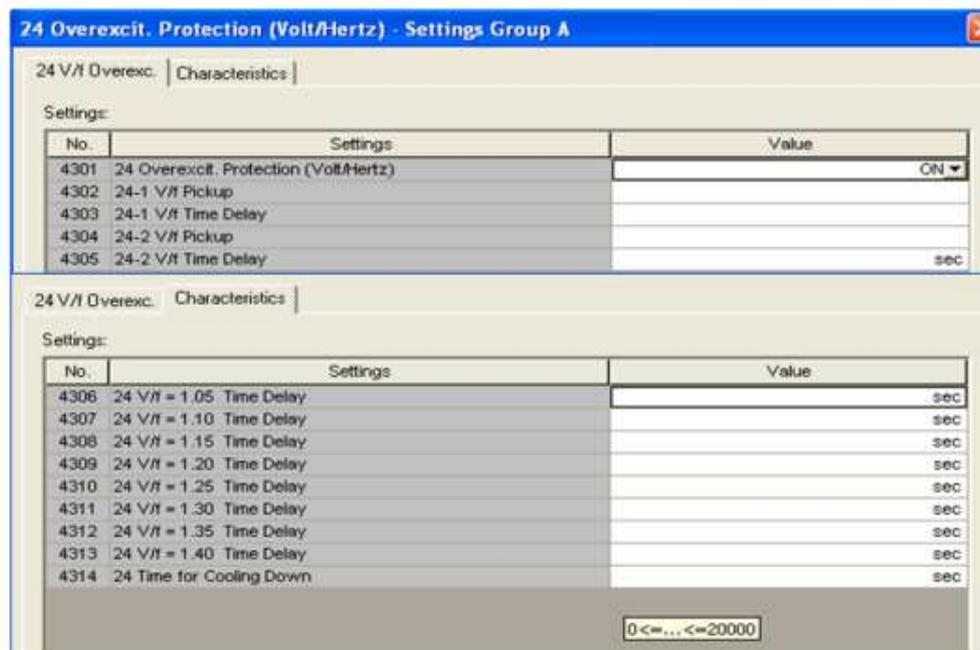
Dentro de las características principales del ajuste de sobreexcitación podemos destacar las siguientes:

- Responde al exceso de flujo V/Hz
- Limites operativos constantes
- Basado en la normativa ANSI C37.106 y C57.12
- Sus curvas son inversas.

### 3.3.2.3.1.2. Criterio de Ajuste de la protección 24

A continuación, en la fig. 31 visualizamos la pantalla del panel de ajuste de un relé multifuncional, utilizando la protección de sobreexcitación ANSI 24, para esto mediante una tabla describiremos cada una de las funciones que tiene esta protección.

Figura 31.  
Panel de ajuste de protección 24



| No.  | Settings                              | Value |
|------|---------------------------------------|-------|
| 4301 | 24 Overexcit. Protection (Volt/Hertz) | ON    |
| 4302 | 24-1 V/f Pickup                       |       |
| 4303 | 24-1 V/f Time Delay                   |       |
| 4304 | 24-2 V/f Pickup                       |       |
| 4305 | 24-2 V/f Time Delay                   | sec   |

| No.  | Settings                 | Value |
|------|--------------------------|-------|
| 4306 | 24 V/f = 1.05 Time Delay | sec   |
| 4307 | 24 V/f = 1.10 Time Delay | sec   |
| 4308 | 24 V/f = 1.15 Time Delay | sec   |
| 4309 | 24 V/f = 1.20 Time Delay | sec   |
| 4310 | 24 V/f = 1.25 Time Delay | sec   |
| 4311 | 24 V/f = 1.30 Time Delay | sec   |
| 4312 | 24 V/f = 1.35 Time Delay | sec   |
| 4313 | 24 V/f = 1.40 Time Delay | sec   |
| 4314 | 24 Time for Cooling Down | sec   |

Nota: en esta imagen se muestra la pantalla de un relé multifuncional cuya función tiene proteger mediante la protección ANSI 24. Tomado de (Ceballos, 2014).

**Tabla 12.****Descripción de los ajustes de contenidos de la función de protección ANSI 24**

| N°            | Descripción  |
|---------------|--|
| 4301          | Para activar la protección 24 seleccione (ON), desactivarla seleccione (OFF).  |
| 4302          | Primer ajuste de sobreexcitación. Una vez superado este umbral de sobreexcitación (4302) se habilita la característica de tiempo inverso. También, se activa una alarma para aviso con un tiempo de retardo. (4303)        |
| 4303          | Primer ajuste de tiempo, el cual inicia una vez superado el primer ajuste de V/Hz (4302). Cuando se termina el tiempo de retardo se activa la alarma para dar aviso a los operarios sobre la condición de sobreexcitación. |
| 4304          | Segundo ajuste de sobreexcitación. Este umbral se configura normalmente en valores altos de V/Hz. Una vez superado este umbral de sobreexcitación (4304) se emite disparo con un tiempo de retardo (4305).                 |
| 4305          | Segundo ajuste de tiempo asociado al segundo ajuste de V/Hz (4304).  |
| 4304-<br>4313 | Ocho ajustes de tiempo de retardo asociados a los ocho valores de V/Hz que conforman la característica de tiempo inverso.  |
| 4314          | Ajuste de tiempo de enfriamiento medida en segundos.   |

Nota: en esta tabla se hace referencia la descripción de los ajustes de la protección ANSI 24 que se pueden observar en la figura 31. Recuperado de (Ceballos, 2014).

De acuerdo con (Ceballos, 2014), la configuración de los niveles de protección para la función 24 debe ser basada en las curvas límite V/Hz de las máquinas a proteger, en el caso de no obtener aquella información, se deberá tener en cuenta los límites V/Hz de las normas correspondientes aquellas que veremos a continuación en la siguiente tabla.

**Tabla 13****Límites V/Hz de las normas establecidas**

| Generador                 | Transformador                  |
|---------------------------|--------------------------------|
| Basado en las normas ANSI | Basado en las normas IEEE Std. |

| C50.13                               | C57.1200  |
|--------------------------------------|---|
| V/ Hz= 105% en la base del generador | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Con carga: {F. P<math>\geq</math>80% atrasado, <math>f\geq 95\%f_n</math>, V/Hz=105%} (en la base del secundario).</li> <li>• Sin carga: {V/Hz=100%} (en la base del secundario).</li> </ul> |

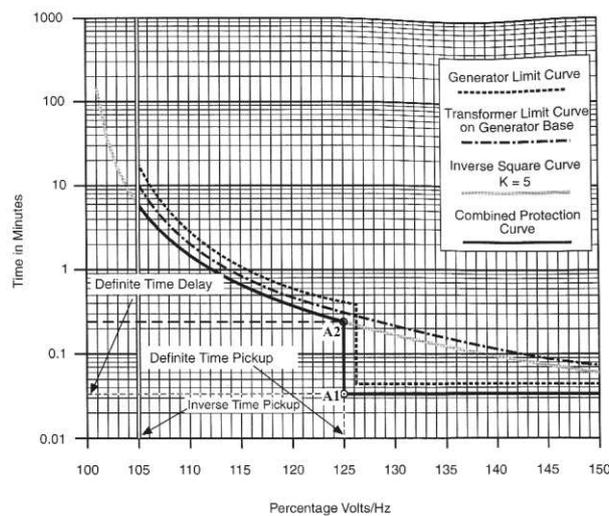
Nota: esta tabla nos indica los límites establecidos en las normas correspondientes, estas normas se establecen en el caso de que no se obtengan los valores de la curva límite de las maquinas a proteger. Recuperado de: (Ceballos, 2014)

En el caso de los transformadores cuya norma es IEEE Std C37.106, esta presenta los valores de los límites máximos de operación normal o continua donde los transformadores o generadores pueden llegar a tolerar sin causar daños.

### 3.3.2.3.1.3. Curva de sobreexcitación en el transformador de potencia

A continuación, se observa una curva de sobreexcitación las cuales son normalmente inversas y disponibles para valores sobre el máximo permitido de constantes.

**Figura 32.**  
**Curva de sobreexcitación.**



Nota: a continuación, observamos la curva de sobreexcitación que ocurre en un transformador de potencia. Tomado de (Gers J., 2013).

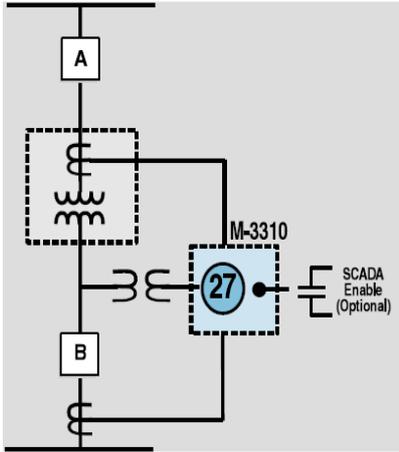
### 3.3.2.3.2. Protección 27 (Subtensión)

La protección de tensión mide permanentemente la corriente de cada fase con la finalidad de detectar las tensiones que son mayores o menores que las del rango normal de operación. Si las tensiones son menores que las del rango establecido se tiene una protección de Subtensión o mínima tensión (Coes Sinac, 2015).

La protección de Subtensión se utiliza para generar alarmas y el disparo del interruptor automático cuando sea necesario. Además, la supervisión constante de las tensiones de fase a fase o de fase a neutro permite iniciar medidas apropiadas para salvaguardar el funcionamiento de la instalación durante situaciones anormales o críticas (por ejemplo, deslastre de cargas, cambio de fuente y arranque del generador de emergencia). (Protecciones Schneider Electric, 2021).

A continuación, se muestra mediante un diagrama el esquema del desprendimiento de la carga por Subtensión.

**Tabla 14.**  
**Esquema y características del uso de la protección de Subtensión**

| CARACTERISTICAS  | ESQUEMA DE PROTECCIÓN   |
|--|---|
| <p>Se usa para arrojar la carga cuando el sistema de energía no tiene suficiente apoyo, similar a la subfrecuencia.</p> <p>Relé de voltaje permitido para operar n una banda fija.</p> <p>Su lógica también puede ser utilizada para bloquear el funcionamiento del LTC.</p> |  <p>El diagrama muestra un sistema de energía con bobinas de reactancia y un relé M-3310. El relé está conectado a un terminal SCADA Enable (Optional). El relé M-3310 tiene un símbolo de protección 27 (Subtensión) y está conectado a un sistema de energía que incluye bobinas de reactancia y un interruptor automático (A y B).</p> |

Nota: en la siguiente tabla mostramos el Esquema y características del uso de la protección de Subtensión recuperado de (Gers, 2013).

Los relés de tensión 27 son ajustados generalmente en el 85% de la tensión nominal y los relés de sobrecorriente son calibrados para responder a corrientes del 50% o menos de la corriente mínima vista desde la energización accidente.

### 3.3.2.3.2.1. Criterio de Ajuste de la protección 27 ANSI

Para el ajuste de la protección 27 se deben establecer dos estados: el primero de alarma, este estado funcionara cuando esta protección empieza a detectar la caída de tensión y el otro estado es el de disparo o Trip, el cual realiza acoples en la protección (Mejia, 2015).

- Ajuste de alarma

Para ajustar la alarma se le deberá aplicar al voltaje nominal el 90% y así se obtiene el primer valor de la caída de tensión a continuación una formula que lo demuestra:

$$Voltaje_{prim_{90\%}} = 0.9 * V_N \quad (6)$$

Luego con la relación de transformación del transformador de potencial TP, el voltaje establecido en la siguiente ecuación, el cual será relacionado como el voltaje secundario:

$$V_{SEC_{90\%}} = \frac{V_{prim_{90\%}}}{RTP} \quad (7)$$

Sin embargo, el voltaje con el cual debe realizarse el aviso de alarma del relé debe ser menor al que se calcule al 90% del secundario y el tiempo de esta manera se activara la alarma, el tiempo en el que se debe activar la alarma es el siguiente:

$$t = 2 \text{ seg} \quad (8)$$

- Ajuste de disparo

Al igual que el anterior para obtener el primer voltaje de caída de tensión se utiliza su voltaje nominal, pero esta vez se le aplicara el 80% a su valor nominal.

$$Voltaje_{prim_{80\%}} = 0.8 * V_N \quad (9)$$

Luego con la relación de transformación del transformador de potencial TP, el voltaje establecido en la siguiente ecuación, el cual será relacionado como el voltaje secundario

$$V_{SEC_{80\%}} = \frac{V_{prim_{80\%}}}{RTP} \quad (10)$$

Sin embargo, el voltaje con el cual debe realizarse el aviso de alarma del relé debe ser menor al que se calcule al 90% del secundario y el tiempo de esta manera se activara la alarma, el tiempo en el que se debe activar la alarma es el siguiente:

$$t = 5 \text{ seg} \quad (11)$$

### 3.3.2.3.3. Proteccion 46 (Proteccion sobrecorriente de secuencia negativa)

Esta protección mide la cantidad de corriente desbalanceada en la linea de distribución, quiere decir que el elemento de secuencia negativa mide la cantidad de corriente de secuencia negativa en el sistema, el cual puede ser ajustado para enganche justo por arriba del máximo nivel de corriente de secuencia negativa producido por un desbalance de la carga monofásica.

En el laboratorio de potencia de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, cuenta con el aparato de control de potencia de la marca ABB PCD 2000 el cual es mucho más sensitivo a fallas fase a fase donde el

elemento 46 se puede activar o desactivar en los grupos de ajustes, ya sea primario, alterno 1 o alterno dos (Leon G. , 2019).

Este elemento de secuencia negativa se puede usar también para detectar fallas fase a tierra y fase a fase a tierra, pero siempre ocurren condiciones de desbalance en asociación con tierra.

**Figura 33.**  
**Ajustes de la protección 46**

| Setting (ajuste) 46 (Insc>)  | Descripción  |
|--|--|
| 46 Curve Select<br>(seleccionar curva)<br>Insc> Curve (curva)                                  | Selección de la función de sobrecorriente temporizada usada para calcular el retardo de tiempo entre enganche y disparo (Ver la Tabla 5-19 siguiente para detalles). Note que el Reset Mode (modo reponer) también puede afectar el retardo de tiempo (ver página 5-44)                                    |
| 46 Pickup Amps (enganche amp)<br>Insc> Amp   | El elemento 46 enganchará cuando la corriente medida en el secundario del TC aumenta sobre el valor especificado. El rango de ajuste e incremento dependen de la configuración del módulo de TV/TC (ver página 1-16)   |
| 46 Time Dial/Delay<br>(dial tiempo.retardo)<br>Insc> Time Multiplier<br>(multiplicador tiempo) | Un valor especificado que es una variable en la función de curva de sobrecorriente temporizada. Ver la Tabla 5-19 siguiente para detalles  |
| 46 Time-Curve Adder<br>(incrementador tiempo-curva)  | Un retardo de tiempo fijo adicional incrementado al retardo de tiempo, resultante de los ajustes 46 Curve Select (seleccionar curva) y Time Dial (dial tiempo). Este ajuste no está disponible cuando se usen curvas IEC. El rango de ajuste es de 0.00 a 2.00 segundos con un incremento de 0.01 segundos |
| 46 Minimum Response<br>(respuesta mínima)  | El retardo mínimo de tiempo que ocurrirá entre el enganche y disparo, aún si el retardo de tiempo basado en la curva de sobrecorriente temporizada sea más pequeño. El rango de ajuste es de 0.00 a 2.00 segundos con un incremento de 0.01 segundos   |

Nota: Ajustes de la protección 46. Tomado de (ABB, 2012).

Hay dos modos seleccionables disponibles de reposición para el elemento 46. El modo instantáneo se usa para coordinar con otros aparatos de reposición instantánea, tales como relés basados en microprocesadores. En el modo instantáneo, el 46 se repondrá cuando la corriente caiga por debajo del ajuste de enganche durante medio ciclo. El modo retardado simula la acción de un relé de disco de inducción electromecánico. En este modo, la reposición del 46 sigue una característica de reposición lenta que depende de la duración de la condición de sobrecorriente y de la magnitud de la corriente de carga circulando después del evento (ABB, 2012).

### 3.3.2.3.3.1. Criterio de Ajuste de la protección 46

Los relés de corriente de secuencia negativa operan con una característica de tiempo inverso según una expresión cuadrática que es la siguiente:

$$\left(\frac{I_2}{I_N}\right)^2 * t = K \quad 12$$

Donde:

$I_2$  = corriente de secuencia negativa

$I_N$  = corriente nominal de la máquina

t = tiempo

K = constante de la máquina

Sin embargo, los ajustes del relé deben ser efectuados según las recomendaciones del fabricante del generador o del transformador, donde se deben considerar los dos niveles de actuación tales como, Alarma y Disparo.

A continuación, en la siguiente tabla se visualizarán los valores típicos de la protección ANSI 46.

**Figura 34.**  
**Ajuste del relé de secuencia negativa ANSI 46**

| Característica  | Nivel Alarma | Nivel Disparo |
|---|--------------|---------------|
| Corriente no balanceada permisible<br>Valores referidos a los indicados en la Tabla 2.4 | 80%          | 100%          |
| Temporización de la operación   | 5 segundos   | 10 segundos   |
| Tiempo de reposición  | 240 segundos | 240 segundos  |

Nota: Ajustes de la protección 46. Tomado de (Coes Sinac, 2015).

#### 3.3.2.3.4. Protección 49 (Sobrecarga Térmica)

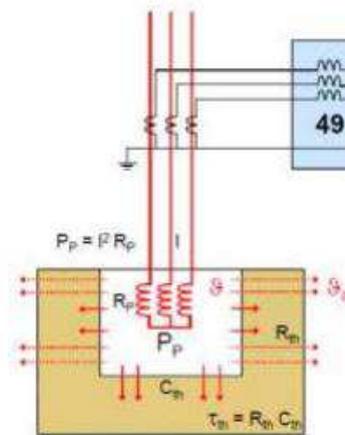
El funcionamiento de esta protección consiste en controlar las corrientes que circulan a través del transformador, el cual es influenciado sobre un bloque bimetálico el cual ofrece constantes de tiempo hasta su actuación.

La protección de sobrecarga térmica contempla las siguientes características:

- Proteger los componentes de la planta, tales como motores, generadores, transformadores, entre otros, contra las sobrecargas térmicas.
- Supervisa el estado térmico de elementos de las subestaciones, tales que fueron mencionados en el apartado anterior.
- Permite calcular la sobret temperatura a partir de las intensidades de fase según modelos términos equivalentes a un cuerpo homogéneo observar la ecuación 8.

Podemos concluir que la función de imagen térmica detecta y supervisa el estado térmico del elemento protegido y lo protege.

**Figura 35.**  
**Proteccion de sobrecarga térmica.**



Nota: en la figura 35 se muestra un diagrama de la protección de sobrecarga térmica. Tomado de (Amparo, 2016).

En la fig. 35 podemos observar un diagrama de la sobrecarga térmica, donde la intensidad circula por el devanado del equipo eléctrico en funcionamiento, el cual pierde potencia en el devanado de la resistencia en forma de calor, parte del devanado calienta la máquina según su capacidad térmica y la otra parte se evacua al exterior según su resistencia equivalente. (Amparo, 2016).

De acuerdo con la figura 35 se pueden destacar las siguientes ecuaciones.

- Potencia disipada

$$P_p = I^2 * R_p \quad 13$$

- Constante térmica de la maquina

$$\tau_{th} = R_{th} * C_{th} \quad 14$$

Por lo tanto, el calentamiento de la maquina electrica se rige mediante la ecuación diferencial:

$$P_p = C_{th} * \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{\vartheta - \vartheta_a}{R_{th}} \quad 15$$

Donde:

$\vartheta$  es la temperatura de la máquina.

$\vartheta_a$  es la temperatura del ambiente exterior o del medio refrigerante.

#### **3.3.2.3.4.1.Criterio de Ajuste de la protección 46**

Esta protección opera simulando el calentamiento del elemento protegido, en función de la corriente que circula por este elemento.

De acuerdo con (Coes Sinac, 2015), para el criterio de ajuste se debe considerar los siguientes puntos:

- El ajuste de la constante de tiempo de la máquina debe ser efectuado según el fabricante del equipo.
- El valor de la corriente de arranque debe ser por lo menos 15% encima de la corriente nominal; es decir, corrientes menores al 115% son permisibles en forma permanente.

- Se debe considerar dos niveles de ajuste de actuación que corresponden a Alarma y Disparo. El ajuste de alarma debe corresponder al 90% de la temperatura de disparo.

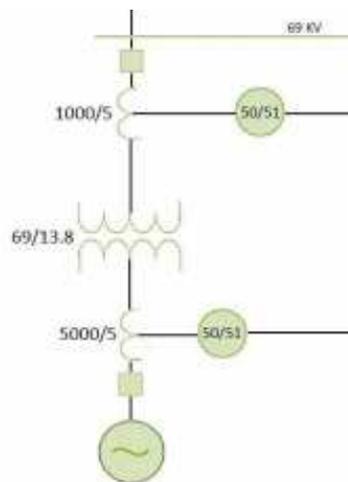
### 3.3.2.3.5. Protección 50/51 (Sobrecorriente de fase instantánea)

La protección de sobrecorriente mide permanentemente la corriente de cada fase con la finalidad de detectar las sobrecorrientes que se pueden producir en un cortocircuito. El tiempo de actuación de esta protección es una función del valor de la corriente y puede ser:

- De tiempo definido cuando se supera un umbral previamente calibrado. En este caso su operación puede ser instantánea (función 50) o temporizada (función 51).
- De tiempo inverso cuya operación depende del tiempo según una función exponencial.

**Figura 36.**

**Esquema de los ajustes de protección ANSI 50/51 de los transformadores de potencia.**



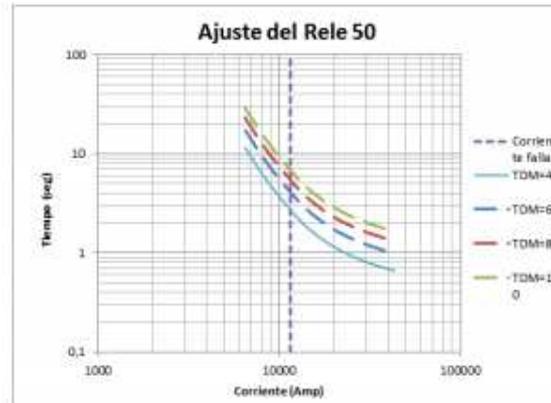
Nota: En la siguiente figura se muestra un esquema de las distintas protecciones ANSI 50/51. Tomado de (Roberto Figueroa, 2014).

En las curvas tiempo vs corriente, de la figura 35 podemos observar la coordinación de nuestro relé con un TDM=4, donde la línea celeste es la curva de coordinación y la línea punteada paralela al eje del tiempo sale de la corriente de falla  $I_{falla} = 11525 A$ , la misma que se ajusta a

su coordinación.

Figura 37.

Curva tiempo vs corriente, del ajuste 51 ANSI.



Nota: En la siguiente figura se muestra una curva en representación al ajuste 51 ANSI. Tomado de (Roberto Figueroa, 2014).

### 3.3.2.3.5.1. Criterio de Ajuste de la protección 50/51

Para el ajuste del relé se debe definir lo siguiente:

#### Para la función (51)

- La corriente de Arranque del Relé ( $I_s$ ) que viene a ser el umbral de la corriente de operación del relé.
- La constante de ajuste del Relé (TMS) que viene a ser el parámetro que permite definir los tiempos de operación según su curva característica

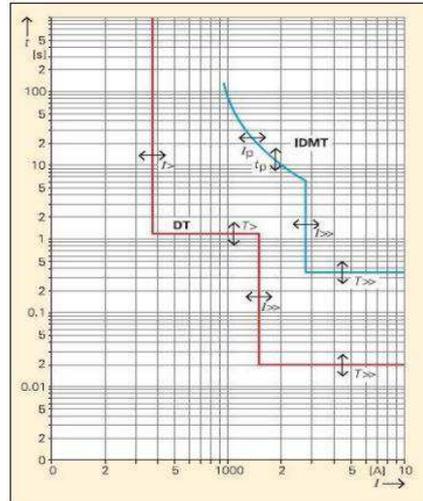
#### Para la función (50)

- La corriente de arranque del Relé ( $I_s$ ) que viene a ser el umbral de la corriente de operación del relé.
- A pesar que se trata de una función instantánea por definición (ANSI 50), es posible definir una temporización de su actuación cuando resulte conveniente

En la siguiente figura a continuación, se muestra los ajustes del relé de sobrecorriente de tiempo inverso (51) combinado con la función

instantánea (50) en comparación con un relé de sobrecorriente de tiempo definido con dos umbrales de operación (50/51). (CFE, 2019).

**Figura 38.**  
**Curva de ajuste de las protecciones 50 -51**



Nota: en la siguiente figura muestra los ajustes del relé de sobrecorriente. Tomado de (CFE, 2019).

### 3.3.2.3.6. Protección 50G/ 50N (Sobrecorriente instantánea de tierra y de neutro)

La protección 50 G / 50N es un elemento de sobrecorriente instantánea de tierra o residual, aplicado al dispositivo de control de potencia que se encuentra habilitado en el laboratorio de potencia de la facultad de ingeniería eléctrica, el nivel 1 de dicha protección es un múltiplo del elemento 51 el cual nos brinda una coordinación precisa, sin embargo este debe activarse cuando se desea un disparo instantáneo de tierra o residual donde el tiempo de operación del elemento 50N o 50 G debe ajustarse para operar igual o más rápido que el elemento anteriormente mencionado (51N).

El elemento 50N/ 50G puede ser activado o desactivado según los grupos de ajustes, primario, alterno 1 o alterno 2.

Este elemento de protección ajusta por defecto del fabricante según su tipo de operación, por ejemplo, el contacto Trip.

El 50N/50G siempre iniciara recierres a menos que el recierre se encuentre inhabilitado.

### 3.3.2.3.6.1.Criterio de Ajuste de la protección 50N/50G

En el caso de una falla monofásica mínima, actúa la protección 50 N / 50G y se considera el siguiente procedimiento de cálculo. (Mejia, 2015).

Donde la corriente de cortocircuito debe ser la mínima corriente monofásica a tierra y se calcula al veinte por ciento:

$$I = \frac{0.2 * I_{KIF.min}}{RTC} \quad (16)$$

El Trip de corriente o disparo es el valor aproximado o redondeado de I:

$$I_{trip} \approx I \quad (17)$$

El tiempo de actuación debe ser instantáneo a partir del tap, en este caso el tiempo de actuación será igual a 0.15 seg.

Figura 39.  
Ajustes de la protección 50N/50G

| Setting (ajuste) 50N-1 (IN>>1)  | Descripción  |
|---|--|
| 50N-1 Curve Select (seleccionar curva)<br>IN>> 1 Curve (curva)                              | Selección de la función de sobrecorriente temporizada usada para calcular el retardo de tiempo entre enganche y disparo (Ver la Tabla 5-11 siguiente para detalles). Note que el Reset Mode (modo reponer) también puede afectar el retardo de tiempo (ver página 5-44)                                      |
| 50N-1 Pickup (enganche)<br>IN>>1 / IN>  | El elemento 50N-1 enganchará cuando la corriente medida en el <b>secundario</b> del TC aumenta sobre el valor especificado. El valor es especificado como un múltiplo del ajuste de enganche 51N. El rango de ajuste es de 0.5 a 20.0 con un incremento de 0.1   |
| 50N-1 Time Dial/Delay (dial tiempo,retardo)<br>IN>>1 Time Multiplier (multiplicador tiempo) | Un valor especificado que es una variable en la función de curva de sobrecorriente temporizada. Ver la Tabla 5-11 siguiente para detalles  |
| 50N-1 Time-Curve Adder (incrementador tiempo-curva)   | Un retardo de tiempo fijo adicional incrementado al retardo de tiempo resultante de los ajustes 50N-1 Curve Select (seleccionar curva) y Time Dial (dial tiempo). Este ajuste no está disponible cuando se usen curvas IEC. El rango de ajuste es de 0.00 a 2.00 segundos con un incremento de 0.01 segundos |
| 50N-1 Minimum Response (respuesta mínima)   | El retardo mínimo de tiempo que ocurrirá entre el enganche y disparo, aún si el retardo de tiempo basado en la curva de sobrecorriente temporizada sea más pequeño. El rango de ajuste es de 0.00 a 2.00 segundos con un incremento de 0.01 segundos   |
| 50N-1 Curve Block Pickup (enganche de bloqueo de curva)                                     | El elemento 50N-1 no enganchará si la corriente es mayor que este ajuste. Use este ajuste para permitir que otro elemento de protección maneje corrientes de falla mayores. El rango de ajuste es de 1 a 20, o desactivado (por defecto)   |

Nota: Ajustes de la protección 50N/50G. Tomado de (ABB, 2012)

### **3.3.2.3.7. Protección 50BF (Fallo del interruptor)**

La protección fallo del interruptor, supervisa la desconexión del interruptor asignado y produce un disparo de reserva en el hipotético caso de una falla.

Esta protección se encuentra tanto en las funciones de protección internas del equipo o de las protecciones externas del mismo, comprobándose así mediante un criterio de intensidad o de contactos auxiliares si el interruptor se encuentra cerrado.

Si el interruptor se encuentra cerrado, la función produce un arranque e inicia la temporización, mientras esto ocurre se comprueba continuamente si el interruptor ha cambiado su estado de cerrado a abierto, si esto llegará a ocurrir la función se repone, en el caso de que el interruptor no haya abierto la función produce un disparo después de transcurrir el tiempo de temporización. Con el cual el inicio de la función se efectúa por las funciones de la protección interna del equipo o externamente.

#### **3.3.2.3.7.1. Criterio de Ajuste de la protección 50BF**

Según (Coes Sinac, 2015) se recomienda aplicar dos filosofías de protección falla interruptor ambas basadas en la medición de la corriente que circula por el interruptor.

En líneas de Transmisión el nivel de corriente de arranque de la protección falla interruptor debe ajustarse encima de la corriente máxima de carga y menor que la corriente mínima de falla en el extremo remoto.

En transformadores, reactores el ajuste del relé 50BF debe ser el valor más pequeño posible para lo cual se puede utilizar un valor entre el 10% a 20% de la corriente nominal del circuito.

Considerando lo planteado por (Coes Sinac, 2015), en el caso de que se produzca una falla se debera proceder de la siguiente manera

- En primera instancia (función 50BF1) se debe efectuar una orden de apertura a ambas Bobinas de Apertura del Interruptor. Este tiempo debe ser definido considerando un margen de actuación sobre la protección principal y no debe interferir con los recierres automáticos.
- En segunda instancia (función 50BF2) se debe proceder con la apertura de los Interruptores vecinos de manera que se pueda obtener la apertura del circuito deseado, al mismo tiempo que se consigue aislar al Interruptor fallado

### 3.3.2.3.8. Proteccion 51G (Sobrecorriente de tiempo inverso)

Para el ajuste 51G o protección de sobrecorriente de tiempo inverso a tierra del transformador, el valor censado en la entrada correspondiente al valor de la corriente del neutro es el desbalance de fases por la carga del transformador.

**Figura 40.**  
**Ajustes para la protección 51G.**

|                | TRANSFORMADORES<br>1A Y 1B | TRANSFORMADORES<br>2A Y 2B |
|----------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>51G</b>     |                            |                            |
| Input:         | RMS                        | RMS                        |
| Pickup:        | 0.600 pu                   | 0.600 pu                   |
| Curve:         | IAC Very Inv               | IAC Very Inv               |
| TD Multiplier: | 6.00                       | 6.00                       |

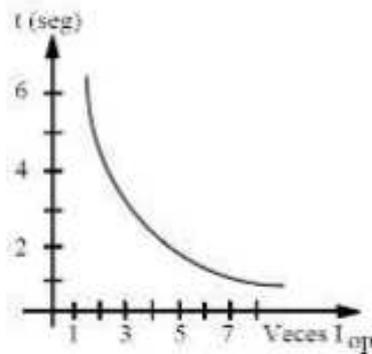
Nota: Ajustes para la protección 51G. Tomado de (Gil, 2015)

### 3.3.2.3.9. Proteccion 51N (Sobrecorriente de tiempo inverso neutral)

La protección de sobrecorriente de tiempo inverso neutral, opera en un tiempo en función del valor de la corriente, para corrientes elevadas dicha protección actuará en tiempos inferiores que, para corrientes

bajas, es decir que mientras mayor sea la corriente aplicada, menor es el tiempo de operación

**Figura 41.**  
**Curva de la protección de sobrecorriente de tiempo**



Nota: Curva de la protección de sobrecorriente de tiempo inverso.

Recuperado de (Amparo, 2016).

Por lo general es muy utilizado curvas de tipo “mixto” con uno o varios umbrales de tiempo definido para corrientes elevadas y una curva de tiempo dependiente.

Dentro de los requerimientos más específicos de la función de la sobrecorriente del transformador para su correcta aplicación, se enumeran los siguientes criterios:

- Cada relé debe de disponer de tres unidades de fase y una de neutro, no direccionales
- Las unidades de medida deben disponer de elementos instantáneos y temporizados para la selección de características de tiempo inverso según las normativas ANSI e IEC, la selección de la curva de actuación y regulación continua intermedia entre las mismas deben ser ajustables en un rango de 1-50 A.

### **3.3.2.3.9.1. Criterio de Ajuste de la protección 51N**

En condiciones de operación normal la corriente que pasa por el neutro es muy pequeña (en relación a la de fase), de tal modo que puedo

ajustar un elemento 51 que responda a mi corriente de neutro con una  $I_p$  menor a la de fase, sin embargo cuando se reduce la  $I_p$ , se dice que la proteccion se hace más sensible.

Cabe recalcar que tener en cuenta que este elemento 51N solo responde a fallas de tierra, no a fallas de fase.

**Tabla 15.**  
**Criterios de ajuste de la protección ANSI 51N**

| Datos           | Descripción   |
|-----------------|---|
| $I_p$           | Mi ajuste de neutro puede ser un valor más pequeño que el de fase, es práctica común expresar la $i_p$ como un fracción del de fase (50% del ajuste de fase p.e.) |
| $T_d$           | El dial de tiempo de neutro debe garantizar que la curva neutro sea mas rápida que la curva fase.   |
| Curva de neutro | La curva de neutro, no necesariamente debe ser igual a la de fase, pero por simplicidad es recomendable que se calibre así.                                       |

Nota: En esta tabla se muestran los criterios de ajuste de la protección 51N en referencia a los transformadores de potencia. Tomado de (Sergio, 2013).

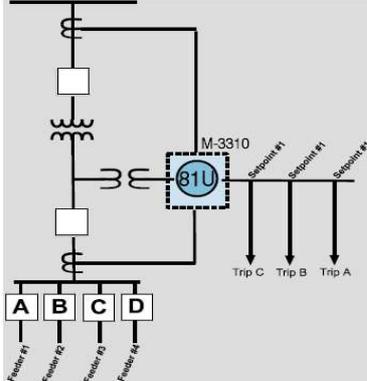
### 3.3.2.3.10. Protección 81U (Subfrecuencia)

La protección 81 U o de subfrecuencia es la encargada de supervisar la frecuencia cuando el sistema alcanza el umbral  $F_{min}$ , donde la protección lo detecta y se inicia el retardo de tiempo  $t_{Fim}$ .

A continuación, se muestra mediante un diagrama el esquema del desprendimiento de la carga por baja frecuencia.

**Tabla 16.**

**Esquema y características de la protección 81U**

| CARACTERISTICAS   | ESQUEMA DE PROTECCION  |
|---|--|
| <p>Contiene tres puntos de ajuste de subfrecuencia y tiempo de demora.</p> <p>Configuración independiente de frecuencia de captación y tiempo de retardo.</p> <p>Los puntos de ajustes se pueden programar a cualquiera de los ocho contactos de salida de disparo.</p> |  |

Nota: Esquema y características de la protección 81U. Recuperado (Gers, 2013)

### 3.3.2.3.10.1. Criterio de Ajuste de la protección 81U

La protección cuenta con varias condiciones de ajustes para la protección de baja frecuencia.

**Figura 42.**

**Condiciones de operación de protección de baja frecuencia.**

| Operación           | Frecuencia        |
|---------------------|-------------------|
| Continua            | 59.5 Hz – 60.5 Hz |
| Hasta 50 minutos    | 58.5 Hz – 59.5 Hz |
| Hasta 10 minutos    | 57.5 Hz – 58.5 Hz |
| Hasta 3 minutos     | 57.2 Hz – 57.8 Hz |
| Operación Prohibida | 57.2 Hz           |

Nota: Condiciones de operación de protección 81U. Recuperado (Napoleon Navarrete, 2015)

Si la operación llegase a ser más de 57,2 Hz se recomienda realizar los siguientes ajustes:

**Tabla 17.**

**Criterio de ajuste para la protección 81U**

| Elemento   | Ajuste  |
|------------|---|
| Elemento 1 | Frecuencia de arranque 59.2 Hz.<br>Tiempo de retraso 10 min.  |
| Elemento 2 | Frecuencia de arranque 58.4 Hz.<br>Tiempo de retraso 1.5 min. |
| Elemento 3 | Frecuencia de arranque 57.7 Hz.<br>Tiempo de retraso 30 s.    |
| Elemento 4 | Frecuencia de arranque 57.1 Hz.<br>Tiempo de retraso 0.167 s. |

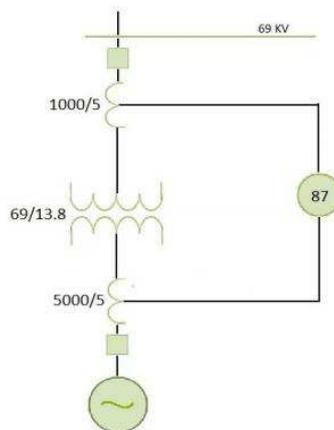
Nota: Condiciones de operación de protección 81U. Recuperado (Napoleon Navarrete, 2015)

### 3.3.2.3.11. Protección 87T (Protección Diferencial)

A continuación, se presenta un esquema de la protección diferencial en transformadores, recalcando que este tema se profundizara en el apartado 3.5.

**Figura 43.**

**Esquema de la protección diferencial en transformadores.**

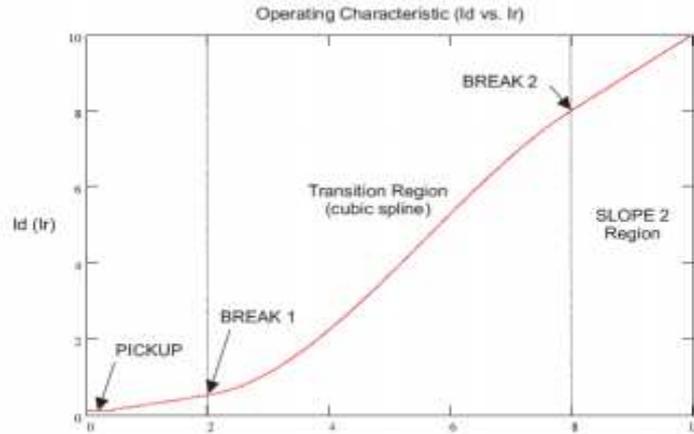


Nota: Esquema de la protección diferencial en transformadores. Tomado de (Roberto Figueroa, 2014).

El cálculo de la corriente diferencial y de restricción para el uso del elemento diferencial porcentual se describe a través del diagrama de bloque, donde  $\Sigma$  tiene como salida la suma vectorial de las entradas de la magnitud máxima.

Mientras que la corriente de restricción se calcula como el máximo de las mismas corrientes compensadas internamente.

**Figura 44.**  
**Curva características del relé 87T**



Nota: Curva características del relé 87T. Recuperado de (Roberto Figueroa, 2014).

#### 3.3.2.3.11.1. Criterio de ajuste

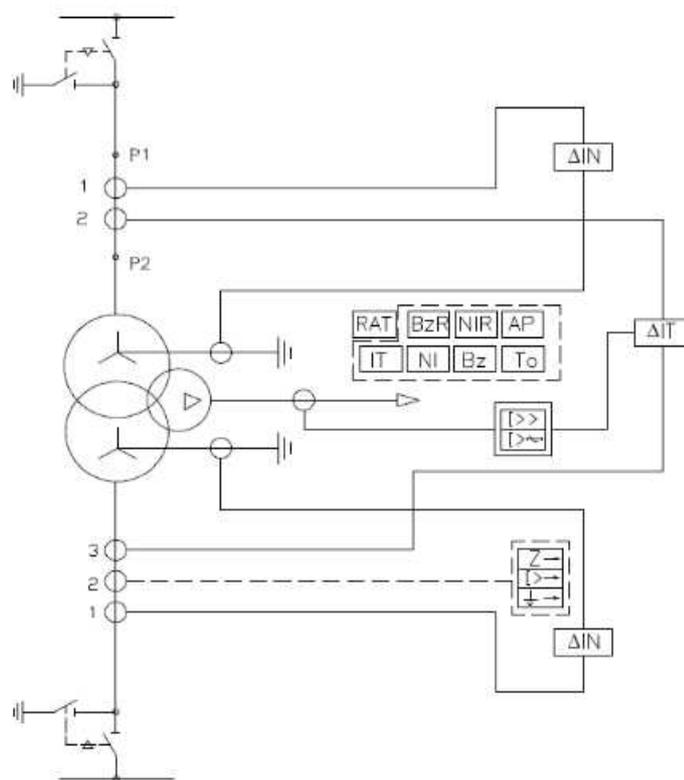
A continuación, se muestran los ajustes de la protección 87T. (Selvas, 2018)

- Ajustar pickup al 30% del valor de la máxima capacidad del transformador.
- Primer pendiente justar al 30% para cubrir errores de relación de TC's y por variaciones de relación primaria por el cambiador de derivaciones.
- Segunda pendiente ajustar al 60%, aplicada a partir del 300% del valor de la capacidad del transformador, para cubrir los errores por saturación de los TC's a niveles altos de corrientes.
- Para el bloqueo por segunda armónica; ajustar al 15%, para evitar operaciones incorrectas por energización con corrientes de inrush.
- En la quinta armónica; ajustar al 35% para evitar operaciones incorrectas por alta corriente provocada por sobre excitación.
- Se debe bloquear la protección de manera independiente por fase al detectar armónicos.

### 3.4. Diagramas unifilares de protección para un transformador de potencia

A continuación, en la figura 41 podremos observar un diagrama unifilar de las protecciones del transformador de potencia en donde observamos las distintas protecciones del transformador de potencia adicional la tabla 15 nos permite identificar mediante su simbología de cada protección que se encuentra en el diagrama unifilar.

**Figura 45.**  
**Diagrama unifilar de las protecciones de un transformador de potencia**



Nota: Diagrama unifilar de las protecciones de un transformador de potencia. Tomado de (Pablo E, 2010).

**Tabla 18.**

**Identificación de las protecciones del diagrama unifilar de la fig. 41**

|     |                            |     |                                  |
|-----|----------------------------|-----|----------------------------------|
| NIR | Nivel de aceite bajo carga | Bz  | Relé Buchholz                    |
| AP  | Alivio de precisión        | To  | Termómetro de contacto           |
| IT  | Imagen Térmica             | IN  | Diferencia de tierra Restringida |
| NI  | Nivel de aceite            | IT  | Diferencial del transformador    |
| Z   | Protección de impedancia   | I>> | Instantáneo de Sobrecorriente    |
| I>  | Sobre corriente de fase    | I>  | Temporizador de                  |

|  |  |  |                |
|--|--|--|----------------|
|  | direccional<br>Sobrecorriente de tierra<br>direccional |  | Sobrecorriente |
|--|--|--|----------------|

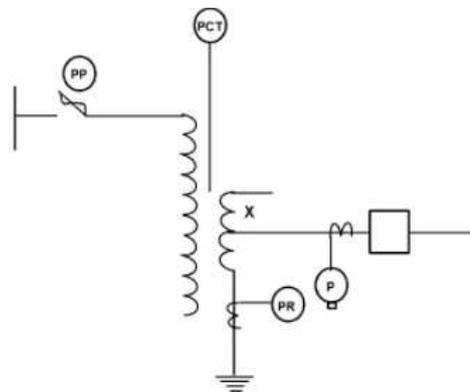
Nota: se muestra la identificación de las protecciones del diagrama unifilar de la fig. 41. Recuperado de (Pablo E, 2010)

### 3.4.1. Esquema de protecciones para transformadores de potencia de 1 MVA a 10 MVA de dos devanados con conexión DELTA-ESTRELLA

A continuación, se muestra en la figura 42 un esquema de protección de transformadores de potencia de 1 MVA a 10 MVA de dos devanados.

Figura 46.

*Esquema de protección de transformadores de dos devanados de 1 a 10 MVA.*



Nota: Esquema de protección de transformadores de dos devanados de 1 a 10 MVA. Tomado de (Selvas, 2018)

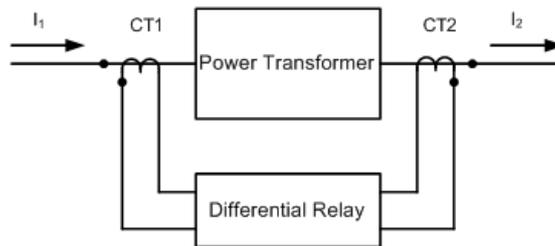
Donde la variante X se considera como identificación del devanado de baja tensión. Y la letra H se utiliza para identificar el devanado de alta tensión.

### 3.5. Protección diferencial de los transformadores de potencia (ANSI 87)

Este tipo de protección se utiliza comúnmente en transformadores de 10 MVA en adelante. La cual resulta ser la más adecuada en detectar fallas ya sea en el interior del transformador como en el exterior de sus condiciones externa. (ManuelVieria, 2016).

Figura 47.

Esquema de un transformador monofásico utilizando Relé diferencial



Nota: Esquema de un transformador monofásico utilizando Relé diferencial. Tomado de (ManuelVieria, 2016).

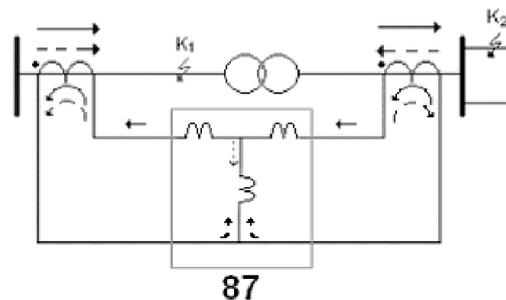
En el caso de transformadores de baja y mediana potencia se utiliza el Relé Buchholz únicamente debido a que es el único procedimiento sensible y capaz de intervenir rápidamente en caso de que ocurra una falla interna en el transformador, mientras que para los transformadores de gran potencia se utilizan ambas protecciones, esto se debe por ser un transformador de potencia y su importante desempeño en el sistema eléctrico, sin dejar a un lado también sus elevados costos tanto de mantenimiento, reparación o pérdidas.

La protección diferencial, está basada en la comparación de la corriente en ambos lados del transformador adaptándolas en magnitud y ángulo de fase para finalmente compararlas en el relé de protección. En la figura 43 a continuación podemos observar una conexión de un relé diferencial utilizado como protección de un transformador monofásico, sin embargo, para un transformador trifásico este trata cada fase de manera individual utilizando la misma forma que la fig. 44.

Cuando se sobrepasa una relación ajustable entre la intensidad de paso y la diferencial, el relé actúa.

Figura 48.

Esquema de un relé diferencial en un transformador de potencia

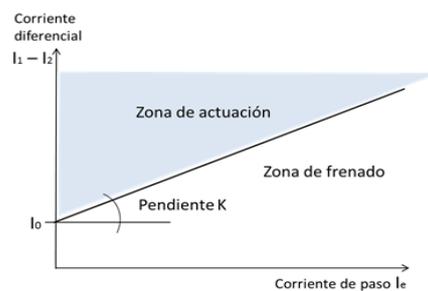


Nota: Esquema de un relé diferencial en un transformador de potencia. Tomado de (Orlys E. , 2005)

Actualmente un relé diferencial va provisto de retención con pendiente porcentual y bloqueo en el segundo y quinto armónico. Esto quiere decir que dicha pendiente distingue con precisión entre faltas internas y externas del transformador mientras que la función de bloqueo de armónicos logra retener con una determinada temporización la sobreintensidad de origen externo, evitando disparos intempestivos a consecuencias de corrientes transitorios magnetizante, siendo este su objetivo principal.

Un ejemplo claro y significativo es cuando se conecta el transformador a la red en vacío, es decir que definitivamente el relé de protección diferencial no debería funcionar ni en el momento de la conexión del transformador ni en el caso de cortocircuitos externos o como mayormente se la conoce corrientes pasantes. Sin embargo, este relé si debe actuar de manera rápida y sensible a los defectos que ocurren dentro de su campo de acción delimitado por los transformadores de intensidad, tanto primarios como secundarios (Granero, 2015)

**Figura 49.**  
**Curva de la pendiente porcentual y bloqueo de armónicos**



Nota: Curva de la pendiente porcentual y bloqueo de armónicos.  
Tomado de (Granero, 2015).

La protección diferencial también detecta y despeja las fallas que se den dentro del aislamiento de los devanados del transformador. Una de las causas principales de estas fallas es la formación de arcos en el interior y fallas dentro del cambiador de derivaciones, sin embargo este tipo de protección no solo responde a fallas tipo fase a fase y fase a tierra sino también a las fallas entre espiras, a las fallas de fase a fase entre los devanados aunque estos son los menos comunes dentro de nuestras fallas, se considera falla interna a la que no constituye peligro inmediato a una falla incipiente la cual si no es detectada, con el tiempo, esta puede resultar una falla mayor y finalmente ser altamente peligrosa para el transformador (Samuel, s.f.).

Sin embargo, este elemento de protección tiene cierto margen de error y con el fin de que el relé no se dispare la corriente diferencial es comparada con la corriente de restricción, el cual es una corriente que pasa a través del transformador y cuando esta corriente aumenta, los errores de la corriente diferencial aumentan, reduciendo la sensibilidad del relé durante situaciones con altos valores de corriente, por ejemplo, durante una falla externa (Ángel, 2012).

A continuación, varias alternativas para calcular dicha corriente:

$$I_R = K |I_1 + I_2| \quad 18$$

$$I_R = K |I_1| + |I_2| \quad 19$$

$$I_R = \max (|I_1|, |I_2|) \quad 20$$

Siendo K una constante que por lo general es 0.5 o 1 (Ángel, 2012)

### **3.5.1. Ventajas de la protección diferencial**

De todo lo dicho anteriormente se pueden llegar a destacar sus principales ventajas:

- Proporciona detención de fallas de alta velocidad que puede reducir el daño debido al flujo de corrientes altas
- Ofrece aislamiento de alta velocidad del transformador que se encuentra en falla disminuyendo la duración del hundimiento momentáneo
- Determina con mayor precisión la ubicación de la falla.

### **3.5.2. Problemas comunes que se aplican en la protección diferencial**

A continuación, se dictan algunos de los problemas más comunes que son aplicados en la protección diferencial de los transformadores de potencia (Hartmann, 2018).

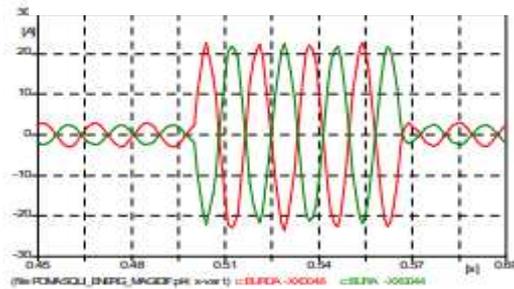
- Cuando la relación del transformador de corriente provoca un desajuste
- Desajuste de corriente inducido por LTC
- Transformación delta – estrella
- La eliminación de corriente de secuencia cero para fallas a tierras externas en devanados en estrella
- Fenómeno de irrupción y su desajuste de corriente resultante
- Contenido de armónicos disponible durante el periodo de irrupción debido a la conmutación de punto en onda
- Fenómenos de sobreexcitación y desajuste actual
- Problemas de sensibilidad de falla a tierra interna
- Saturación, remanencia y tolerancia de TC

### **3.5.3. Consideraciones básicas de la protección diferencial**

Con el fin de aplicar los principios de la protección diferencial a transformadores trifásicos, los siguientes factores deben ser tenidos en cuenta.

- Relación de transformación
- Conexiones del transformador
- Cambiador de derivaciones
- Corriente de Inrush y de magnetización

**Figura 50.**  
**Ondas durante su estado y falla estables**



Nota: Ondas durante su estado y falla estables.  
tomado de (TRANSELECTRIC, 2016).

Por otro lado debido que a los transformadores se los energiza comúnmente en vacío; este paso es la causante de varias fallas como por ejemplo las corrientes transitorias de energización conocida o más como la corriente de Inrush, este tipo de falla tendrá su magnitud la cual si se le permite el paso a la zona de operación provocará una señal falsa de operación del relé diferencial.

A su vez se debe tener en cuenta cuando se conecte en fuentes en paralelo debido a que este tipo de conexión tienen diferentes características de saturación lo que presentara a la entrada del elemento diferencial valores corruptos.

En conexiones paralelas puede que un TC sature correctamente mientras que el otro no, obteniendo como resultado una diferencia falsa debido a la combinación de TC de diferentes fuentes fuera del relé (Hartman, 2018).

#### **3.5.4. Tipo básicos de relés diferenciales de protección**

A continuación, se presentan los tres tipos básicos de protección diferencial más utilizados finalmente detallaremos sobre cada uno de dichos relés.

- Protección diferencial usando relés de sobrecorriente temporizados
- Protección diferencial usando relés diferenciales porcentuales
- Protección diferencial usando relés diferenciales porcentuales con restricción de armónicos

### 3.5.4.1. Protección diferencial utilizando relés de sobre corriente temporizados (ANSI 87T).

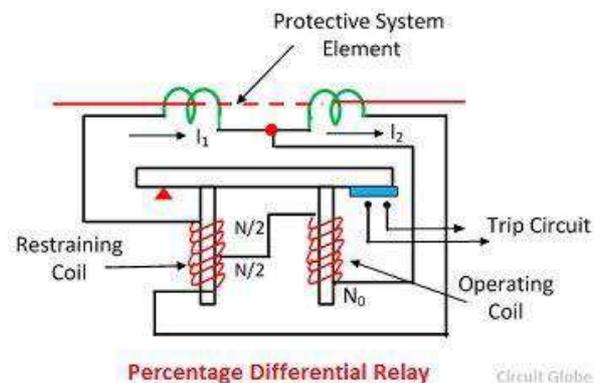
Este tipo de relé de sobre corriente son sin restricción, es decir que son poco usados en cuando a aplicaciones actuales, esto se debe a que son susceptibles al momento de operar mal debido a la corriente de magnetización o al más conocido “Inrush” esto quiere decir que cuando se realiza la energización del transformador hay errores de saturación o errores de disparidad.

### 3.5.4.2. Protección diferencial usando relés diferenciales porcentuales (ANSI 87GD)

Teniendo en cuenta a (Jaime, 2010) este tipo de protección dispone una restricción para evitar disparos indeseados ante las fallas externas debido a la disparidad en los transformadores de corriente, lo cual permite la incrementación de velocidad y de seguridad con una sensibilidad razonable para las corrientes de fallas bajas.

Este sistema consiste en una bobina de restricción la cual está conectada al cable piloto y la corriente inducida en ambos CT fluyendo a través de él, aquella bobina de operación se coloca entre el punto medio de la bobina de restricción, tal como se muestra en la fig. 31 (Illustrationprize, 2020).

Figura 51.  
Funcionamiento del Relé diferencial porcentual.



Nota: Funcionamiento del Relé diferencial porcentual. Tomado de (Illustrationprize, 2020)

#### **3.5.4.3. Protección 87HS (Diferencial de fase sin restricciones)**

Este tipo de ajuste se define como la unidad diferencial sin restricción, en donde su único ajuste de pickup se basa en ajustar 10 veces la corriente nominal del transformador, para cubrir las fallas de alta magnitud en el lado de alta tensión.

#### **3.5.4.4. Protección diferencial utilizando relés diferenciales porcentuales con restricción de armónicos (ANSI 87G).**

En el diseño de algunos relés diferenciales vienen añadido una restricción de armónicos, esto con la finalidad de evitar disparos indeseados los cuales son provocados por las corrientes de inrush. Se recomienda que en el momento de la práctica se utilicen la protección contra las fallas de cortocircuitos para cada uno de los transformadores que conforman el banco de transformador, o para transformadores de potencia que supere los 10 MVA.

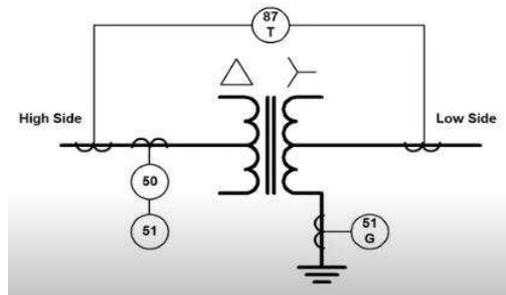
## CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE RELÉS DIFERENCIALES

### 4.1. Selección de la protección diferencial en función de la capacidad del transformador

La protección diferencial, como ya sabemos es utilizada únicamente para transformadores y es muy utilizada debido a su acción de protección rápida y eficaz, evitando daños en el transformador.

ANSI/IEE C37.91 es una guía que le permite al lector conocer sobre la aplicación de la protección diferencial para un transformador únicamente de potencia incluso sus lineamientos.

**Figura 52.**  
*Esquema referencial de la protección diferencial ANSI / IEE C37.91*



Nota: Esquema referencial de la protección diferencial ANSI / IEE C37.91. Tomado de (Hartmann, 2018).

En la fig. 51 podemos observar un esquema de la protección para un transformador de potencia, donde la protección principal, es la diferencial o (ANSI 87T) y en el lado de alta tensión del transformador siempre deberá tener una protección instantánea (ANSI 50) y protección de sobrecorriente instantánea de tiempo inverso (ANSI 51), y finalmente como en todos los casos normalmente siempre utilizaremos la protección del lado del neutro del transformador o (ANSI 51G) cumpliendo estas exigencias solo en el lado primario del transformador, sin embargo, en el lado del secundario, se dan protecciones de respaldo, por ejemplo en protecciones de las líneas o de barra, entre otras.

De acuerdo con (Jaime, 2010) la protección que se le da al transformador de la subestación será contra falla internas y contra sobrecalentamiento, en el caso de los transformadores conectados a barras de alto voltaje se instalará una protección diferencial total, con eso se trata de cubrir las fallas en las acometidas.

Los niveles de protección varían según el tipo de transformador, ya que, a mayor potencia, mayor grado se necesita debido a su importancia dentro del sistema eléctrico.

A continuación, en la tabla 18 clasificamos a los transformadores según su potencia, mediante grupos de grande, medianos y pequeños.

**Tabla 19.**

**Grupo de transformadores según su potencia**

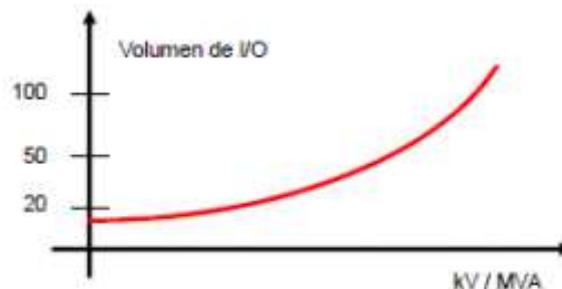
|          | S(MVA)           | U(kV)      | Aplicación                 |
|----------|------------------|------------|----------------------------|
| Pequeños | $5 < S < 40$     | $V < 145$  | Reductores y Elevadores    |
| Medianos | $40 < S < 250$   | $V > 72,5$ | Interconexión y Elevadores |
| Grandes  | $250 < S < 1000$ | Hasta 800  | Interconexión y Elevadores |

Nota: en la siguiente tabla, observamos una clasificación del grupo de transformadores según su potencia (Amparo, 2016).

A su vez, el nivel de tensión y potencia del transformador influyen de manera directa en el número de entradas y salidas que se deben considerar en el sistema de protección y control de la subestación (Amparo M. , 2016).

**Figura 53.**

**Curvas de entradas y salidas del sistema de protección en función de la potencia del transformador.**



Nota: Curvas de entradas y salidas del sistema de protección en función de la potencia del transformador. Tomado de (Amparo, 2016).

Por ello, se presentará a continuación el sistema de protección recomendado para cada uno de los grupos enumerados.

**Tabla 20.**

**Sistema de protección asociado a cada grupo de transformador según su potencia**

| <b>Función de protección</b>              | <b>ANSI</b>   | <b>Mediano</b> | <b>Grande</b> | <b>Pequeño</b> |
|---|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Diferencial                               | 87 T          | X              | X             | X              |
| Diferencial de neutro                     | 87 TN         | X              | X             | X              |
| Sobreintensidad de fases y neutro         | 50/51, 50/51N | X              | X             | X              |
| Sobreintensidad de puesta a tierra        | 50 /51 G      | X              | X             | X              |
| Sobreintensidad de cuba                   | 50 / 51 C     |                |               | X              |
| Cargas desequilibradas                    | 46            | X              | X             | X              |
| Sobrecarga térmica                        | 49            | X              | X             | X              |
| Sobreexcitación                           | 24            | X              | X             | (X)            |
| Sobretensión y Subtensión                 | 59,27         | X              | X             | (X)            |
| Sobrefrecuencia y su frecuencia           | 81U/O         | X              | X             | (X)            |
| Impedancia - distancia                    | 18,21         | (X)            | X             |                |
| Potencia inversa y directa                | 32R, 32F      | (X)            | X             |                |
| Fallo de interruptor                      | 50BF          | X              | X             | X              |
| Relé buchholz tanque principal            | 63            | X              | X             | X              |
| Relé buchholz cambiador de tomas          | 63            | X              | X             | X              |
| Relé buchholz cambiador de tomas por fase | 63            | (X)            | X             |                |
| Relé de protección del cambiador de tomas | 63            | (X)            | X             | (X)            |
| Válvula de sobrepresión                   | 63            | X              | X             | X              |
| Relé de imagen térmica                    | 49            | X              | X             | X              |
| Temperatura en devanados                  | 26W           | X              | X             | X              |
| Temperatura devanados por fase y lado     | 26W           | X              | X             | (X)            |
| Temperatura en aceite                     | 26O           | X              | X             | X              |
| Temperatura en aceite multipunto          | 26O           | X              | X             | (X)            |

|  |    |   |   |   |
|--|----|---|---|---|
| Nivel de aceite en el tanque principal   | 71 | X | X | X |
| Nivel de aceite en el cambiador de tomas | 71 | X | X | X |

Nota: Sistema de protección asociado a cada grupo de transformador según su potencia. Recuperado de (Amparo M. , 2016).

## 4.2. Relés diferenciales más usados

A continuación, se mostrará una breve reseña de los relés de protección más utilizados en el mercado para los transformadores de potencia mayores a 1MVA.

### 4.2.1. SEL- 487E

Este tipo de relé de protección tiene como función general proteger al transformador de potencia y por lo general es uno de los relés más utilizado en subestaciones. (David, 2019). Este dispositivo posee hasta cinco entradas de corrientes trifásicas, tres elementos de protección de falla a tierra (REF) y dos entradas de tensión trifásica. (Jessica, 2018)

Una característica importante de la utilización de este relé es que es capaz de detectar un desequilibrio de las corrientes de fase que no se encuentre afectado por la carga. Utiliza también una lógica de detección de fallas externas bloqueando así este elemento asegurando el cambio de pendiente utilizado con el ajuste 87T. (David, 2019).

#### 4.2.1.1. Ventajas

- Protege y supervisa las aplicaciones del transformador.
- Ofrece hasta cinco entradas con retención trifásica.
- Contiene tres elementos de protección de falla restringida a tierra independientes.
- Limita el daño del transformador al responder a las condiciones de falla interna.
- Evita fallas catastróficas del transformador mediante la detección de fallas

entre espiras.

- Minimizar el tiempo de puesta en servicio y eliminar los costosos errores con el software de ajustes de compensación de matriz.
- Supervisa fallas externas y terminas.
- Realiza seguimiento del desgaste del transformador.
- Permite que sea programado para el mantenimiento según sea necesario.
- Supervisa el desgaste del interruptor reduce el mantenimiento ineficiente y costoso.
- Cumple con tecnologías opcionales de enlace de dominio del tiempo.

#### 4.2.1.2. Características

Figura 54.

Lado frontal del relé SEL 487E con su respectiva descripción



Nota: Lado frontal del relé SEL 487E con su respectiva descripción. Tomado de (SEL, 2021).

Tabla 21.

Características de la parte frontal del Relé SEL-487E.

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1 | Puerto serial frontal EIA-232 |
| 2 | Pantalla LCD                  |
| 3 | Teclado                       |
| 4 | Leds de panel frontal         |
| 5 | Botones de operación          |

Nota: Características de la parte frontal del Relé SEL-487E. Recuperado de (SEL, 2021)

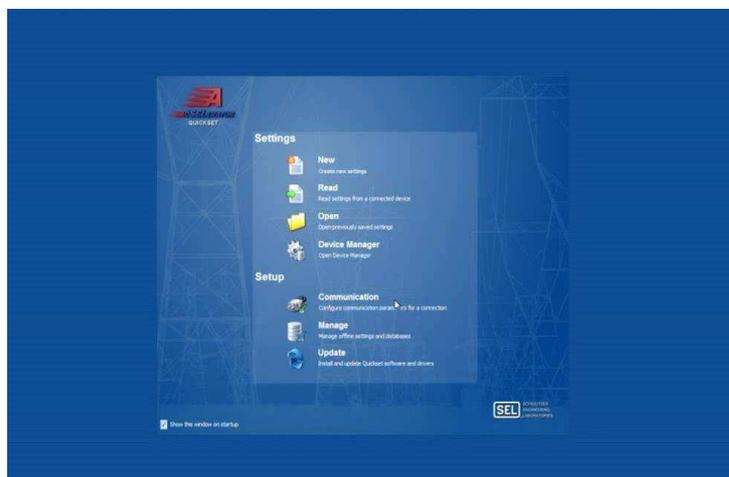
Cada uno de estos elementos de este sistema de protección como lo es el Relé SEL-487E funcionan de la siguiente manera, en el orden que podemos apreciar en la tabla 20.

- El punto número 1 es el puerto serial, cuyo funcionamiento es rápido practico y seguro el cual sirve para la configuración del sistema y el acceso local.

- En el apartado número dos encontramos con la pantalla LCD la cual nos permite controlar y ver el estado tanto como de los interruptores y de las cuchillas
- Seguido por el punto tres, el cual es un pequeño teclado el cual nos permite que sea mucho más sencillo su navegación.
- En el cuarto nos encontramos con los leds del panel el cual representan alarmas personalizadas y proporcionan una información rápida y sencilla en el momento de que ocurra alguna anomalía y así permitirle al operador asistir al equipo y realizar una restauración rápida del suministro
- Y finalmente nos encontramos con el punto número cinco el cuales son los botones programables las cuales tienen sus propias etiquetas configurables por el usuario para permitirle al operador personalizar el panel de control.

Este dispositivo de protección permite minimizar el tiempo de puesta en servicio y eliminar errores costosos, a su vez posee un software AcSELeRator Quickset, el cual permite la configuración del IED.

**Figura 55.**  
**Software de configuración.**

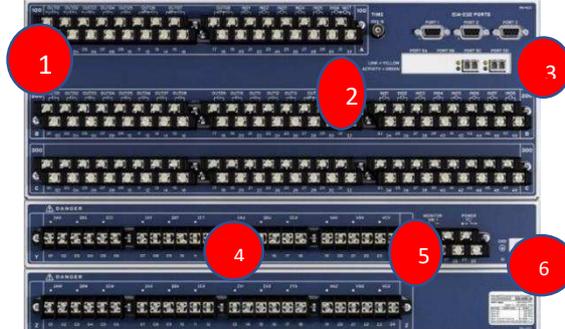


Nota: Software de configuración. Tomado de (SEL Brasil, 2015).

En cuanto al protocolo de comunicación del Relé 487-E se basa en las normativas IEC – 6180 el cual se tiene interoperabilidad con los demás dispositivos que se encuentran en la subestación mediante una comunicación de Ethernet fibra.

A continuación, mediante la figura 55 podremos observar la vista posterior del Relé 487-E seguido de su respectiva descripción.

**Figura 56.**  
**Vista posterior del relé 487-E**



Nota: Vista posterior del relé 487-E. Tomado de (SEL, 2021).

**Tabla 22.**  
**Descripción de la parte trasera del Relé 487E**

|   |   |
|---|---|
| 1 | Montaje en panel o en Rack.   |
| 2 | Protocolos de comunicación (FTP, Telnet, sincros fasores, DNP3 LAN/WAN).                  |
| 3 | Puerto EIA-232 frontal y tres posteriores para comunicaciones.                            |
| 4 | 8 canales de corriente y 6 de voltaje   |
| 5 | Configuración de hardware Connectorized   |
| 6 | Opciones de alimentación: 24–48 Vcd, 48–125 Vcd o 110–120 Vca, 125–250 Vcd o 110–240 Vca. |

Nota: Descripción de la parte trasera del Relé 487E. Recuperado de (SEL, 2021)

### 4.2.1.3. Especificaciones técnicas del dispositivo

Figura 57.

Descripción del diagrama funcional

| NÚMEROS/ACRÓNIMOS Y FUNCIONES ANSI |  |
|------------------------------------|--|
| 16 SEG                             | Seguridad de acceso (serial, Ethernet)                                     |
| 24                                 | Volts/hertz  |
| 25                                 | Verificación de sincronismo  |
| 27                                 | Bajo voltaje   |
| 32                                 | Potencia direccional   |
| 46                                 | Desbalance de corriente  |
| 49                                 | Térmica  |
| 50BF                               | Sobrecorriente de falla de interruptor                                     |
| 50N                                | Sobrecorriente de neutro   |
| 50 [P,G,Q]                         | Sobrecorriente (fase, tierra, secuencia negativa)                          |
| 51N                                | Sobrecorriente-tiempo de neutro  |
| 51 [P,G,Q]                         | Sobrecorriente-tiempo (fase, tierra, secuencia negativa)                   |
| 59                                 | Sobrevoltaje   |
| 67 [P,G,Q]                         | Sobrecorriente direccional (fase, tierra, sec. neg.)                       |
| 81 [O,U]                           | Sobre/baja frecuencia  |
| 85 RIO                             | Comunicaciones SEL Microbus Bits*  |
| 87 [U,R,Q]                         | Diferencial de transformador (sin restricción, con restricción, sec. neg.) |
| DFR                                | Reportes de eventos  |
| ENV                                | SEL-2600   |
| IHM                                | Interfaz de operador   |
| LGC                                | Ecuaciones de control SELosic® expandidas                                  |
| MET                                | Mediciones de alta exactitud   |
| PMU                                | Sincrofasores  |
| REF                                | Falla a tierra restringida   |
| UTR                                | Unidad terminal remota   |
| SER                                | Registrador secuencial de eventos  |

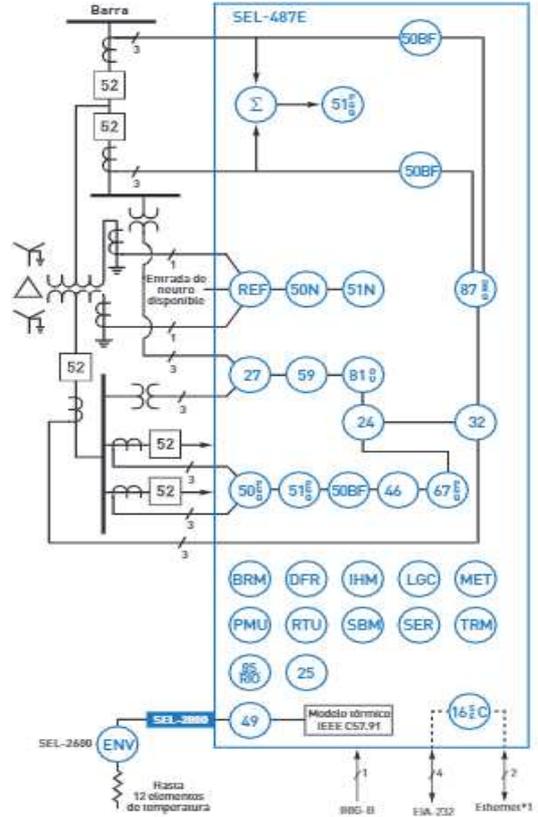
| FUNCIONES ADICIONALES |   |
|-----------------------|---|
| BRM                   | Supervisor de desgaste de interruptores |
| LDP                   | Perfil de datos de carga                |
| SBM                   | Supervisor de banco de baterías         |
| TRM                   | Supervisor de transformador             |

<sup>1</sup>Cobre o fibra óptica  
\*Característica opcional

Nota: Descripción del diagrama funcional. Tomado de (Eduardo, 2017)

Figura 58.

Diagrama funcional



Nota: diagrama funcional del relé SEL 487E. Tomado de (Eduardo, 2017)

Tabla 23.

Especificaciones técnicas del Relé 487E

| Descripción                   | Características   |
|-------------------------------|---|
| Numero de parte               | 0487E3X611XXC2X43624XXX                                       |
| Fuente de alimentación        | 125-250 VDC O 110-240 VAC                                     |
| Protocolo de comunicación     | FTP, Telnet, FTP, DNP3 E IEC61850                             |
| Puertos de comunicación       | Puerto 5C, 5D: Ethernet Card with Two 100BASE – FX Connectors |
| Voltaje de entradas Digitales | 125 VDC   |
| Entradas de corriente AC      | S-T-U. W-X (3-Fases) =5A                                      |
| Temperatura de operación      | (-40°a+85°C)  |

Nota: En la tabla 22 vemos la descripción y cada una de las características del relé 487E (Eduardo, 2017)

#### 4.2.2. SEL – 787- 2/- 3/- 4

Estos modelos de Relé de protección SEL-787-2E/-21/-2X ofrecen la protección diferencial de dos devanados sin embargo los modelos SEL 787 – 3E/-3S ofrecen una protección diferencial de tres devanados.

Este tipo de relé SEL 787 para protección del transformador se aplica en las dos entradas del devanado trifásico, en la entrada de falla restringida a tierra, en la entrada de voltaje trifásico que permite una flexibilidad avanzada de automatización y coordinación mediante puertos de comunicaciones Ethernet, este es capaz de detectar perturbaciones del sistema de potencia y estabilidad potencial.

##### 4.2.2.1. Características

Este dispositivo desde su parte frontal; cuenta con una pantalla a color de 5 pulgadas con una resolución de 800x480 pixeles que proporcionan una navegación directa a través de una pantalla táctil capacitiva, con un teclado completo facilita la modificación sencilla de ajustes del relé. Permite crear carpetas y aplicaciones usando un acceso rápido a las pantallas de bahía, datos de medición y supervisión de reportes ajustes entre otros.

El botón de inicio permite a los usuarios volver fácilmente a la pantalla de inicio predeterminadas, cuenta con led tricolores programables en el panel frontal.

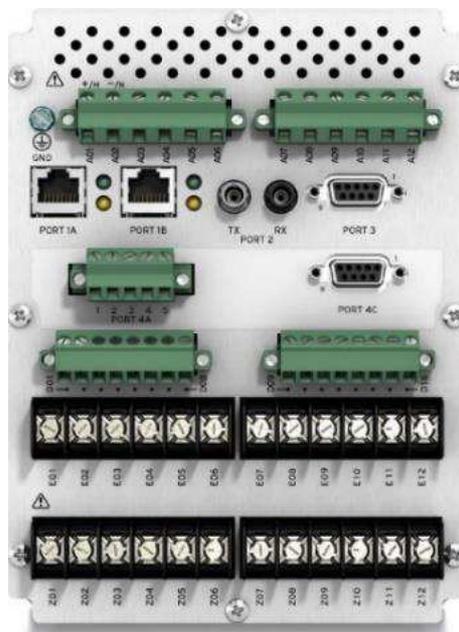
**Figura 59.**  
**Parte frontal del Relé SEL787**



Nota: Parte frontal del Relé SEL787. Tomado de (SEL 787, 2021)

Mientras que por su parte posterior tenemos opciones de alimentación (24 a 48 Vcd, 125 a 250 Vcd o 120 a 240 Vca), dos entradas digitales (ED) y 3 salidas digitales (SD), cuentan con una amplia variedad de medios y protocolos de comunicaciones que brindan flexibilidad de comunicación con otros dispositivos y sistemas de control. Puerto serial EIA – 232 (P3) y puerto serial EIA-232 de fibra óptica (P2) con entrada IRIG-B.

**Figura 60.**  
**Parte superior del relé de 787**



Nota: Parte superior del relé de 787. Tomado de (SEL 787, 2021)

#### 4.2.2.2. Elementos de protección

A continuación, visualizaremos una tabla la cual mostrara para que tipo de relé se utiliza cada elemento de aplicación, esto se debe a su serie de dispositivos relés que se encuentran en el mercado bajo el mismo nombre.

Tabla 24.

Elementos de protección, para equipos tales como SEL -787-2x / 787-21/ 2E / 3S / 4X

| Protection Elements |  | 2 Windings | 2 Windings With IN Channel | 2 Windings With IN Channel and 3-Phase Voltages | 3 Windings With IN Channel and 3-Phase Voltages | 3 Windings With VS/VBAT Channel and 3-Phase Voltages | 4 Windings     |
|---------------------|--|------------|----------------------------|---|---|--|----------------|
|                     |  | SEL-787-2X | SEL-787-21                 | SEL-787-2E                                      | SEL-787-3E                                      | SEL-787-3S   | SEL-787-4X     |
| 87                  | Phase Differential                       | X          | X                          | X   | X   | X  | X              |
| REF                 | Restricted Earth Fault (REF)             |            | X <sup>a</sup>             | X <sup>a</sup>                                  | X <sup>a</sup>                                  | X <sup>a</sup>                                       | X <sup>a</sup> |
| 50P                 | Phase Overcurrent                        | X          | X                          | X   | X   | X  | X              |
| 50Q                 | Neg.-Seq. Overcurrent                    | X          | X                          | X   | X   | X  | X              |
| 50G                 | Ground Overcurrent                       | X          | X                          | X   | X   | X  | X              |
| 50N                 | Neutral Overcurrent                      |            | X                          | X   | X   |  |                |
| 51P                 | Phase Time-Overcurrent                   | X          | X                          | X   | X   | X  | X              |
| 51Q                 | Neg.-Seq. Time-Overcurrent               | X          | X                          | X   | X   | X  | X              |
| 51G                 | Ground Time-Overcurrent                  | X          | X                          | X   | X   | X  | X              |
| 51PC                | Combined Winding Phase Time-Overcurrent  |            |                            |   | X   | X  | X              |
| 51GC                | Combined Winding Ground Time-Overcurrent |            |                            |   | X   | X  | X              |

Nota: Elementos de protección, para equipos. Recuperado de (Data Sheet SEL-787-2, -3, -4, 2021)

Tabla 25.

Elementos de protección, para equipos tales como SEL -787-2x / 787-21/ 2E / 3S / 4X PARTE 2

| Protection Elements |  | 2 Windings | 2 Windings With IN Channel | 2 Windings With IN Channel and 3-Phase Voltages | 3 Windings With IN Channel and 3-Phase Voltages | 3 Windings With VS/VBAT Channel and 3-Phase Voltages | 4 Windings |
|---------------------|--|------------|----------------------------|---|---|--|------------|
|                     |  | SEL-787-2X | SEL-787-21                 | SEL-787-2E                                      | SEL-787-3E                                      | SEL-787-3S   | SEL-787-4X |
| 51N                 | Neutral Time-Overcurrent               |            | X                          | X   | X   |  |            |
| 27P                 | Phase Undervoltage                     |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 27PP                | Phase-to-Phase Undervoltage            |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 27S                 | VS Channel Undervoltage                |            |                            |   |   | X  |            |
| 27I                 | Inverse-Time Undervoltage              |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 59P                 | Phase Overvoltage                      |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 59PP                | Phase-to-Phase Overvoltage             |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 59Q                 | Neg.-Seq. Overvoltage                  |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 59G                 | Ground Overvoltage                     |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 59S                 | VS Channel Overvoltage                 |            |                            |   |   | X  |            |
| 59I                 | Inverse-Time Overvoltage               |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 24                  | Volts/Hz                               |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 25                  | Synchronism Check                      |            |                            |   |   | X  |            |
| 32                  | Directional Power                      |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 49RTD               | Resistance Temperature Detector (RTDs) | X          | X                          | X   | X   | X  | X          |
| 60LOP               | Loss of Potential (LOP)                |            |                            | X   | X   | X  |            |
| 81                  | Over- and Underfrequency               |            |                            | X   | X   | X  |            |
| BF                  | Breaker Failure                        | X          | X                          | X   | X   | X  | X          |

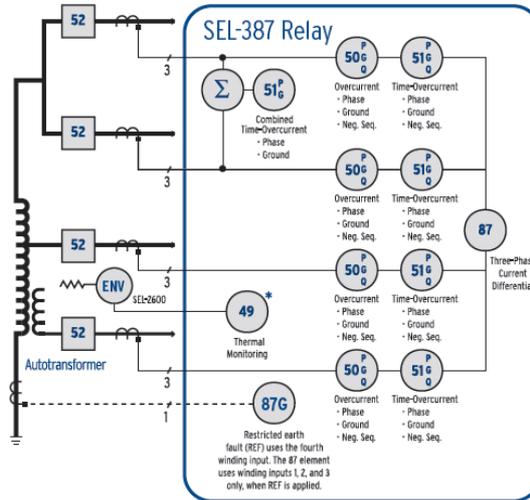
Nota: Elementos de protección, para equipos. Recuperado de (Data Sheet SEL-787-2, -3, -4, 2021)



### 4.2.3.1. Diagrama funcional del Relé SEL- 387

Figura 63.

Diagrama funcional del Relé SEL – 387



Nota: En la figura 62 se observa el diagrama funcional del relé SEL 387. Tomado de (N.Y.R. LIMITED PARTNERSHIP, 2015).

### 4.2.4. SEL – 387 E

El relé de voltaje y diferencial de corriente SEL – 387E brinda protección a los transformadores de potencia de dos o de tres devanados. Las entradas de voltaje para medición de energía, protección contra sobreexcitación y desgates de carga por sobre y baja frecuencia, el cual brinda soluciones versátiles para la protección de aparatos eléctricos. Las funciones de automatización reducen los costos totales de construcción y operación del proyecto mediante la eliminación de los interruptores, medidores y lámparas indicadoras de control externo tradicionales (SEL- 387E, 2021).

Figura 64.

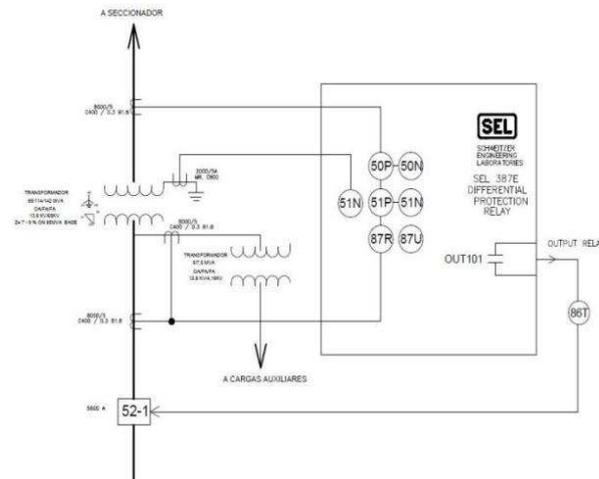
Relé SEL- 387E



Nota: en la figura 63 se muestra la parte delantera del relé SEL 387E tomado de (SEL- 387E, 2021).

De acuerdo con (JVasquez y JYepez, director JSaavedra, 2013), para la protección principal de la Central Enrique García de pascuales de la ciudad de guayaquil se utiliza el relé SEL – 387E. A continuación, observaremos un esquema de protección del transformador principal de esta central eléctrica.

**Figura 65.**  
**Esquema de uso de Relé de protección SEL 387E**



Nota: Esquema de uso de Relé de protección SEL 387E. Tomado de (JVasquez y JYepez, director JSaavedra, 2013).

Las funciones que se utilizan para este tipo de relé son las siguientes:

**Tabla 26.**

**Ajuste de protección para un Relé 387E**

|       |  |
|-------|--|
| 50/51 | Elemento de Sobrecorriente directiva e inversa |
| 87    | Elemento diferencial                           |

Fuente: se muestran los Ajustes de protección para un Relé 387E (JVasquez y JYepez, director JSaavedra, 2013).

#### 4.2.5. SEL – 387 A

El relé de sobrecorriente y diferencial de corriente SEL – 387A el cual ofrece protección diferencial restringida y sin restricciones para dos terminales, brindan seguridad durante la activación del transformador y las condiciones de sobreexcitación en una elección definida por el usuario de restricción o bloqueo de armónicos.

Los elementos de sobrecorriente brindan protección de respaldo que contribuye a la versatilidad del SEL-387A.

**Figura 66.**  
**Relé SEL – 387A**



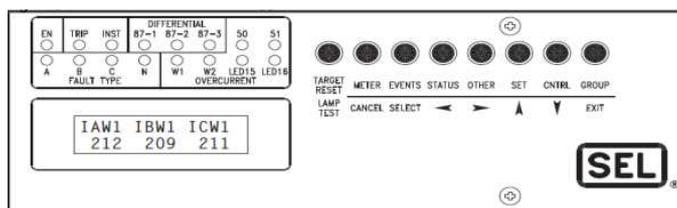
Nota: parte frontal del Relé SEL 387A. Tomado (SEL-387A, 2021).

Este dispositivo se utilizar para proteger al transformador de potencia de dos devanados, reactores, generadores, motores grandes y otros dispositivos de terminales múltiples y es utilizado especialmente para fallas como:

- Diferencial de corriente – con ajuste 87
- Sobreintensidad instantánea y tiempo de fase – con ajuste 50/51
- Sobrecorriente residual instantánea y temporizada – con ajuste 50/51G
- Sobrecorriente de secuencia negativa instantánea y retardo de tiempo – con ajuste 50/51 Q
- Falla del interruptor – con ajuste 50/62BF
- Entre otras

El panel frontal del relé SEL – 387A muestra de una manera más conveniente, detallado, donde es posible observar los LED de señalización, botones de navegación y acceso a la información del relé, su pantalla que sirve para monitorizar corrientes y acceso a la información del relé.

**Figura 67.**  
**Panel frontal SEL – 387A**



Nota: se muestra el panel frontal SEL 387A. Tomado (SEL-387A, 2021)

Los LED's tienen la función de informar el estado del equipo protegido de una forma más ágil, a continuación, el significado de cada LED. (Antonio Viera, 2017)

**Tabla 27.**

**Descripción de los LED's del Relé SEL 387A**

|                    |   |
|--------------------|---|
| EN                 | Significa que el relé está conectado correctamente y que la autocomprobación se realizó con éxito.                  |
| Disparo            | Significa que el comando de disparo se envió al disyuntor, debido a la ocurrencia de cualquier falla en el sistema. |
| INST               | Indica que la falla ocurrida fue instantánea.   |
| 87 - 1             | Indica que la función diferencial actuó debido a una falla ocurrida en la fase A del sistema                        |
| 87-2               | Indica que la función diferencial actuó debido a una falla ocurrida en la fase B del sistema                        |
| 87-3               | Indica que la función diferencial actuó debido a una falla ocurrida en la fase C del sistema                        |
| 50                 | Indica que hubo falta de sobrecorriente instantánea   |
| 51                 | Indica que hubo falta de sobreintensidad horaria  |
| A                  | Indica que la fase A está involucrada en la falla ocurrida, independientemente de cuál fue la culpa                 |
| B                  | Indica que la fase B está involucrada en la falla ocurrida, independientemente de cuál fue la culpa                 |
| C                  | Indica que la fase C está involucrada en la falla ocurrida, independientemente de cuál fue la culpa                 |
| N                  | Indica que la falla ocurrida involucra corrientes residuales  |
| W1                 | Indica que el lado primario del equipo protegido está involucrado en la falla que ocurrió                           |
| W2                 | Indica que el lado secundario del equipo protegido está involucrado en la falla que ocurrió                         |
| LED 15 y<br>LED 16 | Están disponibles para programación, para que asciendan según un criterio establecido por el operador               |

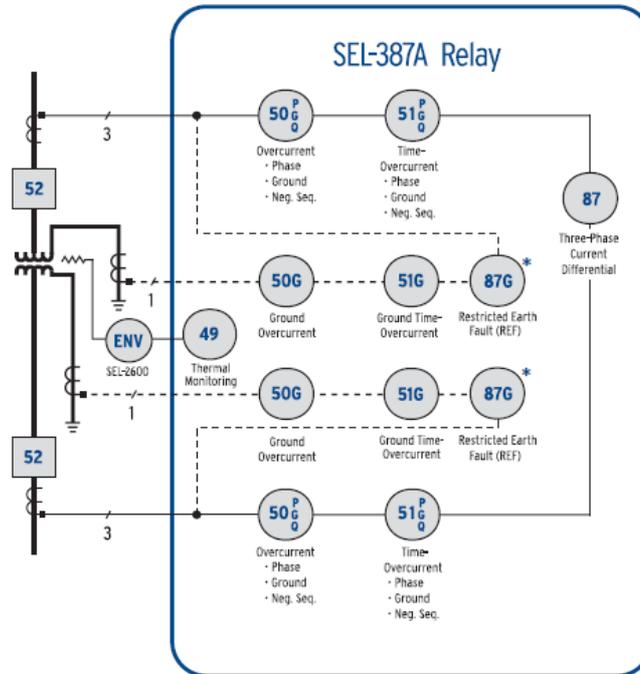
Nota: En la tabla 26 se muestra la descripción de los Led's del Relé SEL 387A

(Antonio Viera, 2017)

#### 4.2.5.1. Diagrama funcional del Relé SEL-387A

Figura 68.

Diagrama funcional de SEL 387A Relé



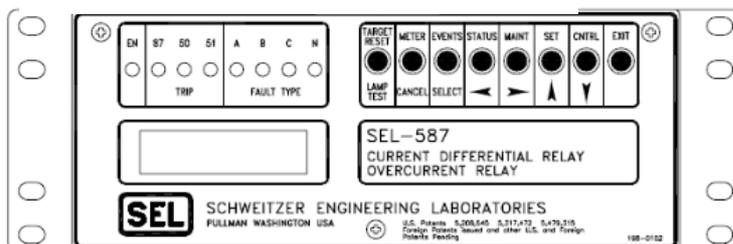
Nota: Diagrama funcional de SEL 387A. Tomado de (N.Y.R. LIMITED PARTNERSHIP, 2015).

#### 4.2.6. SEL – 587 / 587Z

El relé de Sobrecorriente / diferencial de corriente SEL-587 proporciona protección para cualquier aparato de dos entradas, como transformadores, motores, generadores y reactores. Aplíquelo para protección diferencial y de sobrecorriente y utilice informes de eventos para un análisis posterior al evento rápido.

Gracias a esto, el relé SEL – 587 mide las corrientes del lado de alta y del lado de baja tensión, donde las cantidades de operación y retención diferencial.

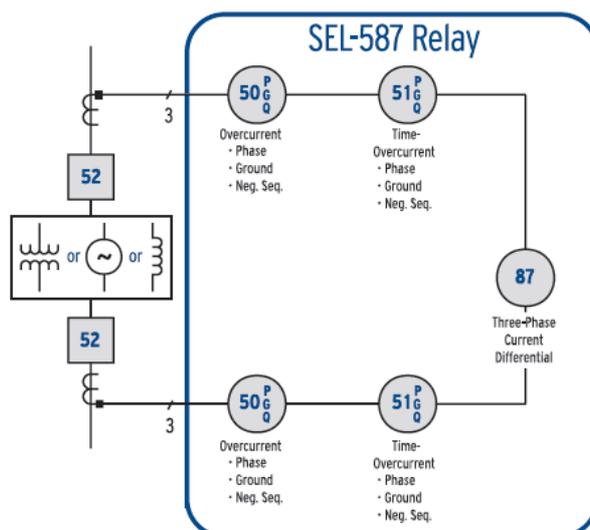
**Figura 69.**  
**Parte frontal del relé SEL – 587**



Nota: mostramos parte frontal del relé. Tomado de (JVasquez y JYepez, director JSaavedra, 2013)

#### 4.2.6.1. Descripción funcional del relé SEL - 587

**Figura 70.**  
**Diagrama funcional de SEL – 587**



Nota: diagrama funcional del relé. Tomado de (N.Y.R. LIMITED PARTNERSHIP, 2015)

#### 4.2.7. SIPROTEC 7UT612

Este tipo de relé se usan para la eliminación rápida y selectiva de fallas de cortocircuito en transformadores de todos los niveles de tensión y también en máquinas eléctricas rotativas como motores y generadores, para líneas cortas y barras. (SIEMENS Siprotec 7UT612, 2021)

**Figura 71.**  
**Relé SIPROTEC 7UT612**

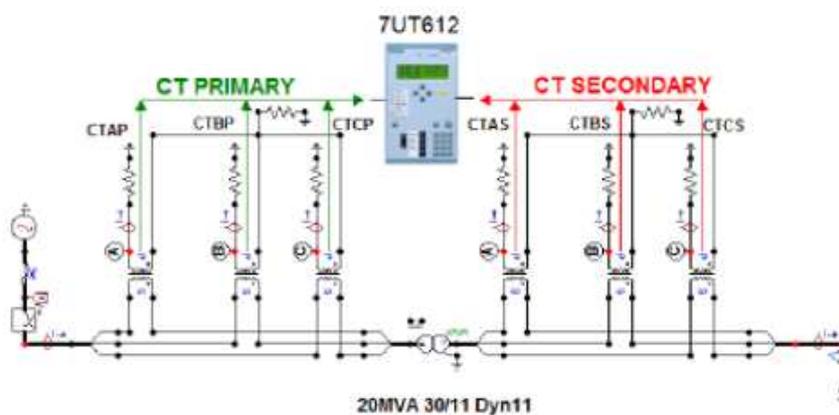


Nota: parte frontal del relé 7UT612. Tomado de (SIEMENS Siprotec 7UT612, 2021)

Este relé de protección se usa específicamente para la parametrización de transformadores trifásicos y monofásicos, incluso se permite integrar una réplica térmica para la supervisión de las pérdidas óhmicas. (SIEMENS Siprotec 7UT612, 2021).

El sistema que se muestra a continuación en la fig. 49 usa parámetros obtenidos de un sistema real el cual ha sido simulado y construido en ATP-EMTP ambiente. (Elnaily, 2017).

**Figura 72.**  
**Diagrama de utilización del Relé 7UT612 en un transformador de potencia**



Nota: Diagrama funcional del Relé 7UT612. Tomado de (Elnaily, 2017).

#### **4.2.7.1.Funciones**

- Protección diferencial para transformadores de dos devanados (trifásicos / monofásicos)
- Protección diferencial para motores y generadores
- Protección diferencial para líneas cortas
- Protección diferencial para barras colectoras de hasta 7 alimentadores (segregadas por fase o con CT sumador)

#### **4.2.7.2.Funciones de control**

- Comandos de control de cb y aisladores
- Control mediante teclado, entradas binarias, sistema DIGSI 4 o SCADA
- Lógica definida por el usuario con CFC

#### **4.2.8. MiCOM P64x**

El MiCOM P64X sirve como protección y control avanzados para los transformadores de potencia.

Este modelo cubre los problemas de las faltas internas del transformador y alargan su vida útil, además ofrecen una protección rápida de las faltas del transformador.

Las variantes que cubre a transformadores de dos o tres devanados, con hasta cinco juegos de entradas de transformador de intensidad trifásica. Este modelo se aloja en una plataforma IED avanzada que incorpora protección diferencial o falta a tierra restringida, térmica y de sobreexcitación.

Por otro lado, la sobreintensidad de respaldo se puede direccionar si el usuario incluye una entrada TT trifásica, esto dependiendo del modelo elegido por el usuario. (Schneider Electric , 2021)

#### 4.2.8.1. Ventajas

Dentro de las ventajas de la utilización de este equipo enumeraremos las más importantes según (Schneider Electric , 2021) para la protección del transformador de potencia.

- ✓ IED universal para todas las configuraciones del transformador
- ✓ Protección, control, supervisión, mediciones y registro
- ✓ Copia de seguridad y registro de faltas pasantes
- ✓ Fácil de especificar, instalar y poner en marcha
- ✓ Teclas de función programables

**Figura 73.**  
**Relé de protección diferencial MiCOM P64x**



Nota: parte frontal del Relé de protección diferencial MiCOM P64x. tomado de (Schneider Electric MiCOM P64x, 2021).

#### 4.2.9. ABB – RET 615

Este relé es un relé dedicado a la protección y control de transformadores de potencia, elevadores incluyendo bloques de generador- transformador en sistemas eléctricos de potencia ya sean industriales o de distribución, este forma parte de la familia de productos de control y de protección, este relé se caracteriza por su diseño compacto y de unidad extraíble.



### 4.3. Valoración económica de relés diferenciales

Tabla 28.

Presupuesto económico de Relés diferenciales del mercado.

| Producto | Detalle   | Características  | Funciones de protección codificación  | C/U | Valor/u | Total   |
|----------|---|--|---|-----|---------|---------|
| SEL 487E | Relé para transformador de potencia               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reducción de los retrasos en la coordinación del sistema.</li> <li>✓ Integración de sistemas simplificada</li> <li>✓ Comunicación de datos en serie</li> <li>✓ Escalado de entrada / salida.</li> <li>✓ Estandarización de configuración y puesta en servicio</li> <li>✓ Modos de funcionamiento IEC 61850</li> <li>✓ No se necesitan TC auxiliares</li> <li>✓ Protocolo de redundancia en paralelo (PRP).</li> <li>✓ IEEE 1588, Protocolo de tiempo de precisión.</li> <li>✓ Modelo térmico compatible con IEC 60255.</li> </ul>             | ANSI:<br>87, 87H,<br>87GD, 50,<br>51, 46, 67,<br>27, 81U,<br>50BF   | 1   | \$6,990 | \$6,990 |
| SEL 787  | Relé para transformador de potencia               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Funciones de protección estándar.</li> <li>✓ Funciones de protección adicionales.</li> <li>✓ Comprobación de sincronismo / Monitor de batería de CC de la estación.</li> <li>✓ Monitoreo de transformadores.</li> <li>✓ Controles del operador.</li> <li>✓ Servidor Web Integrado.</li> <li>✓ Software de configuración de relés y lógica</li> <li>✓ Medición y generación de informes</li> <li>✓ HMI del panel frontal.</li> <li>✓ Funciones estándar adicionales.</li> <li>✓ Funciones opcionales</li> <li>✓ Soporte de idiomas.</li> </ul> | Debido a sus amplias categorías ver tabla 21 Y 22 en el apartado 4.2.2. donde se muestran los elementos de protección según las normativas ANSI del mismo | 1   | \$3,060 | \$3,060 |
| SEL 387  | Relé de sobrecorriente y diferencial de corriente | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Protege transformadores, buses, generadores, reactores y otros aparatos con una combinación de protección diferencial y de sobreintensidad</li> <li>✓ Permite mediciones instantáneas de fase y corriente de demanda</li> <li>✓ Cuenta con un seguimiento programable del mantenimiento del interruptor cuando lo indique el monitor del interruptor.</li> <li>✓ Las funciones de</li> </ul>  | ANSI:<br>49, 50 (P, G, Q), 51(P, G, Q), 87  | 1   | \$3,810 | \$3,810 |

|           |                                     |  |   |   |         |         |
|-----------|-------------------------------------|--|---|---|---------|---------|
|           |                                     | <p>automatización que incluyen 16 elementos para cada una de las siguientes funciones: Control local e indicación local con LCD del panel frontal y botones, control remoto y control de pestillo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El software SEL-5030 reduce los costos neering para la configuración del relé y la programación lógica. La HMI incorporada proporciona diagramas de fasores que ayudan a respaldar la puesta en servicio y la resolución de problemas.</li> <li>✓ Los modelos SEL-387-5 y SEL-387-6 son compatibles por el Quickset.</li> </ul>  |   |   |         |         |
| SEL 387 E | Relé para transformador de potencia | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Proteja transformadores, buses, generadores, reactores y otros aparatos con una combinación de protección diferencial, sobrecorriente y voltios / hercios.</li> <li>✓ Este elemento diferencial se ajusta con un simple o doble de característica diferencial de porcentaje de pendiente para mayor seguridad durante condiciones de falla pasante.</li> <li>✓ Permite interrogar al relé para medidas instantáneas de tensión, corriente, MW, MVAR, MVA, MWh, MVARh, corriente de demanda y potencia de demanda trifásica. La demanda máxima registrada, incluida la fecha y la hora de ocurrencia, que se proporciona.</li> <li>✓ Permite notificar al personal de la subestación problemas de voltaje de la batería.</li> <li>✓ Utiliza el monitor de eventos de fallas pasantes SEL-387E para obtener información sobre fallas del sistema</li> <li>✓ Al igual que el Relé anterior, las funciones de automatización que incluyen 16 elementos para cada uno de las siguientes funciones: local, control e indicación local. También permite utilizar los puertos de comunicaciones en serie para una transmisión eficiente de información clave como datos de medición, protección de elementos y estado de E / S de contacto, entre otras.</li> </ul> | ANSI:<br>24, 27, 50<br>(P, G, Q),<br>51(P, G, Q),<br>59, 81 (O,<br>Q), 87 | 1 | \$5,990 | \$5,990 |

|               |   |   |   |   |         |         |
|---------------|---|---|---|---|---------|---------|
|               |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Para configuración de relés y programación lógica. La HMI incorporada proporciona diagramas de fasores que ayudan a respaldar la puesta en servicio y resolución de problemas</li> </ul>   |   |   |         |         |
| SEL 387 A     | Relé para transformador de potencia                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Al igual que los Relés anteriores, protege a varios elementos de la subestación, incluyendo los transformadores de potencia, mediante una combinación de protección diferencial y de sobreintensidad. Donde el elemento diferencial se establece con un porcentaje de pendiente simple o doble.</li> <li>✓ Como el anterior este relé interroga al relé para mediciones instantánea de fase y corriente de demanda.</li> <li>✓ Proporciona la demanda máxima registrada, incluida la fecha y hora que se produjo.</li> <li>✓ Utiliza una medición precisa de datos para aplicaciones del sistema EMS/ SCADA.</li> <li>✓ Realiza seguimientos en la programación. del mantenimiento del interruptor cuando lo indique el monitor del interruptor.</li> <li>✓ Notifica al personal de la subestación problemas de voltaje de la batería.</li> <li>✓ Monitorea las temperaturas operativas críticas utilizando el módulo RTD SEL 2600.</li> <li>✓ Monitores de eventos de fallas para obtener información sobre el sistema a través de fallas y el resultado acumulativo <math>I^2t</math> desgaste en banco de transformadores.</li> </ul> | Codificación ANSI:<br>50 (P, G, Q),<br>51 (P, G, Q),<br>67G, 87 | 1 | \$3,810 | \$3,810 |
| SEL 587/587 Z | Relé de protección diferencial para Transformadores de potencia | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Utiliza elementos diferenciales de alta impedancia, logrando un disparo rápido, para fallas en la zona.</li> <li>✓ Proporciona seguridad durante fallas pasantes de alto riesgo y saturación de los TC.</li> <li>✓ Utilice ecuaciones familiares de alta impedancia para calcular la configuración del elemento diferencial basado en voltaje.</li> <li>✓ Ahorre tiempo, dinero y espacio en el panel porque el relé incluye las resistencias y los MOV necesarios para la</li> </ul>  | Codificación ANSI:<br>50 (P, G, Q),<br>51(P, G, Q),<br>87       | 1 | \$4,080 | \$4,080 |

|                  |   |  |  |   |         |         |
|------------------|---|--|--|---|---------|---------|
|                  |   | <p>protección diferencial de alta impedancia.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Muestra Reportes, Monitoreo y Medición simplificando el análisis de fallas con informes de eventos y secuencial y grabador de eventos.</li> <li>✓ Utilice un elemento diferencial de voltaje de ajuste bajo como función de detección de circuito abierto del TC.</li> <li>✓ Valida las conexiones del TC utilizando las cantidades diferenciales de voltaje medidas.</li> <li>✓ Interrogar el relevo para mediciones instantáneas de fase y corriente de demanda en aplicaciones de transformadores.</li> <li>✓ Utiliza los puertos de comunicaciones del panel frontal y posterior para la integración del sistema, la configuración del relé y la recuperación de informes de eventos.</li> <li>✓ Modbus RTU, SEL ASCII y SEL son los protocolos de mensajes rápidos se incluyen como características estándar del relé.</li> <li>✓ Utilice comunicaciones de puerto serie para control remoto.</li> <li>✓ control de disyuntores u otras funciones programables.</li> <li>✓ Cuenta con un Software de configuración de relés y lógica. SEL ERADOR AC Quickset</li> <li>✓ El software SEL-5030 reduce costos neering para la configuración del relé y la programación lógica.</li> <li>✓ Las pantallas de control y HMI incorporadas proporcionan pantallas intuitivas que ayudan a respaldar la puesta en marcha y la resolución de problema</li> </ul> |  |   |         |         |
| SIPROTE C 7UT612 | Relé de protección diferencial para Transformadores de potencia | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Adecuado para transformadores de potencia, generadores, motores, puntos de derivación o configuraciones de barras colectoras más pequeñas.</li> <li>✓ Potente sistema de microprocesador de 32 bits.</li> <li>✓ Procesamiento numérico completo de los valores medidos y control, desde el</li> </ul>   | Codificación ANSI:<br>50N/51N,<br>50G/51G,<br>49, 50BF,<br>87, 87G | 1 | \$2,160 | \$2,160 |

|                           |   |   |   |   |         |         |
|---------------------------|---|---|---|---|---------|---------|
|                           |   | <p>muestreo y la digitalización de los valores de las entradas analógicas hasta los comandos de disparo de los interruptores automáticos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Operación simple del dispositivo usando el panel del operador integrado o una computadora personal conectada que ejecuta DIGSI</li> <li>✓ Protección diferencial para transformadores.</li> <li>✓ Característica de disparo de restricción actual.</li> <li>✓ Estabilización contra corrientes de entrada utilizando el segundo armónico.</li> <li>✓ Estabilización contra corrientes de falla transitorias y estacionarias causadas.</li> <li>✓ Alta estabilidad también para diferentes saturaciones de transformadores de corriente.</li> <li>✓ Disparo instantáneo de alta velocidad en fallas de transformador de alta corriente.</li> <li>✓ Alta sensibilidad de falla a tierra mediante la detección de la corriente del punto de estrella de un devanado transformador conectado a tierra.</li> <li>✓ Adaptación integrada del grupo de conexión del transformador</li> <li>✓ Adaptación integrada de la relación de transformación que incluye diferentes corrientes nominales de los devanados del transformador.</li> </ul> |   |   |         |         |
| SCHNEIDER<br>ER<br>P64332 | Relé diferencial de sobrecorriente en transformadores de potencia | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Medición de todos los valores instantáneos e integrados</li> <li>✓ Supervisión de circuito de disparo y bobina.</li> <li>✓ Cuatro grupos de entornos alternativos.</li> <li>✓ Teclas de función programables</li> <li>✓ Entradas de control.</li> <li>✓ Lógica de esquema programable.</li> <li>✓ Asignación programable de entradas y salidas digitales</li> <li>✓ Secuencia de grabación de eventos</li> <li>✓ Registro completo de perturbaciones (Captura de forma de onda)</li> <li>✓ Registro de fallas</li> <li>✓ Textos de menú totalmente personalizables</li> <li>✓ Protección por contraseña de varios niveles</li> </ul>   | Codificación ANSI:<br>87, 64, 50,<br>51, 67, 46<br>OC, 49,<br>59/59N, 24,<br>50N/ 51N/<br>67N, 27, 47,<br>81U/O,<br>50BF, 37P | 1 | \$8,000 | \$8,000 |

|                               |  |   |   |   |         |         |
|-------------------------------|--|---|---|---|---------|---------|
|                               |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diagnóstico de encendido y autocontrol continuo del relé</li> <li>✓ Puesta en servicio de instalaciones de prueba</li> <li>✓ Reloj en tiempo real / sincronización de tiempo: sincronización de tiempo posible desde IRIG-B entrada, opto entrada o comunicaciones</li> </ul>  |   |   |         |         |
| ABB<br>RET 615/<br>ABB<br>630 | Relé<br>direccional,<br>sobrecorriente | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diferencial de transformador con protección de voltaje y funcionalidad de medición</li> <li>✓ Admite varias opciones de conexión a tierra neutro, que coinciden con los principios de falla a tierra restringida de alta impedancia o de baja impedancia numérica.</li> <li>✓ Protección de arco opcional y salidas de alta velocidad</li> <li>✓ Soporta IEC 61850 Ediciones 1 y 2, incluyendo HSR y PRP, mensajería GOOSE e IEC 61850-9-2 LE para menos cableado y comunicación supervisada</li> <li>✓ IEEE 1588 V2 para una sincronización de tiempo de alta precisión y el máximo beneficio de la comunicación Ethernet a nivel de subestación</li> <li>✓ Admite protocolos de comunicación Modbus, DNP3 e IEC 60870-5-103</li> </ul> | Codificación<br>ANSI:<br>51P, 50P,<br>46, 59, 27,<br>49T, 87T,<br>87NL,<br>87NH,<br>51BF/51NB<br>F, 94/86 | 1 | \$8,000 | \$8,000 |

Nota: Varias Fuentes.

**Nota:** los precios de los relés de protección que se pueden observar en la tabla 25 son obtenidos de varias fuentes tales como; los dispositivos de protección para transformadores de potencia SEL se encuentran en la página oficial del producto Schweitzer Engineering Laboratories (SEL, 2021), los precios del relé SIPROTEC 7UT612 se encuentran de la misma manera en la página oficial de Siemens (SIEMENS - SIPROTEC 7UT613, 2021) y finalmente el Relé de protección Schneider P64332 y ABB RET 615/ ABB 630 fueron investigados mediante los datos de la Empresa Eléctrica CNEL EP.

Por otro lado, las características de la tabla 25 fueron obtenidos desde el respectivo datasheet de cada equipo.

## **CAPÍTULO V: PROPUESTA**

### **5.1. Diseño metodológico**

#### **5.1.1. Tareas de investigación**

**Tarea 1:** Investigar y conocer lo referente de los Transformadores de potencia.

**Tarea 2:** Estudiar los diferentes tipos de protecciones internas que se aplican en los transformadores de potencia.

**Tarea 3:** Estudiar los diferentes tipos de las protecciones externas que se aplican en los transformadores de potencia.

**Tarea 4:** Analizar la protección diferencial.

#### **5.2. Campo de acción**

Nos referimos a campo de acción a los transformadores de potencia que se instalan a nivel de distribución, subtransmisión y de transmisión.

#### **5.3. Beneficiario**

Este trabajo de titulación beneficiará a las empresas distribuidoras, industrias que utilizan transformadores de potencia de más de 10 MVA, empresas que necesiten un respaldo de que protección es la más segura al momento de colocar un transformador, ya que el transformador como ya lo hemos estudiado es el elemento más importante del sistema eléctrico de potencia.

### 5.4. Cronograma de Actividades

| ACTIVIDADES   | MES | Año 2020 - 2021 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
|---|-----|-----------------|---|---|---|-----------|---|---|---|-------|---|---|---|---------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|------|---|---|---|-------|---|---|---|
|   |     | NOVIEMBRE       |   |   |   | DICIEMBRE |   |   |   | ENERO |   |   |   | FEBRERO |   |   |   | MARZO |   |   |   | ABRIL |   |   |   | MAYO |   |   |   | JUNIO |   |   |   |
|   |     | 1               | 2 | 3 | 4 | 1         | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1       | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 | 1    | 2 | 3 | 4 |       |   |   |   |
| Aprobación del tema y designación de tutor                              |     | ■               | ■ | ■ | ■ |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Elaboración del anteproyecto  |     |                 |   | ■ | ■ | ■         | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Entrega del anteproyecto y petición de tutor para trabajo de titulación |     |                 |   | ■ | ■ | ■         | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Revisión de pares Evaluadores y comisión Académica de los anteproyectos |     |                 |   |   |   |           |   |   | ■ |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Corrección del Anteproyecto   |     |                 |   |   |   |           |   |   | ■ |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Aprobación del Anteproyecto   |     |                 |   |   |   |           |   |   | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Capítulo 1: Introducción y Generalidades                                |     |                 |   |   |   |           |   |   | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Objetivos del proyecto  |     |                 |   |   |   |           |   |   | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Problemática del proyecto de titulación                                 |     |                 |   |   |   |           |   |   | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Capítulo 2: Marco Teórico   |     |                 |   |   |   |           |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Transformadores de potencia   |     |                 |   |   |   |           |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Fallas en los transformadores   |     |                 |   |   |   |           |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Tipo de conexión de transformador                                       |     |                 |   |   |   |           |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Capítulo 3: Desarrollo de la investigación                              |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   | ■       | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Relés digitales más utilizados  |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   | ■       | ■ | ■ | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ | ■     | ■ | ■ | ■ |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Capítulo 4: Evaluación e implementación                                 |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Capítulo 5: Propuesta   |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   | ■    | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |
| Capítulo 6: Conclusión  |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   | ■    | ■ | ■ | ■ |       |   |   |   |
| Entrega del Borrador  |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   | ■     | ■ | ■ | ■ |
| Asignación y revisión por parte del tribunal de titulación              |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   | ■ |
| Entrega de documentos habilitantes                                      |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   | ■ |
| Designación de fecha de sustentación                                    |     |                 |   |   |   |           |   |   |   |       |   |   |   |         |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   | ■ |

## CAPITULO VI: CONCLUSION

### 6.1.Conclusiones

Luego del análisis de la investigación recolectada se puede afirmar que dentro de una subestación se requieren de un sistema de protección, confiable y continuo sin interrupciones siendo capaz de brindar un servicio de calidad para el usuario final, cuyo sistema se utilizaría principalmente para los equipos de distribución debido a sus altos costos ya sea de mantenimiento o de cambios de equipos en el sistema en el caso de que ocurra una falla.

Mediante este trabajo de titulación se recopiló información acerca de todas las protecciones eléctricas para un sistema eléctrico de potencia, sin embargo, este trabajo de investigación se basa en el estudio específicamente de las protecciones para transformadores de potencia mayores a 1 MVA utilizando relés digitales debido a su objetivo principal el cual es: “Realizar una investigación sobre las protecciones eléctricas que se aplican en los transformadores eléctricos de potencia y que sean adecuados para que este funcione sin interrupción”

En esta investigación se logran destacar los relés de protección de un transformador de potencia más utilizados en el mercado tales como: Sel 48E, SEL787 -2 / -3 / -4, SEL 387, SEL 387 E, SEL387 A, SEL 587 / 587Z, SIPROTEC 7UT612, MiCOM P64x, ABB RET 615. A su vez se investigó sobre sus ajustes de protección basados por la normativa ANSI/IEE C37.91, detallando sus características principales para que sean aplicados en un futuro en los sistemas eléctricos de potencia.

Cada equipo de protección cuenta con sus propias configuraciones de ajustes, las cuales deben ser aplicadas exactamente como se indican en el manual sin cometer ningún error, para que actúen de manera adecuada, sobre todo rápida y eficaz, de este modo la falla que ocurra en ese momento no va a incidir y a derivarse a otras zonas de protección ocasionando que se inhabiliten

el sistema o más equipos dentro del sistema eléctrico.

Según lo expuesto concluimos con una clasificación de los transformadores según su potencia y su propia codificación de protección ANSI tales como: transformadores pequeños, cuya potencia de 5 A 40 MVA con voltaje menor de 145 kV cuya codificación ANSI para dicho transformador es 87T, 87N, 50/51, 50/51N, 50/51G, 46, 49, 24, 59/27, 81U/O, 50BF, 63, 26W, 26O, 71; transformadores de mediana potencia ( $40 < S < 250$ ) y su voltaje es  $V > 72,5$  y tiene como codificación de protección ANSI 87T, 87N, 50/51, 50/51N, 50/51G, 46, 49, 24, 59/27, 81U/O, 21, 32R/32F, 50BF, 63, 26W, 26O, 71 y los transformadores grandes donde su potencia es de  $250 < S < 1000$  y su voltaje es hasta 800Kv y tiene como codificación de protección 87T, 87N, 50/51, 50/51N, 50/51G, 46, 49, 24, 59/27, 81U/O, 21, 32R/32F, 50BF, 63, 26W, 26O, 71

## **6.2.Recomendaciones**

De acuerdo con lo investigado, podemos recomendar lo siguiente

- Se debe utilizar relés de protección y en función de su capacidad de potencia se habilitarán las funciones de protección señaladas en el apartado 3.5.4.
- Realizar de manera correcta la aplicación de ajustes para que el relé actúe de manera rápida y eficaz, apoyados en softwares de coordinación y estudios de cortocircuitos.
- Para un mejor funcionamiento y que no ocurran fallas trabajar en conjunto con sistema adecuado de comunicación entre subestaciones.
- Aplicar las normativas adecuadas en cada protección basándose en las normativas que están vigentes por ejemplo la normativa ANSI / IEEE C37.91 la cual debería ser tomada en cuenta por todas las empresas distribuidoras del Ecuador.
- Se recomienda revisar las protecciones existentes en transformadores de potencia ya instalados para modernizarlos mediante la implementación de relés digitales

### 6.3.Referencias Bibliográficas

- ABB - RET615. (2021). Obtenido de <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/numerical-relays/transformer-protection-and-control/transformer-protection-and-control-ret615-iec>
- ABB. (2012). Obtenido de <https://library.e.abb.com/public/f6604185fc2f94e8c1257b1300572744/PCD%20IB%20in%20Spanish.pdf>
- Academia.edu. (2005). Obtenido de <https://www.academia.edu/download/35233108/9PROTECCIONESCAPITULO6.pdf>
- Adriana, O. (2019). *CONTROL DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO TRANSFORMADORES CON TAPS*. Obtenido de <https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17361/1/UPS%20-%20ST004101.pdf>
- Aguas, R. d. (2011). Obtenido de <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0062324.pdf>
- Agustin. (2012). *instintuto de ing. electrica* . Obtenido de <https://iie.fing.edu.uy/potencia/es/proteccion-de-sistemas-electricos-de-potencia/>.
- Alberto, G. (2014). Obtenido de [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/3\\_anio/electrotecnia\\_2/Metodo\\_de\\_las\\_componentes\\_simetricas\\_-\\_Teoria.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/3_anio/electrotecnia_2/Metodo_de_las_componentes_simetricas_-_Teoria.pdf)
- Alberto, R. (2021). Obtenido de [https://www.academia.edu/40791472/Protecci%C3%B3n\\_en\\_sistemas\\_El%C3%A9ctricos\\_Unidad\\_IV\\_Protecci%C3%B3n\\_de\\_Transformadores](https://www.academia.edu/40791472/Protecci%C3%B3n_en_sistemas_El%C3%A9ctricos_Unidad_IV_Protecci%C3%B3n_de_Transformadores)
- Amparo. (2016). Obtenido de [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27146/TFG\\_Amparo-Maria\\_Moreno\\_Parcero\\_2016.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27146/TFG_Amparo-Maria_Moreno_Parcero_2016.pdf)
- Amparo, M. (2016). Obtenido de [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27146/TFG\\_Amparo-Maria\\_Moreno\\_Parcero\\_2016.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27146/TFG_Amparo-Maria_Moreno_Parcero_2016.pdf)
- Andés, G. (2015). Obtenido de <http://imseingenieria.blogspot.com/2015/09/proteccion-diferencial-de.html>
- Ángel, G. M. (2012). Obtenido de <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2720/tfm51.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=La%20protecci%C3%B3n%20diferencial%20en%20transformadores,enn%20ambos%20lados%20del%20transformador.&text=Cuando%20se%20compara%20la%20corriente,caso%20de%20co>
- Antonio Viera. (2017). Obtenido de <https://rosario.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/1592/1/Marcos%20Ant%C3%B4nio%20Lindolfo.pdf>
- AreaTecnologia. (2016). Obtenido de <https://areatecnologia.com/electricidad/transformador-de-corriente.html>

- Bregante Checa, P. V. (2015). Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Frank\\_Felipe\\_Santamaria/publication/347038782\\_PROTECCIONES\\_EN\\_LINEAS\\_ELECTRICAS/links/5fd7a4e7299bf140880f4d20/PROTECCIONES-EN-LINEAS-ELECTRICAS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Frank_Felipe_Santamaria/publication/347038782_PROTECCIONES_EN_LINEAS_ELECTRICAS/links/5fd7a4e7299bf140880f4d20/PROTECCIONES-EN-LINEAS-ELECTRICAS.pdf)
- Carlos, C. (s.f.). Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos78/tipos-aplicaciones-conexiones-transformadores-trifasicos/tipos-aplicaciones-conexiones-transformadores-trifasicos2.shtml#:~:text=La%20conexi%C3%B3n%20estrella%20%E2%80%93%20estrella%20tiene,las%20cargas%20no%20est%C3>
- Carlos, R. (2017). Obtenido de [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-2500/UCC2800\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-2500/UCC2800_01.pdf)
- Ceballos, J. (2014). Obtenido de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/14107/CB-0509334.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CENACE. (2013). Obtenido de <http://revistaenergia.cenace.org.ec/index.php/cenace/article/view/111/109>
- CFE. (2019). Obtenido de <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/s/G0100-07.pdf>
- Chunga Atalaya, L. F. (2018). Obtenido de [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/37698/chunga\\_al.pdf?sequence=1](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/37698/chunga_al.pdf?sequence=1)
- CITT. (2019). Obtenido de [http://www.udb.edu.sv/udb\\_files/recursos\\_guias/electrica-ingenieria/proteccion-y-coordinacion-de-sistemas-de-potencia/2019/ii/guia-7.pdf](http://www.udb.edu.sv/udb_files/recursos_guias/electrica-ingenieria/proteccion-y-coordinacion-de-sistemas-de-potencia/2019/ii/guia-7.pdf)
- Coes Sinac. (2015). Obtenido de <https://docplayer.es/16220524-Criterios-de-ajuste-y-coordinacion-de-los-sistemas-de-proteccion-del-sein.html>
- Concha, P. (s.f.). Obtenido de [patricioconcha.ubb.cl/educ/public\\_www/capitulo1/fusibles.html](http://patricioconcha.ubb.cl/educ/public_www/capitulo1/fusibles.html)
- Coursehero. (2020). Obtenido de <https://www.coursehero.com/file/22308944/Sistemas-de-enfriamiento-de-transformadores/>
- Curso Tesla. (s.f.). Obtenido de <https://cursostesla.com/wp-content/uploads/2018/04/Libro-analisis-de-fallas-con-portada.pdf>
- CYME. (2020). Obtenido de <https://www.cyme.com/es/software/cymtcc/>
- Data Sheet SEL-787-2, -3, -4. (2021). Obtenido de [https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Data%20Sheets/787-2-3-4\\_DS\\_20200331.pdf?v=20200522-172828](https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Data%20Sheets/787-2-3-4_DS_20200331.pdf?v=20200522-172828)
- David, L. (2019). Obtenido de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/30020>
- Diego, V. (2007). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1271/1/CD-0710.pdf>
- Dielco. (2020). Obtenido de <https://dielco.co/lineas-de-negocio/transmision-electrica/reconectores-dielco/>

- Dorf, R. S. (s.f.). Obtenido de [https://tecdigital.tec.ac.cr/repo/rea/electronica/el-2114/un\\_3/33\\_conexiones\\_y\\_conversiones\\_entre\\_y\\_estrella\\_y\\_delta.html](https://tecdigital.tec.ac.cr/repo/rea/electronica/el-2114/un_3/33_conexiones_y_conversiones_entre_y_estrella_y_delta.html)
- Dreamstime. (2021). Obtenido de <https://es.dreamstime.com/fotos-de-archivo-el-tanque-del-transformador-y-torrecillas-de-alto-voltaje-y-cielo-gris-image39458773>
- Eduardo, M. (2017). Obtenido de <https://docplayer.es/33832539-Sel-487e-rele-de-proteccion-del-transformador.html>
- Electrical Engineering Portal. (2021). Obtenido de <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/relays/siprotec-protection-relays>
- ElectroMundo. (2020). Obtenido de <https://electromundo.pro/tipos-de-transformadores-de-potencia/>
- Electronica, L. (2021). Obtenido de <https://electronicalugo.com/transformador-trifasico/>
- Elnaily, N. (2017). Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/327324077\\_Experimental\\_and\\_EMTP\\_Modeling\\_of\\_Numerical\\_Transformer\\_Protection\\_for\\_Enhancing\\_Relay\\_Transient\\_Performance\\_A\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/327324077_Experimental_and_EMTP_Modeling_of_Numerical_Transformer_Protection_for_Enhancing_Relay_Transient_Performance_A_Case_Study)
- energeticaHoy. (2018). Obtenido de <https://www.energeticahoy.com/post/2018/02/15/la-tasa-de-falla-de-los-transformadores-en-aceite-podr-c3-ada-aumentar-500-en-10-a-c3-b1o>
- Faradayos . (2020). Obtenido de <https://faradayos.blogspot.com/2015/01/conexion-delta-estrella-banco-transformadores.html>
- Festo. (2021). Obtenido de <https://www.festo-didactic.com/int-es/learning-systems/equipos-de-practicas/electronica-plc/tecnologia-de-energia-electrica/numerical-distance-relay.htm?fbid=aW50LmVzLjU1Ny4xNC4xOC4xMzU5LjgzMjM>
- Gers. (2013). *APPLICATIONS AND SETTINGS. PROTECTION OF TRANSFORMERS .*
- Gers, J. (2013). *PROTECTION OF TRANSFORMERS. PROTECTION OF TRANSFORMERS - FUNDAMENTALS.*
- Gil, A. (2015). Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/4639926/>
- GlobeCore. (2008). Obtenido de <https://globecore.com/es/buchholz-relay-found-only-on-transformers-with/>
- GlobeCore. (2021). Obtenido de <https://globecore.com/es/cooling-of-transformer/>
- Granero, A. (2015). Obtenido de <http://imseingenieria.blogspot.com/2015/09/proteccion-diferencial-de.html>
- Granero, A. (2015). Obtenido de <http://imseingenieria.blogspot.com/2015/09/proteccion-diferencial-de.html>
- Hartman, W. (2018). Obtenido de [https://na.eventscloud.com/file\\_uploads/fcdbd21cac1909692839b242e46c9a3c\\_TransformerProtection\\_\\_180306.pdf](https://na.eventscloud.com/file_uploads/fcdbd21cac1909692839b242e46c9a3c_TransformerProtection__180306.pdf)

- Hartmann, W. (2018). Obtenido de [https://na.eventscloud.com/file\\_uploads/fcddb21cac1909692839b242e46c9a3c\\_TransformerProtection\\_\\_180306.pdf](https://na.eventscloud.com/file_uploads/fcddb21cac1909692839b242e46c9a3c_TransformerProtection__180306.pdf)
- Hjawaer, P. (2015). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/71399147.pdf>
- Illustrationprize. (s.f.). Obtenido de <https://illustrationprize.com/es/572-types-of-relays.html>
- Illustrationprize. (2020). Obtenido de <https://illustrationprize.com/es/629-percentage-differential-relay.html>
- Indiamart. (2021). Obtenido de <https://www.indiamart.com/proddetail/salzer-relay-15091552512.html>
- INEL. (2020). Obtenido de [https://inelinc.com/?fbclid=IwAR1F\\_Xj6SrMX729cbENfesz\\_FJbHCHgAiHgPnNo5Xx0tZkaly4d8zB\\_\\_0xg](https://inelinc.com/?fbclid=IwAR1F_Xj6SrMX729cbENfesz_FJbHCHgAiHgPnNo5Xx0tZkaly4d8zB__0xg)
- Ing. Margil S. (2005). Obtenido de [https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Proteccion\\_Sistemas\\_Electricos\\_Potencia.pdf](https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Proteccion_Sistemas_Electricos_Potencia.pdf)
- Jaime, E. (2010). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2093/13/UPS-GT000155.pdf>
- Jessica, S. (2018). Obtenido de <file:///Downloads/UPS-GT002452.pdf>
- Jorge, S. (2011). Obtenido de <https://es.slideshare.net/jiso45/fallas-electricas>
- Jose. (2020). Obtenido de <https://automatismoiindustrial.com/curso-carnet-instalador-baja-tension/motores/1-3-6-transformadores/1-3-6-13-protecciones-propias-de-transformador/>
- Juan Manuel Gers. (2013). *PROTECTION OF TRANSFORMERS*. Obtenido de PDF.
- JVasquez y JYopez, director JSaavedra. (2013). Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24743/1/Resumen%20Tesis%20%20JVasquez%20y%20JYopez%2c%20director%20JSaavedra%20%203%20jun%202013.pdf>
- Leon, G. (2019). *Competencia 5. Relés de proteccion* .
- Leon, I. G. (2019). *Elementos que conforman una red. Unidad de competencia 2* .
- Leon, I. G. (s.f.). *REGIMENES NORMALES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION. UNIDAD DE COMPETENCIA 1*.
- Leonardo Alvarez. (2020). Obtenido de <https://www.mikeelectronica.com/blogs/noticias/cuales-son-los-elementos-importantes-en-los-sistemas-de-proteccion-en-sistemas-electricos-de-potencia>
- Lino, A. (2017). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/198124924.pdf>
- Luis, A. (2015). Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/275770730\\_Apuntes\\_de\\_Sistemas\\_Electricos\\_de\\_Potencia](https://www.researchgate.net/publication/275770730_Apuntes_de_Sistemas_Electricos_de_Potencia)

- M. O. Oliveira, I. M. (2012). Obtenido de [https://www.academia.edu/download/40304388/Oliveira\\_et\\_al\\_Paper\\_12.pdf](https://www.academia.edu/download/40304388/Oliveira_et_al_Paper_12.pdf)
- manuelvieira. (2016). Obtenido de <https://proteccionessubestacionesmanuelvieira.wordpress.com/2016/02/>
- ManuelVieria. (2016). Obtenido de <https://proteccionessubestacionesmanuelvieira.wordpress.com/2016/02/>
- Maria, M. (2019). Obtenido de <https://tecnoticias.net/2019/04/27/exploracion-de-la-proteccion-de-transformadores-de-potencia-para-sistemas-de-potencia-tipos-de-fallas-y-proteccion-diferencial/>
- Mario H., R. I. (2015). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10450/1/UPS-GT001540.pdf>
- Martha, B. (2015). Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5177/621316B412.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mejia, J. (2015). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1279/14/UPS-CT002213.pdf>
- MiCOMP64x Schneider Electric . (2021). Obtenido de <https://www.se.com/es/es/product-range/60773-micom-p64x/#overview>
- N.Y.R. LIMITED PARTNERSHIP. (2015). Obtenido de <http://www.nyr.co.th/portfolio-items/sel-387s-en/>
- Napoleon Navarrete, R. U. (2015). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8573/3/CD-5782.pdf>
- Nayiver Caicedo, C. A. (2018). Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/13785/15185>
- Noberto A. (2015). Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/52143020/11.pdf?1489458171=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTRANSFORMADORES\\_TRIFASICOS.pdf&Expires=1608229947&Signature=Y9rW2SiRzn5yANsXNvRAEIBjrJMRzngBkbNlxzEHesLtqDIF4nCSNYo3MI~7Dd9I55~7luwScwww7co](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/52143020/11.pdf?1489458171=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTRANSFORMADORES_TRIFASICOS.pdf&Expires=1608229947&Signature=Y9rW2SiRzn5yANsXNvRAEIBjrJMRzngBkbNlxzEHesLtqDIF4nCSNYo3MI~7Dd9I55~7luwScwww7co)
- Noja Power. (2021). Obtenido de <https://www.generandowatts.com/productos/restauradores/>
- Omar, M. (2008). Obtenido de <https://es.slideshare.net/omarmatsls/doc-1-dia-2-protecin-sobrecooriente>
- OMICRON. (2012). Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=bREF\\_m1LfNU](https://www.youtube.com/watch?v=bREF_m1LfNU)
- Orlys, E. (2005). Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Principio-de-accion-de-las-protecciones-diferenciales\\_fig1\\_268329917](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Principio-de-accion-de-las-protecciones-diferenciales_fig1_268329917)
- Orlys, T. (PDF). *Las Protecciones para los transformadores de potencia*. Obtenido de Protecciones de las Subestaciones de Distribución.

- Pablo E. (2010). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2093/13/UPS-GT000155.pdf>
- Pablo, S. (2013). Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos78/analisis-transformadores-trifasicos/analisis-transformadores-trifasicos2.shtml>
- Potencia Literaria. (2015). Obtenido de <https://asp2dh.wordpress.com/fallas-desbalanceadas-de-los-sistemas-de-potencia/>
- Protecciones Schneider Electric. (2021). Obtenido de [https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doca0102-micrologic-x/Spanish/BM\\_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X\\_b5effd44\\_es\\_T001597810.xml/\\$/CHP\\_ProtectionFunctions\\_b5effd44\\_es\\_T001598176](https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doca0102-micrologic-x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/$/CHP_ProtectionFunctions_b5effd44_es_T001598176)
- Ramirez, S. (2003). Obtenido de [samuelramirezcastano.2003.pdf \(3.392Mb\)](#)
- Ras, E. (7ma edición). *Libro*. Obtenido de Transformadores de potencia, de medida y de proteccion: <https://dotorresg.files.wordpress.com/2011/12/transformadores-de-potencia-de-medida-y-de-proteccion.pdf>
- Richard, Z. (2018). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/918/1/CD-1796%282008-11-19-10-42-42%29.pdf>
- Rivera, J. (2015). Obtenido de [https://www.academia.edu/8127609/TIPOS\\_DE\\_CONEXIONES\\_DE\\_TRANSFORMADORES TRIFASICOS VENTAJAS Y DESVENTAJAS PRESENTADO POR](https://www.academia.edu/8127609/TIPOS_DE_CONEXIONES_DE_TRANSFORMADORES_TRIFASICOS_VENTAJAS_Y_DESVENTAJAS_PRESENTADO_POR)
- Roberto Figueroa, B. E. (2014). Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/31844/1/ESTUDIOS%20DE%20COORDINACION%20DE%20LAS%20PROTECCIONES%20POR%20M%C3%89TODOS%20COMPUTARIZADOS%20APLICADOS%20A%20LA%20CENTRAL%20GONZALO%20ZEVALLOS.pdf>
- Rodríguez Alava, J. L. (2018). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15736/1/UPS-GT002202.pdf>
- RTE. (2021). Obtenido de <https://rte.mx/tipos-de-transformadores-electricos>
- S&C Electric company. (2004). Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/34163232/fusibles-de-potencia>
- S&C Electric Company. (2020). Obtenido de <https://www.sandc.com/es/productos-y-servicios/productos/fusibles-de-potencia-sm/>
- Samuel, R. (s.f.). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/11053566.pdf>
- Sánchez Martos, C. L. (2017). Obtenido de <http://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/996/5/9788491593096.pdf>
- Schneider Electric MiCOM P64x. (2021). Obtenido de <https://www.se.com/au/en/product-range/60773-easergy-micom-p64x-protection-relays/#overview>
- Schneider Electric . (2021). Obtenido de <https://www.se.com/es/es/product-range/60773-micom-p64x/?parent-subcategory-id=4680&filter=business-6-distribuci%C3%B3n-el%C3%A9ctrica-en-media-tensi%C3%B3n-y-smartgrid#overview>

- SEL - 387. (2021). Obtenido de <https://selinc.com/products/387/>
- SEL. (2021). Obtenido de <https://selinc.com/es/products/487E/>
- SEL- 387E. (2021). Obtenido de <https://selinc.com/products/387E/>
- SEL 787. (2021). Obtenido de <https://selinc.com/es/products/787-3-4/>
- SEL Brasil. (2015). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=UCGNwOp1PoM>
- SEL-387A. (2021). Obtenido de <https://selinc.com/products/387A/>
- Selvas, P. (2018). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/385794299/Criterios-de-Ajuste-Transformadores-v2014>
- Sergio, D. (2013). Obtenido de <http://proteccioneselectricas101.blogspot.com/2013/09/proteccion-5051-tambien-conocida-como.html>
- SIEMENS - SIPROTEC 7UT613. (2021). Obtenido de <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-4/transformer-differential-protection/transformer-differential-protection-siprotec-7ut613.html>
- SIEMENS 7UT63. (2021). Obtenido de <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-4/transformer-differential-protection/transformer-differential-protection-siprotec-7ut63.html>
- SIEMENS Siprotec 7UT612. (2021). Obtenido de <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-4/transformer-differential-protection/transformer-differential-protection-siprotec-7ut612.html>
- Sierra Cruz, R. A. (2018). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19356/1/CD-8736.pdf>
- Simbolos Electricos y Electronicos. (2021). Obtenido de <https://www.simbologia-electronica.com/simbolos-electricos-electronicos/simbolos-transformadores-electricos.htm>
- SIPROTEC 7UT86. (2021). Obtenido de <https://new.siemens.com/de/de/produkte/energie/energieautomatisierung-und-smart-grid/schutztechnik/siprotec-5/transformatordifferentialschutz/transformatordifferentialschutz-siprotec-7ut86.html>
- tecnoSanMartin . (2012). Obtenido de [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftecnoblogsanmartin.wordpress.com%2F2012%2F01%2F19%2Fel-transformador-partes%2F&psig=AOvVaw3Lk2GKvqhSxmN5TekRINcc&ust=1608420246017000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCNC5os\\_W200CFQAAAAAdAAAAABAJ](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftecnoblogsanmartin.wordpress.com%2F2012%2F01%2F19%2Fel-transformador-partes%2F&psig=AOvVaw3Lk2GKvqhSxmN5TekRINcc&ust=1608420246017000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCNC5os_W200CFQAAAAAdAAAAABAJ)
- TECSA. (2020). Obtenido de <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/las-fallas-mas-comunes-en-un-transformador/>

TRANSELECTRIC. (2016).

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9929/1/MODELACION%3FN%20Y%20AN%3FLISIS%20DEL%20REL%3F%20DIFERENCIAL%20PARA%20TRANSFORMADORES%20DE%20POTENCIA%20CON%20CONEXION%3FN%20Y%20USAN.pdf>.

Verónica Barberán. (2021). Obtenido de [https://miro.com/app/board/o9J\\_l\\_2AYX4=](https://miro.com/app/board/o9J_l_2AYX4=/)/

Victor, Y. (2010). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2030/1/CD-2850.pdf>

Villalaz, J. (2015). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/275164094/Clasificacion-de-Las-Fallas-en-Los-Sistemas-Elctricos-de-Potencia>

Yasmin, C. (2018). Obtenido de

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Frevistas.utb.edu.ec%2Findex.php%2Fsr%2Farticle%2Fdownload%2F598%2F398%2F&psig=AOvVaw3RmwhVcREGJAZpPnwUNDMn&ust=1624048865602000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjhxqFwoTCNCEidPDn\\_ECFQAAAAAdAAAAABAY](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Frevistas.utb.edu.ec%2Findex.php%2Fsr%2Farticle%2Fdownload%2F598%2F398%2F&psig=AOvVaw3RmwhVcREGJAZpPnwUNDMn&ust=1624048865602000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjhxqFwoTCNCEidPDn_ECFQAAAAAdAAAAABAY)