



**Estudio operación del sistema de protección eléctrico para instructivo operativo ante la actuación de funciones de protección eléctrica para una central 26 MW**

Mateo Restrepo Arredondo

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesores

Walter Mauricio Villa Acevedo, Magister en Ingeniería

Hervin Padilla Mayo, Profesional en Gestión Técnica e Infraestructura

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	Restrepo Arredondo [1]
<b>Referencia</b>	[1] M. Restrepo Arredondo, “Estudio operación del sistema de protección eléctrico para instructivo operativo ante la actuación de funciones de protección eléctrica para una central 26 MW.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Agradecimientos a ISAGEN por el conocimiento impartido.



Centro de Documentación Facultad de Ingeniería. CENDOI.

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Sergio Iván Restrepo Ochoa.

**Jefe departamento:** Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Este trabajo va dedicado a toda mi familia, quienes estuvieron siempre pendiente de mis progresos académicos y que de alguna u otra manera me brindaron todo su apoyo cuando más lo necesité, también a todos los docentes del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antioquia y los maestros de cátedra por impartir todo su conocimiento e incentivar las ganas de aprender y de asumir nuevos retos en el mundo de la ingeniería eléctrica, sin ellos el amor hacia esta carrera seguramente nunca hubiese logrado ser tan fuerte como ahora lo es.

## **Agradecimientos**

Agradecimientos a la gestión del docente y Coordinador de Prácticas Académicas Nelson Londoño, quien estuvo atento al desarrollo de mi proceso durante toda la gestión de la práctica académica, al docente Walter Villa, mi asesor interno quién estuvo pendiente del desarrollo de la práctica y me guió al correcto desarrollo de la misma, al Ingeniero Hervin Padilla, mi asesor externo al que siempre le estaré agradecido por el tiempo dedicado, todos los conocimientos transferidos, oportunidades y experiencias que me brindó en el mundo de la ingeniería eléctrica dentro de la sede principal de ISAGEN y también en las centrales de generación, al Ingeniero Juan Carlos Hernández quién me brindó el primer acercamiento dentro de las centrales de generación y siempre se preocupó por mi aprendizaje dentro de estas, también quiero agradecer a la empresa comercializadora y generadora de electricidad ISAGEN por permitirme desarrollar mis primeras experiencias laborales en un gran entorno laboral y en una empresa tan importante para el país y agradecer principalmente a mis padres, quienes se esforzaron y sacrificaron para lograrme dar el ánimo y las ganas de estudiar y que siempre se preocuparon para que todo esto fuera posible.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	14
ABSTRACT .....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL: .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	16
3. MARCO TEÓRICO .....	17
3.1 PROTECCIÓN ELÉCTRICA: .....	17
3.2 CENTRAL DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA: .....	17
3.3 TRANSFORMADOR ELÉCTRICO: .....	18
3.4 TURBINA HIDRÁULICA:.....	18
3.5 GENERADOR SÍNCRONO: .....	18
3.6 SERVICIOS AUXILIARES EN HIDROELÉCTRICAS:.....	19
3.7 FUNCIONES DE PROTECCIÓN:.....	20
3.8 RELÉ DE PROTECCIÓN:.....	20
3.9 ESQUEMAS DE PROTECCIÓN:.....	20
3.10 ESQUEMAS DE PARADA:.....	20
3.10.1 ESQUEMA DE PARADA DE EMERGENCIA: .....	20
3.10.2 ESQUEMA DE PARADA PARCIAL: .....	21
3.10.3 ESQUEMA DE PARADA RÁPIDA: .....	21
3.10.4 MATRIZ DE DISPAROS:.....	21
4. METODOLOGÍA.....	22
4.1 ETAPA 1: .....	22
4.2 ETAPA 2:.....	22

4.3	ETAPA 3:	23
4.4	ETAPA 4:	23
4.5	ETAPA 5:	23
5.	RESULTADOS	23
5.1	DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE PROTECCIONES	23
5.2	TABLEROS DE PROTECCIÓN:	26
5.3	PROTECCIÓN DEL GENERADOR:	26
5.4	PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR:	29
5.5	PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN:	30
5.6	RECOMENDACIONES GENERALES:	32
5.7	FUNCIONES DE PROTECCIÓN DE GENERADORES DE LA CENTRAL	32
5.7.1	PROTECCIÓN CONTRA SOBRE Y BAJA FRECUENCIA ANSI 81 O/U:	32
5.7.1.1	ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:	33
5.7.1.2	ACTIVIDADES PARA REALIZAR:	34
5.7.2	PROTECCIÓN CONTRA SUBTENSIÓN EN EL GENERADOR ANSI 27:	34
5.7.2.1	ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:	34
5.7.2.2	ACTIVIDADES PARA REALIZAR:	35
5.7.3	PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIÓN EN EL GENERADOR ANSI 59:	36
5.7.3.1	ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:	36
5.7.3.2	ACTIVIDADES PARA REALIZAR:	37
5.7.4	PROTECCIÓN CONTRA PÉRDIDA DE SINCRONISMO ANSI 78:	38
5.7.4.1	ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:	38
5.7.4.2	ACTIVIDADES PARA REALIZAR:	39
5.7.5	PROTECCIÓN CONTRA SOBREENCITACIÓN ANSI 24:	40
5.7.5.1	ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:	40

<b>5.7.5.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	41
<b>5.7.6 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA ANSI 46:</b> .....	42
<b>5.7.6.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	42
<b>5.7.6.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	43
<b>5.7.7 PROTECCIÓN CONTRA POTENCIA INVERSA ANSI 32:</b> .....	44
<b>5.7.7.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	44
<b>5.7.7.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	45
<b>5.7.8 PROTECCIÓN CONTRA ENERGIZACIÓN INADVERTIDA ANSI 50/27:</b> .....	46
<b>5.7.8.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	46
<b>5.7.8.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	47
<b>5.7.9 PROTECCIÓN CONTRA PÉRDIDA DE EXCITACIÓN ANSI 40:</b> .....	48
<b>5.7.9.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	48
<b>5.7.9.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	49
<b>5.7.10 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGA TÉRMICA ANSI 49:</b> .....	50
<b>5.7.10.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	50
<b>5.7.10.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	51
<b>5.7.11 PROTECCIÓN CONTRA FALLA DE INTERRUPTOR DEL GENERADOR ANSI 50BF:</b> .....	51
<b>5.7.11.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	52
<b>5.7.11.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	53
<b>5.7.12 SUPERVISIÓN DE FALLO FUSIBLE ANSI 60FL:</b> .....	54
<b>5.7.12.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	54
<b>5.7.12.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	55
<b>5.7.13 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE GENERADOR ANSI 87G:</b> .....	55
<b>5.7.13.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	56
<b>5.7.13.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	57

<b>5.7.14 PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIÓN RESIDUAL ANSI 59N:</b> .....	57
<b>5.7.14.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	58
<b>6.7.14.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	59
<b>5.7.15 PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIÓN DE TERCER ARMÓNICO ANSI 59THD:</b> .....	59
<b>6.7.15.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	60
<b>5.7.15.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	61
<b>5.7.16 PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE RESIDUAL DEL GENERADOR ANSI 50N/51N:</b> .....	61
<b>5.7.16.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	62
<b>5.7.16.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	63
<b>5.7.17 PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE RESTRINGIDA POR TENSION ANSI 51V:</b> .....	64
<b>5.7.17.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	64
<b>5.7.17.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	65
<b>5.7.18 PROTECCIÓN DE FALLA A TIERRA ROTOR ANSI 64F:</b> .....	66
<b>5.7.18.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	66
<b>5.7.18.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	67
<b>5.8 FUNCIONES DE PROTECCIÓN ACTIVAS EN LOS TRANSFORMADORES DE LA CENTRAL.</b> .....	67
<b>5.8.1 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR ANSI 87T:</b> .....	67
<b>6.8.1.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	68
<b>5.8.1.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	69
<b>5.8.2 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE FALLA A TIERRA ANSI 87N:</b> .....	69
<b>5.8.2.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	70
<b>5.8.2.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	71
<b>5.9 FUNCIONES DE PROTECCIÓN ACTIVAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE LA CENTRAL.</b> .....	71
<b>5.9.1 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO ANSI 51:</b> .....	72

<b>5.9.1.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	72
<b>5.9.1.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	73
<b>5.9.2 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE TIEMPO RESIDUAL ANSI 51N:</b> .....	73
<b>5.9.2.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	74
<b>5.9.2.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	75
<b>5.9.3 PROTECCIÓN DISTANCIA EN LA LÍNEA ANSI 21:</b> .....	75
<b>5.9.3.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	76
<b>5.9.3.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	77
<b>5.9.4 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL ANSI 67:</b> .....	77
<b>5.9.4.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	77
<b>5.9.4.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	78
<b>5.9.5 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL RESIDUAL ANSI 67N:</b> .....	78
<b>5.9.5.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	79
<b>5.9.5.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	80
<b>5.9.6 PROTECCIÓN CONTRA SUBTENSIÓN Y SOBRETENSIÓN EN LA LÍNEA: ANSI 27/59:</b> .....	80
<b>5.9.6.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	80
<b>5.9.6.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	81
<b>5.9.7 ESQUEMA DE TELEPROTECCIÓN ANSI 21/85:</b> .....	81
<b>5.9.7.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	82
<b>5.9.7.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	83
<b>5.9.8 ESQUEMA DE TELEPROTECCIÓN ANSI 67/85:</b> .....	83
<b>5.9.8.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	83
<b>5.9.8.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	84
<b>5.9.9 PROTECCIÓN DE VERIFICACIÓN DE SINCRONISMO ANSI 25:</b> .....	84
<b>5.9.9.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:</b> .....	85



<b>5.9.8.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:</b> .....	86
<b>5.10 ELABORACIÓN DEL MANUAL DE ATENCIÓN RÁPIDA DE PROTECCIONES:</b> .....	86
<b>5.11 ELABORACIÓN DEL CURSO VIRTUAL PARA OPERADORES Y ASISTENTES TÉCNICOS:</b> .....	88
<b>5.12 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CARGA DE LA CENTRAL EN DIGSILENT:</b> .....	90
<b>6. ANÁLISIS:</b> .....	92
<b>7. CONCLUSIONES:</b> .....	94
<b>8. REFERENCIAS:</b> .....	95

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Ejemplo de matriz de disparos de un relé de protección.....	22
Tabla 2. Funciones de protección ajustadas en los relés principales de los generadores.....	27
Tabla 3. Funciones de protección que producen parada de emergencia o parada parcial del generador.....	28
Tabla 4. Funciones ajustadas en los relés de protección de los transformadores de potencia .....	30
Tabla 5. Funciones de protección en los relés de las líneas de transmisión.....	31
Tabla 6. Despachos de potencia activa y reactiva analizados .....	91
Tabla 7. Tensiones en nodos y barras con los dos generadores en operación.....	92
Tabla 8. Porcentaje de carga en los equipos con las dos unidades de generación en servicio.....	92

## LISTA DE FIGURAS:

<i>Figura 1. Esquema general de conexión de unidad-transformador en la Central. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2. Tablero de protección principal de una unidad de generación. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3. Tablero de protección principal de los transformadores de la Central. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4. Tablero de protección principal de las líneas de transmisión. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 5. Esquema de conexión función de protección 81U/O. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 6. Esquema y conexión de la función ANSI 27. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 7. Esquema y conexión de la función ANSI 59. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 8. Esquema y conexión de la función ANSI 78. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 9. Esquema y conexión de la función ANSI 24. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10. Esquema y conexión de la función ANSI 46. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 11. Esquema y conexión de la función ANSI 32. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Esquema y conexión de la función ANSI 50/27. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 13. Esquema y conexión de la función ANSI 40. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 14. Esquema y conexión de la función ANSI 49. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15. Esquema y conexión de la función ANSI 50BF. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 16. Esquema y conexión de la función ANSI 60. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 17. Esquema y conexión de la función ANSI 87G. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 18. Esquema y conexión de la función ANSI 59N. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 19. Esquema y conexión función ANSI 59THD. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 20. Esquema y conexión función ANSI 50N/51N. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 21. Esquema y conexión función ANSI 51V. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 22. Esquema y conexión de la función ANSI 64F. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 23. Esquema y conexión de la función ANSI 87T. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 24. Esquema y conexión de la función ANSI 87T. ....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 25. Esquema y conexión de la función ANSI 51. ....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 26. Esquema y conexión de la función ANSI 51N. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 27. Esquema y conexión de la función ANSI 21. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 28. Esquema y conexión función ANSI 67. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 29. Esquema y conexión de la función ANSI 67N. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 30. Esquema y conexión de la función ANSI 27/59. ....</i>	<i>81</i>

<i>Figura 31. Esquema y conexión función ANSI 21/85. ....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 32. Esquema y conexión función ANSI 67/85. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 33. Esquema y conexión función ANSI 25. ....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 34. Una de las páginas sobre la función ANSI 27 del manual operativo de la Central. ...</i>	<i>88</i>
<i>Figura 35. Parte del video del curso de protecciones contra sobrecorrientes en generadores. ...</i>	<i>89</i>
<i>Figura 36. Parte del video del curso de protecciones contra sobrecorrientes en generadores. ...</i>	<i>89</i>
<i>Figura 37. Parte del video del curso de protecciones contra sobrecorrientes en generadores. ...</i>	<i>90</i>
<i>Figura 38. Curva de capacidad genérica de los generadores de la Central. ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 39. Tablero de protección inspeccionado en casa de máquinas. ....</i>	<i>93</i>

## **SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS**

<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ANSI</b>	American National Standards Institute
<b>CT</b>	Transformador de corriente
<b>PT</b>	Transformador de potencial
<b>TD</b>	Tablero de Distribución
<b>TRF</b>	Transformador Eléctrico
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia

## RESUMEN

En ese estudio se realizó la recopilación de la información electrotécnica sobre una Pequeña Central Hidroeléctrica ubicada en el Oriente del departamento de Antioquia con el fin de adquirir la información de todos los equipos, sistemas de control, máquinas dinámicas y estáticas, disposición física de la subestación de transmisión y sus respectivos tableros de control con el objetivo de disponer de esta para crear una guía de acción rápida de manipulación de los relés de protección y el aprendizaje de las funciones de protección eléctricas activas en los relés para todos los operadores y asistentes técnicos residentes en la Central para una óptima, correcta y oportuna manipulación de los relés de protección de toda la casa de máquinas de la Central, con esto se busca educar y capacitar al personal técnico frente a los posibles eventos de falla a los que están expuestos todos los componentes del sistema de generación de la Central y que además puedan tomar una correcta decisión frente a la manipulación de los relés presentes en los tableros de protección de los generadores eléctricos, transformadores y las líneas de transmisión que salen de la subestación. Con algunas de las funciones de protección, colaboración con el equipo de diseño de la empresa, se recreó un curso virtual para facilitar el aprendizaje de la guía de acción rápida.

***Palabras clave* — Relé de protección, Función de protección, Central de Generación Hidroeléctrica, Generador Eléctrico, Transformador Eléctrico, Línea de Transmisión.**

## ABSTRACT

In this study, the compilation of electrotechnical information on a Small Hydroelectric Power Plant located in the East of the department of Antioquia was carried out in order to acquire the information of all the equipment, control systems, dynamic and static machines, physical layout of the substation transmission and their respective control boards with the aim of having this to create a quick action guide for handling protection relays and learning the electrical protection functions active in the relays for all operators and resident technical assistants in the Central for optimal, correct and timely handling of the protection relays of the entire powerhouse of the Central, with this the aim is to educate and train the technical personnel in the face of possible failure events to which all the components of the generation system of the Power Plant and that can also make a correct decision regarding the manipulation of the relays present in the

protection panels of the electric generators, transformers and the transmission lines that leave the substation. With some of the protection functions, collaboration with the design team of the company, a virtual course was recreated to facilitate the learning of the quick action guide.

**Keywords — Protective Relay, Protective Function, Hydroelectric Power Plant, Electric Generator, Electric Transformer, Power Line.**

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de potencia eléctrico está compuesto en tres partes, generación, transmisión y distribución, por lo que este inicia en las centrales de generación de energía eléctrica, ya sea en centrales térmicas por medio de presión de vapor accionan turbinas acopladas con alternadores, centrales hidráulicas que aprovechan la energía de los ríos almacenada en embalses, así como también en los sitios de generación renovable donde se aprovecha la irradiancia solar para generar energía eléctrica a través de paneles solares o en parques eólicos que usan la velocidad del viento para que cuando las turbinas eólicas giren generen energía eléctrica, sin embargo, estos lugares de generación están expuestos a grandes fluctuaciones en su operación, se pueden presentar diferentes escenarios de operación que pueden sin una adecuada supervisión, estudio y análisis de los resultados obtenidos en este último, seguramente lleven a tener daños en los equipos y grandes pérdidas económicas por su mala gestión en cuanto a operación se refiere.

Se procede entonces a realizar el estudio de operación de una Central Hidroeléctrica ubicada en el oriente del departamento de Antioquia, ubicada entre los municipios de Granada y San Carlos, con una capacidad de generación de 26 MW, equipada con dos unidades de generación que salen con dos campos de línea a 115 kV hacia las subestaciones eléctricas de distribución. Dentro de esta central, además de sus unidades generadores y sus respectivos transformadores de potencia elevadores, se requieren de equipos eléctricos que trabajan para los diversos servicios auxiliares que se requieren para el funcionamiento de la central, entre estas se distinguen, sistemas de refrigeración de las máquinas estáticas y dinámicas, iluminación del sitio, tableros principales, centros de control de motores, y la alimentación de las máquinas de instrumentación para la protección eléctrica de los equipos. Actualmente, el lugar cuenta con su respectivo diagrama unifilar y su archivo de simulación en el Software DIGSILENT Power Factory, con esta herramienta de simulación se realizará el análisis sobre los escenarios de

operación, disposición física de los equipos y máquinas, dispositivos de protección eléctrica y sus respectivas funciones de protección en específico. Se estudiará cuáles son las funciones de protección activas para los generadores eléctricos, los transformadores de potencia que se tengan en campo, transformadores de servicios auxiliares y los campos de línea que se tengan en la subestación eléctrica que debería estar adyacente o muy cercana a la casa de máquinas de la central hidroeléctrica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL:**

Diseñar manual de instrucción rápida para reacción ante actuación de las funciones de protección eléctrica disponibles en los relés de protección de una central hidroeléctrica de 26 MW en el que se tendrá descripción de la disposición física de la Central, agrupación de las funciones de protección por conjunto relé-equipos a proteger, descripción de la función y pasos a realizar si se activa, además, apoyar en la creación de curso virtual para el personal técnico de centrales de generación.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Diseñar guía educativa para asistentes técnicos de la Central Hidroeléctrica.
- Describir funciones de protección eléctricas disponibles en los relés de protección de la Central Hidroeléctrica.
- Construir procedimiento sobre acciones ejecutadas por la función de protección en los relés de protección cuando se activa una función.
- Elaborar una serie de actividades a realizar para cada función de protección disponible en los relés de la Central cuando se ha producido un disparo de esta.
- Apoyar en el diseño de curso educativo Audiovisual de Protecciones Eléctricas por medio de elaboración de imágenes y explicaciones de audio en colaboración con el equipo de diseño de la empresa para asistentes técnicos de las centrales de generación.
- Realizar simulaciones de flujo de carga de la Central considerando escenarios operativos en DIGSILENT para verificar si los equipos que la componen están expuestos a disparos indeseados de los relés de protección por bajas tensiones, sobretensiones o sobrecargas eléctricas.



### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 PROTECCIÓN ELÉCTRICA:**

También llamada un "arte" y también una "ciencia", porque hay un estigma que se remite en hacer selecciones, que llevan compromisos entre conflictos objetivos, tales como: máxima protección, confiabilidad del sistema, tiempos rápidos en despeje de fallas, economía y selectividad eléctrica. Una falla en el sistema debe ser detectada rápidamente, y solo la porción fallada debe ser aislada sin impactar el sistema sin falla. Comúnmente se usan los dispositivos mecánicos, electrónicos o digitales de protección que conmutan ante eventos de sobre corriente, llamados los relés de protección, son una característica esencial del sistema eléctrico que se considera concurrente con el sistema diseño. La protección no es un sustituto de los sistemas mal diseñados; es decir, protegiendo un sistema mal diseñado será más complejo y menos satisfactorio que uno correctamente diseñado [3].

#### **3.2 CENTRAL DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA:**

Es un tipo de generación de energía eléctrica que se puede considerar como energía renovable, consta del aprovechamiento de la energía de afluentes hídricos con grandes caudales. Se almacena la energía que lleva su agua en un embalse que se sitúa a una determinada altura para luego ser tomada desde el embalse por medio de torres de captación o captación con bocatomas y ser transportada a través de una tubería que se encuentra más abajo en cuanto altura del embalse llamada tubería de presión. Con la velocidad que llega el fluido que viaja por la tubería mencionada se hace girar la turbina hidráulica que dependiendo de la diferencia de altura entre la toma y el lugar de la turbina puede ser de tipo Francis, Pelton, en algunos casos Kaplan; esta turbina se acopla de forma mecánica a través de un eje al generador de energía eléctrica. Luego de ser generada la energía eléctrica se incrementa el nivel de tensión al cual se generó por medio de un transformador de potencia con el fin de disminuir sus pérdidas de energía eléctrica en la transmisión de esta, esto anteriormente mencionado constituye la primera parte de la cadena de suministros de la energía eléctrica. Las centrales hidroeléctricas también son reconocidas por tener grandes eficiencias en la generación, alrededor del 90% [2], costo de mantenimiento barato comparado con la relación costo generación-precio kWh.

### **3.3 TRANSFORMADOR ELÉCTRICO:**

Un transformador eléctrico es un dispositivo considerado como una máquina eléctrica estática que transforma los niveles de energía a través de bobinas acopladas magnéticamente. Si sólo una parte del flujo magnético producido por una bobina se enlaza con la otra, se dice que las bobinas están débilmente acopladas. En este caso, el funcionamiento del transformador no es muy eficiente. Para aumentar el acoplamiento entre las bobinas, las bobinas se enrollan en un núcleo común [1].

### **3.4 TURBINA HIDRÁULICA:**

Dispositivo mecánico que convierte la energía cinética del agua en energía mecánica rotatoria, existen dos clasificaciones de turbinas hidráulicas: impulso y reacción. La turbina de impulso se utiliza para alturas elevadas, chorros de alta velocidad de agua golpean cubos en forma de cuchara en el corredor que está a presión atmosférica [2].

En una turbina de reacción, el agua pasa desde una carcasa en espiral a través de álabes guía radiales estacionarios, a través de las compuertas de control y sobre los álabes del rodete a presiones superiores a la atmosférica conocida como turbinas tipo Francis. La turbina Kaplan usa un corredor de tipo hélice y se usa en alturas bajas, el corredor de la hélice puede usar hojas fijas o hojas de paso variable, conocidas como Kaplan o tipo de doble regulación [2].

### **3.5 GENERADOR SÍNCRONO:**

Máquinas eléctricas dinámicas que convierten la energía mecánica a energía eléctrica, compuesto por un rotor, un estator y un sistema de excitación, a través del rotor, se alimenta con corriente continua el circuito de campo y por medio de unos anillos colectores se energiza el rotor que produce un campo magnético que induce una corriente alterna en los devanados del estator. Se llaman síncronos porque la velocidad mecánica está en fase con la velocidad de giro del campo magnético [1].

Sistema que se ocupa de las labores que se refieren a Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, de acuerdo con la demanda de esta hasta llevarla a los consumidores finales: el usuario. Este usuario posiblemente sería, un gran centro de consumo o un consumidor residencial de energía eléctrica. También es, sin duda, el sistema más grande y complejo realizado por el hombre, ya que existen estados, países y hasta continentes

interconectados entre sí [3]. El Sistema de Potencia provee de un servicio vital a la sociedad. La energía eléctrica es de alguna manera como el aire que respiramos: Pensamos en él sólo cuando no está presente.

### 3.6 SERVICIOS AUXILIARES EN HIDROELÉCTRICAS:

Los Servicios Auxiliares son aquellos recursos y funciones que se requieren para complementar el intercambio de energía eléctrica desde la generación hasta la carga demandada, manteniendo la operación confiable del sistema eléctrico interconectado. Las centrales hidroeléctricas ofrecen varios tipos de servicios auxiliares críticos, tales como:

- **Aporte de reactivos y control de tensión:** Es la capacidad de los generadores de inyectar potencia reactiva al sistema, con el fin de corregir el factor de potencia y la tensión del sistema. Provee además control sobre la tensión y la estabilidad de tensión. Los generadores de centrales hidroeléctricas, operando como motores son capaces de producir potencia reactiva de hasta 45% de la capacidad nominal de la máquina [4].
- **Regulación de Frecuencia:** Es la capacidad de responder frente a variaciones de demanda del sistema. Cuando opera automáticamente, el sistema de control de velocidad de la máquina regula permanentemente la velocidad de giro, por tanto, la frecuencia de este. Se requiere para mantener la frecuencia en los rangos admisibles del sistema y para apoyar a preservar la integridad del sistema de transmisión [4].
- **Reserva Rotante:** Capacidad de los generadores hidráulicos de almacenar energía potencial en las masas de los rotores del conjunto de la turbina-generador, mientras la máquina está en operación. Esta energía está disponible para ser suministrada en caso de una contingencia en el sistema [4].
- **Arranque en Negro (Black Start):** Es la habilidad de la unidad generación, durante una falla total del sistema (blackout), de lograr ir desde la posición de parada, a condiciones de operación y de despacho de energía, sin requerir energía auxiliar del sistema de potencia. Esto se logra con el uso de plantas de emergencia, para proveer energía a los servicios auxiliares y al sistema de excitación [4].

### **3.7 FUNCIONES DE PROTECCIÓN:**

Atributos que son dados a los relés de protección eléctrica para proteger los equipos y máquinas eléctricas a los que están asociados, generalmente en las estaciones generadores se encuentran funciones de protección para los generadores, transformadores y líneas de transmisión.

Entre algunas de las principales funciones se encuentran las de sobrecorriente, sobrecorrientes temporizada, baja y sobre tensión, sobre carga térmica, protecciones de distancia, protecciones diferenciales entre otras [5].

### **3.8 RELÉ DE PROTECCIÓN:**

Es un dispositivo de fabricación, ya sea electromecánica, digital o numérica, su función es que detectar una falla o condición anormal de operación en alguno de los equipos o máquinas eléctricas del sistema de potencia, el relé de protección en cuanto al elemento fallado deberá iniciar la acción apropiada desde circuito de control, aislar la zona donde se ha producido la falla , ser selectivo para disminuir la interrupción del servicio en zonas que no requieren su salida del sistema y prevenir daños de equipos eléctricos adyacentes [2].

### **3.9 ESQUEMAS DE PROTECCIÓN:**

Los esquemas de protección se refieren a los diseños topológicos de conexión de los sistemas de protección eléctrica, estos cambian de acuerdo los elementos o equipos a proteger, todo esto depende de las características físicas y eléctricas del sistema y de la aplicación en la que se implemente el sistema de protección eléctrica. [4].

### **3.10 ESQUEMAS DE PARADA:**

A continuación, se describe la metodología que se usa típicamente para aislar un generador eléctrico en una central hidroeléctrica si se presenta un evento de falla o si opera bajo anormales [1].

#### **3.10.1 ESQUEMA DE PARADA DE EMERGENCIA:**

Este esquema proporciona los medios más rápidos para aislar al generador. Este modo de disparo es usado para todas las fallas internas en el generador y anomalías severas en la zona de

protección del generador. Se realizan las acciones de disparo al mismo tiempo de los interruptores del generador, el interruptor de campo, y el cierre de las válvulas de la turbina. Los paros de emergencia se activan mediante las funciones de protección que actúan frente a fenómenos relacionados con daños en elementos dentro de la máquina o en la zona del generador (cortocircuitos, daños en aislamientos, daños en sistemas de control, etc). Con este esquema de paro, se envía la orden de disparo y bloqueo simultáneo al interruptor del generador, al sistema de excitación y al sistema de la turbina con la señal de paro de la turbina. De esta manera se logra un aislamiento completo del generador.

### **3.10.2 ESQUEMA DE PARADA PARCIAL:**

Existen dos esquemas de parada parcial.

Con el esquema de parada Parcial 1, solamente se desconecta el interruptor principal del generador, este es accionado por medio del relé cuando se presenta una condición de operación no muy severa y se si se considera la posibilidad de reconectar el generador con el menor retardo de tiempo posible.

El esquema de parada Parcial 2 se utiliza para desconectar al generador del sistema cuando se presentan perturbaciones externas al generador (desbalances, cambios súbitos de carga, fallas externas entre otras), frente a estas condiciones las protecciones actúan mediante el relé, el cual envía órdenes de disparo y bloqueo del interruptor principal del generador y del sistema de excitación, sin la necesidad de desconectar la turbina. Esto se realiza con el fin de lograr reconexión del generador en el menor tiempo posible una vez se despeja el evento de operación anormal

### **3.10.3 ESQUEMA DE PARADA RÁPIDA:**

El esquema de parada rápida accionado por el relé se utiliza para disparar y aislar al generador de la misma manera que los paros de emergencia, sin embargo, este responde a fallas o perturbaciones principalmente mecánicas.

### **3.10.4 MATRIZ DE DISPAROS:**

La matriz de disparos es la lógica de disparos que sigue cada función de protección dependiendo del esquema de protección que se esté en uso y de los disparos que se implemente

en la central de generación. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de matriz de disparos de un transformador elevador [1].

Tabla 1. Ejemplo de matriz de disparos de un relé de protección.

Función	Disparo	Disparo	Disparo	Transferencia	Alarma
	Interruptor de Generador	Interruptor de Campo	Turbina	Sistema de Servicios Auxiliares	
87T	X	X	X	X	-
46	X	-	-	-	-
50	X	X	X	X	-
51	X	X	X	X	-
49	-	-	-	-	X
32	X	X	X	X	-

#### 4. METODOLOGÍA

La metodología que se propone en esta práctica empresarial está constituida por las siguientes etapas que se describen a continuación.

##### 4.1 ETAPA 1:

Para empezar, se requiere realizar la inspección de los documentos y planos, así como también en campo de los servicios auxiliares con el fin de verificar que todos los equipos, cableado, tableros eléctricos y dispositivos de protección que aparecen en el diagrama unifilar proporcionado por el personal técnico de la empresa coincidan con lo que realmente se tiene en la realidad.

##### 4.2 ETAPA 2:

Una vez validada y confirmada la información de entrada, las novedades encontradas en el diagrama unifilar se monta en el software DigSilent Power Factory, mismo que está disponible en los computadores de los estudiantes en práctica de la empresa que lo requieren, a este programa se le proporcionará la información de entrada validada en campo de los diferentes dispositivos y equipos, así como también las distancias de los cableados de alimentación de cada

uno para finalmente comparar que coincidan uno a uno con lo visto en campo y que la simulación sea lo más cercano a la realidad.

### **4.3 ETAPA 3:**

Con lo anterior realizado y verificado (etapa 1 y 2), se ejecuta un conjunto de simulaciones en las que se hará la validación y el análisis de los resultados obtenidos del sistema, trabajando en distintos escenarios de operativos, demandas máximas, mínimas, salida de unidades de generación, sobre cargas entre otros casos a considerar.

### **4.4 ETAPA 4:**

Con los resultados obtenidos, se procede a realizar una lista de las funciones de protección que fueron encontradas en campo disponibles para los generadores, transformadores y líneas de transmisión con el fin de separarlas en sus respectivos grupos de acuerdo con la selectividad e importancia de actuación dentro de las subestaciones de la casa de máquinas de la central hidroeléctrica de estudio y lo más importante, en cómo deberían comportarse las funciones de protección de los relés disponibles frente a estos escenarios y en cómo deben actuar los operarios sobre los relés de la central frente a una de estas eventualidades sin elegir acciones erróneas sobre la corrección o despeje de una falla de cara a una posible operación del sistema que no es la esperada.

### **4.5 ETAPA 5:**

Se apoyará al grupo de protecciones eléctricas de la empresa para la realización de un curso educativo en conjunto con el diseñador audiovisual para la explicación teórica y técnica de las funciones de protección de sobrecorriente que están disponibles en las centrales de generación hidráulica de la empresa, ya que estas son las más ocurrentes dentro del sistema, debidas a sobrecargas o a eventos de falla transitorios.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1 DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE PROTECCIONES**

El esquema de protecciones de la Central Hidroeléctrica está diseñado de tal manera que cada uno de los elementos a proteger (generadores, transformadores, líneas), estén bajo el

monitoreo de un relé de protección principal 1 y un relé de protección de respaldo 2, con el fin de aumentar la seguridad y la confiabilidad del esquema de protección.

Estos relés son del fabricante SIEMENS, tienen la capacidad proteger las máquinas estáticas, máquinas dinámicas y las líneas de transmisión al enviar las órdenes de disparo necesarias frente a diferentes fenómenos o eventos de falla que pueden repercutir en daños graves en los equipos dentro de la subestación y poner en peligro la vida de las personas que se encuentran en la Central. El dispositivo reconoce estos eventos mediante sus funciones de protección, las cuales se configuran para ofrecer protección principal y protección de respaldo. La Central Hidroeléctrica cuenta con dos generadores de 13,2 MW cada uno, en configuración de un transformador de 33 MVA por las dos unidades de generación, conectados a la red de forma unitaria en una configuración de Barra Sencilla mediante dos líneas de transmisión la potencia eléctrica se lleva desde la subestación eléctrica a 115 kV hacia dos subestaciones eléctricas del mismo nivel de tensión. La Figura 1 muestra el diagrama unifilar de la subestación de la Central Hidroeléctrica bajo estudio en configuración de Barra Sencilla, los servicios auxiliares están alimentados desde la barra principal donde se conectan las unidades de generación al nivel de 13,8 kV, en caso de que el transformador de servicios auxiliares conectado a la barra falle, se dispone de una lógica cableada que desconectará dicho transformador y conectará un transformador adicional de las mismas características físicas y eléctricas del primero, pero a diferencia de este, se conecta a través de una red de media tensión externa de 13,2 kV perteneciente al operador eléctrico de la zona, en este caso se trata de un circuito trifásico de EPM, cuando no se dispone de estos dos transformadores, se tiene además una planta de emergencia de tipo Diesel que entrará en servicio mientras se dispone de alguno de los dos transformadores.

Para cada elemento se dispone de un tablero de protección en el cual se encuentran los respectivos relés protección principal y protección de respaldo. Para cada generador se utilizan dos SIEMENS 7UM62, para el transformador de potencia de 33 MVA se tiene un relé SIEMENS 7UT61 para la protección principal y para la protección de respaldo un relé SIEMENS 7SJ61, para el transformador de potencia de repuesto de 26 MVA, se tiene un relé SIEMENS 7UT61 para la protección principal y para la protección de respaldo un relé SIEMENS 7SJ61, para el transformador de servicios auxiliares de 300 kVA y transformador de excitación de las unidades, se tiene para cada uno un relé SIEMENS 7SJ61 y para la protección



de las líneas Río Claro y Guatapé se utilizan dos SIEMENS 7SA613 para la protección de distancia, uno para protección principal y otro para protección de respaldo, cada línea tiene su propio relé de protección principal y de respaldo, para la protección de sobrecorriente, cada línea cuenta con un relé SIEMENS 7SJ64, uno como protección principal y otro como protección de respaldo.

El interruptor principal de cada unidad de generación se encuentra conectado al lado de baja tensión del transformador de potencia, por lo que una falla en el generador lo aísla del sistema sin desenergizar el transformador y la línea, mientras que una falla en el transformador de potencia o en la línea representa una apertura completa de parte del interruptor principal, el interruptor de servicios auxiliares, y los interruptores de la subestación de 115 kV, con el objetivo de eliminar cualquier fuente de energía o aportes de cortocircuito en la falla.

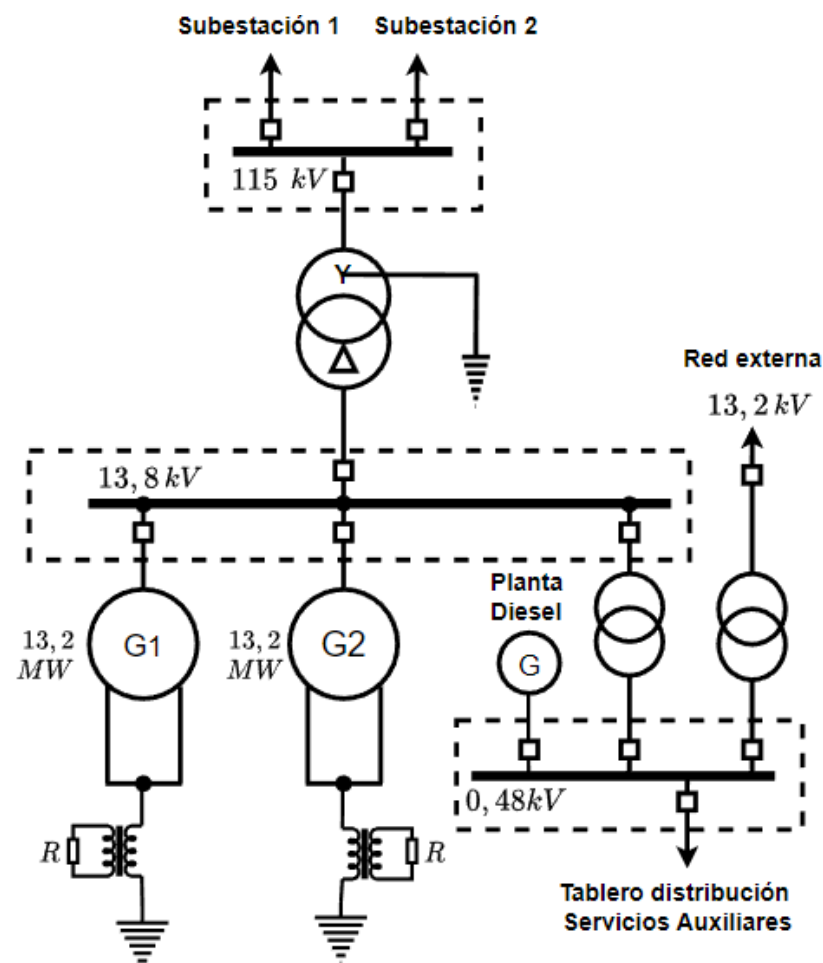


Figura 1. Esquema general de conexión de unidad-transformador en la Central.

## 5.2 TABLEROS DE PROTECCIÓN:

Los relés de protección principal de los generadores Protección Principal  $G_1$  “ $PPG_1$ ” y Protección Principal  $G_2$  “ $PPG_2$ ” de cada elemento están ubicados en sus respectivos tableros, de tal manera que se dispone de un tablero de protección por cada elemento a proteger, en estos tableros se puede encontrar: La interfaz de cada relé, en la cual se pueden realizar comandos manuales y visualizar las información de los eventos, los bloques de prueba de cada relé protección, relés maestros de disparo y bloqueo, tomacorrientes e interruptores de servicios auxiliares, entre otros elementos.

## 5.3 PROTECCIÓN DEL GENERADOR:

La protección de los generadores está implementada por los relés SIEMENS 7UM62, uno principal  $PPG_1$  y uno principal 2  $PPG_2$ , y dos de respaldo de la misma referencia, pero llamados  $PRG_1$  Y  $PRG_2$  estos relés son capaces de proveer protección y monitoreo para generadores y transformadores elevadores, en plantas de generación de diferentes tipos.

En la Figura 2 se muestra el tablero de protección principal de una de las unidades de generación de la Central.



Figura 2. Tablero de protección principal de una unidad de generación.

Las funciones de protección configuradas en cada uno de los relés  $PPG_1$  y  $PPG_2$ , se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Funciones de protección ajustadas en los relés principales de los generadores.

<i>Funciones de Protección Principal <math>G_1</math></i>		<i>Funciones de Protección Principal <math>G_2</math></i>	
87G	Diferencial de generador	87G	Diferencial de generador
21	Protección de distancia	21	Protección de distancia
27/59	Baja y sobretensión	27/59	Baja y sobretensión
40/24	Pérdida de campo y sobreexcitación	40/24	Pérdida de campo y sobreexcitación
78	Pérdida de sincronismo	78	Pérdida de sincronismo
59N/27TN	Secuencia Negativa	59N/27TN	Secuencia Negativa
49	Pérdida de sincronismo	49	Pérdida de sincronismo
51V/50BF	Sobrecorriente restringida por tensión y falla a interruptor	51V/50BF	Sobrecorriente restringida por tensión y falla a interruptor
50G/64F	Sobrecorriente de falla a tierra rotor	50G/64F	Sobrecorriente de falla a tierra rotor
81O/81U	Sobre y baja frecuencia	81O/81U	Sobre y baja frecuencia
50/27	Energización inadvertida	50/27	Energización inadvertida

32	Potencia inversa	32	Potencia inversa
74/46	Alarma secuencia negativa	74/46	Alarma secuencia negativa
60FL	Falla por fusible	60FL	Falla por fusible

Las protecciones eléctricas de los generadores eléctricos de la central dispuestas en los relés anteriormente mencionados están divididas en grupos de funciones que envían las señales de activación a las bobinas que producen ya sea, paradas parciales o paradas de emergencia de las máquinas dinámicas. La Tabla 3 muestra los grupos de funciones activas de los relés que producen parada parcial o parada de emergencia.

Tabla 3. Funciones de protección que producen parada de emergencia o parada parcial del generador

Funciones de protección que producen parada de emergencia		Funciones de protección que producen parada parcial	
Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1	Grupo 2
87G	51V	40	27
59N	50/27	46	59
27TN	64F	78	32
21	51E	24	49
50/27	-	24	-

Las funciones ajustadas para la protección del generador actúan cuando envían la señal de activación a los respectivos relés de disparo y bloqueo. Cada relé en el tablero está configurado para obtener un tipo de parada específica para el generador, según la gravedad o duración de la falla o evento de operación anormal, para esto, se tienen los siguientes relés:

- $86E_1$  para el esquema de parada de emergencia 1
- $86E_2$  para el esquema de parada de emergencia 2
- $86P_1$  Para el esquema de parada parcial 1
- $86P_2$  Para el esquema de parada parcial 2

NOTA: Los paros de Emergencia 1 y 2 de los relés  $86E_1$  y  $86E_2$ , se comportan de la misma manera.

#### 5.4 PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR:

Las protecciones de los transformadores están implementadas de la siguiente manera, para el transformador de potencia principal, se tiene un relé SIEMENS 7UT61 llamado  $PPTR_3$  y otro relé que es de respaldo SIEMENS 7SJ61 llamado  $PRTR_3$ , estos relés están diseñados para proporcionar una protección selectiva y rápida a diversos tipos de eventos que se pueden dar en los transformadores.

Para el transformador de potencia de repuesto que se tiene en patio, se tiene a disposición si se necesita su entrada en servicio, los relés de protección principal y respaldo, para el caso de la protección principal  $PPTR_1$  se tiene el relé SIEMENS 7UT61 y para la protección de respaldo  $PRTR_1$  se tiene el relé SIEMENS 7SJ61.

En la Figura 3 se muestra el tablero de protección que contiene los relés de los transformadores de la Central.



Figura 3. Tablero de protección principal de los transformadores de la Central.

Las funciones de protección configuradas en cada uno de los relés  $PPTR_1$  y  $PPTR_3$ ,  $PRTR_1$  y  $PRTR_3$  se pueden observar en la Tabla 4.

Para el transformador de servicios auxiliares que se tiene en casa máquinas de la central, se tiene a disposición el relé de protección principal y respaldo, para el caso de la protección principal  $PPTR_1$  se tiene el relé SIEMENS 7UT61 y para la protección de respaldo  $PRTR_1$  se tiene el relé SIEMENS 7SJ61.

Tabla 4. Funciones ajustadas en los relés de protección de los transformadores de potencia

Funciones de Protección Principal y Respaldo Transformador 33 MVA		Funciones de Protección Principal y Respaldo Transformador 26 MVA	
87T	Diferencial de Transformador.	87T	Diferencial de Transformador.
46	Sobrecorriente de Secuencia Negativa.	46	Sobrecorriente de Secuencia Negativa.
50/51	Sobrecorriente de tiempo definido y de tiempo inverso.	50/51	Sobrecorriente de tiempo definido y de tiempo inverso.
50N/51N	Sobrecorriente residual de tiempo definido y de tiempo inverso.	50N/51N	Sobrecorriente residual de tiempo definido y de tiempo inverso.
50BF	Falla a interruptor.	50BF	Falla a interruptor.

### 5.5 PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN:

Para la protección de las línea de transmisión de 115 kV se tienen dos tableros de protección para cada campo de línea, uno en cada extremo (casa de máquinas y subestaciones de 115 kV), cada uno cuenta con dos relés SIEMENS 7SD5221 correspondientes para casa de máquinas y dos relés SIEMENS 7SD5225 , para la protección Principal 1 (PP1L1) y Principal 2 (PP2L1) y protección Principal 1 (PP1L2) y Principal 2 (PP2L2), los cuales se comunican con el otro extremo de la línea por medio de fibra óptica, estos relés son capaces de monitorear y proteger líneas de transmisión a altos niveles de tensión.

En la Figura 4 se muestra el tablero de protección principal de las líneas de transmisión y que está instalado en la subestación de 115 kV en frente de la casa de máquinas de la Central.



Figura 4. Tablero de protección principal de las líneas de transmisión.

Las funciones de protección configuradas en cada uno de los relés  $PP_1L_1$ ,  $PP_2L_1$ ,  $PP_1L_2$  y  $PP_2L_2$  se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Funciones de protección en los relés de las líneas de transmisión.

Funciones de Protección Línea de transmisión Subestación 1.		Funciones de Protección Línea de transmisión Subestación 2.	
21	Protección de distancia	21	Protección de distancia
67/67N	Sobrecorriente direccional y direccional residual.	67/67N	Sobrecorriente direccional y direccional residual.
27/59	Subtensión y sobretensión.	27/59	Subtensión y sobretensión.
50N/51N	Sobrecorriente residual de tiempo definido y de tiempo inverso.	50N/51N	Sobrecorriente residual de tiempo definido y de tiempo inverso.
50BF	Falla a interruptor.	50BF	Falla a interruptor.
25	Verificación de sincronismo.	25	Verificación de sincronismo.
79	Recierre automático	79	Recierre automático
67/85	Sobrecorriente direccional + Teleprotección	67/85	Sobrecorriente direccional + Teleprotección
21/85	Protección de distancia + Teleprotección	21/85	Protección de distancia + Teleprotección

## **5.6 RECOMENDACIONES GENERALES:**

Cuando se activa una o varias funciones de protección, el operador debe dirigirse al tablero de protección principal del equipo que detectó la condición de operación anormal de o condición de falla con el fin de confirmar la señalización de las funciones activadas en el relé de protección correspondiente. Luego de verificar las funciones de protección activadas, debe informar al personal de mantenimiento, posteriormente deberá tomar la decisión de reiniciar o no el relé maestro de disparo y bloqueo, dependiendo de las funciones que hayan sido activadas y según las recomendaciones de este instructivo para cada una de las funciones de protección.

El Grupo de Protecciones deberá revisar los datos del evento registrados por el relé de protecciones eléctricas con el motivo de reconstruirlo y determinar el tipo y la localización de la falla o del evento de operación ocurrido.

## **5.7 FUNCIONES DE PROTECCIÓN DE GENERADORES DE LA CENTRAL.**

### **5.7.1 PROTECCIÓN CONTRA SOBRE Y BAJA FRECUENCIA ANSI 81 O/U:**

La sobre y la baja frecuencia son condiciones de operación anormal que se pueden presentar en los generadores, suceden debido a diferencias que se pueden presentar entre el despacho y la demanda en el sistema de potencia, esto ocasiona una aceleración o desaceleración de la máquina eléctrica, esto se refleja en su frecuencia, por ejemplo, la salida repentina de un generador representa un aumento en la demanda para un generador cercano, lo que ocasiona una caída transitoria en su frecuencia, de manera similar, si se presenta una pérdida súbita de carga ocasionaría un aumento en la frecuencia del generador que atiende la demanda. Los problemas con la frecuencia en los generadores también pueden ser debidas a fallos en el regulador de velocidad.

La operación de la máquina a bajas frecuencias tiene efectos como: Calentamientos por sobrecargas en devanados y esfuerzos mecánicos por frecuencias resonantes en alabes de la turbina.

La operación de la máquina bajo efectos de altas frecuencias tiene repercusiones como: Esfuerzos mecánicos en los cojinetes por sobre velocidades y aumentos en la tensión en bornes y devanados.



### 5.7.1.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Una vez activada la protección contra sobre y baja frecuencia (ANSI 81), se señala en los dos relés de protección de cada generador y se energiza el relé maestro de disparo y bloqueo  $86P_1$  y  $86P_2$ , el cual ejecuta el esquema de parada parcial, por medio de las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación una vez confirmada la apertura del interruptor de unidad.
- Inicio de la secuencia de parada parcial 1 y 2 en el sistema de control.

En la Figura 5 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 81U/O.

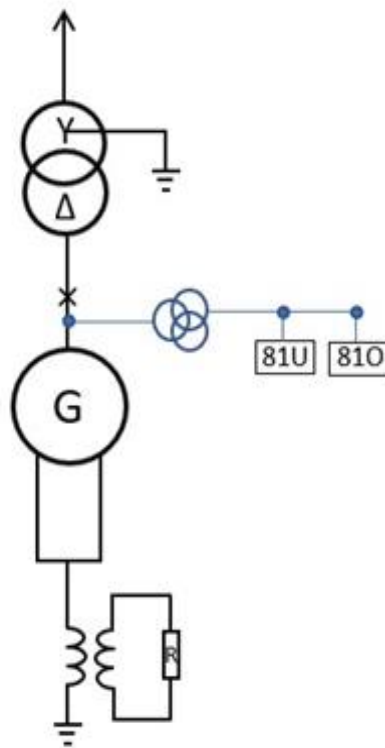


Figura 5. Esquema de conexión función de protección 81U/O.

### 5.7.1.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

Frente al disparo por parte de la protección ANSI 81, se desconectan el interruptor principal y la excitación de la máquina, sin embargo, la turbina sigue girando, por lo tanto, se recomienda:

- Consultar las condiciones del sistema de potencia con el operador de red y CND (Centro Nacional de Despacho).
- Verificar que no se hayan presentado daños en el generador, para esto se recomienda realizar una inspección visual, revisar que no existan olores o sonidos anormales provenientes del generador, turbina o equipos auxiliares, verificar las alarmas de los sistemas de protección mecánica y eléctrica en el SCADA, chequear el estado del sistema de control de velocidad, si se detectan daños en el generador, se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se realicen las respectivas correcciones.
- Si no existen daños en el generador se puede reconectar la unidad una vez se normalicen las condiciones del sistema de potencia.

### 5.7.2 PROTECCIÓN CONTRA SUBTENSIÓN EN EL GENERADOR ANSI 27:

La baja tensión se considera como condición de operación anormal que se puede presentar en los elementos de un sistema de potencia.

La disminución de la tensión en bornes del generador puede ser originada por problemas en el sistema de control en la excitación de la máquina, perturbaciones en el sistema o fallas externas cercanas al generador eléctrico.

Los generadores están normalmente diseñados para trabajar continuamente a un mínimo del 95% de su tensión nominal, por lo que la operación por debajo de este porcentaje podría tener efectos como la reducción del límite de estabilidad, la absorción excesiva de potencia reactiva que aumenta la corriente en bornes y un mal funcionamiento o esfuerzos en equipos alimentados desde el generador.

#### 5.7.2.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Cuando se activa la función de baja tensión (ANSI 27), se señaliza en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86E_1$  y  $86E_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).

- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 6 se muestra el esquema de conexión para la función de protección ANSI 27.

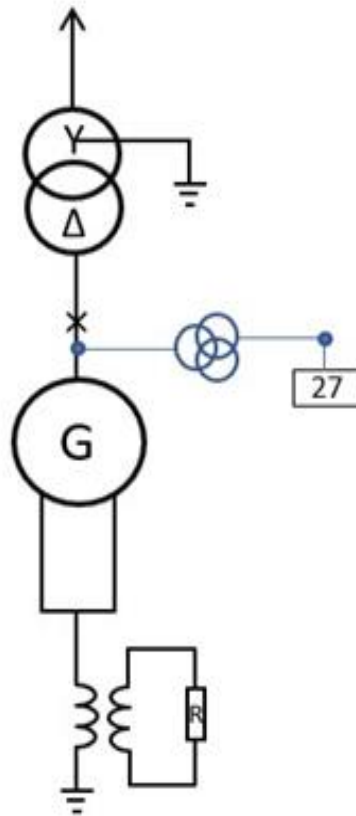


Figura 6. Esquema y conexión de la función ANSI 27.

### 5.7.2.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo por la protección ANSI 27 del generador puede ser debido a problemas en el sistema de potencia o problemas en la excitación, por lo que se detiene por completo la operación, desconectando el generador, la excitación y deteniendo la turbina. En este caso se debe:

- Evaluar si el disparo se dio por problemas internos, para esto se recomienda revisar el estado del sistema de control de la excitación.

- Revisar alarmas o señales de arranque de otras protecciones de excitación. En caso de confirmar problemas internos, bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se realicen las respectivas correcciones.
- Evaluar si el disparo se dio debido a condiciones externas, para esto, consultar el estado del sistema de potencia, si se presentaron posibles perturbaciones o fallas cercanas. si este es el caso, se puede reconectar la unidad una vez se normalicen las condiciones del sistema.

### **5.7.3 PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIÓN EN EL GENERADOR ANSI 59:**

La sobretensión es una condición de operación anormal en los generadores, que se puede presentar debido a fallas en el control de excitación de los generadores, maniobras en el sistema de potencia, descargas atmosféricas, rechazos repentinos de carga y fallas a tierra en sistemas con alta impedancia de puesta a tierra.

Los generadores están diseñados para trabajar a un máximo del 105% de su tensión nominal, la operación del generador por encima de este porcentaje de operación puede repercutir en efectos como el desgaste en los aislamientos, riesgo de arcos eléctricos, generación de flujos excesivos en el núcleo del estator debido a la alta relación tensión/frecuencia y daños en equipos conectados a la máquina eléctrica.

#### **5.7.3.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de sobre tensión (ANSI 59), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86E_1$  y  $86E_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad de generación.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad de generación (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 7 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 59.



#### **5.7.4 PROTECCIÓN CONTRA PÉRDIDA DE SINCRONISMO ANSI 78:**

En esta condición, en el sistema se manifiesta como una diferencia entre la velocidad del flujo giratorio del estator y la velocidad del eje del rotor, lo que ocasiona un deslizamiento en los polos de la máquina. Un generador puede perder el sincronismo debido a perturbaciones en el sistema de potencia que causan oscilaciones de potencia inestables o por fallos en el sistema de excitación de la máquina.

La operación de la maquina fuera de sincronismo de todo el sistema podría ocasionar corrientes muy altas en los devanados del generador, esfuerzos peligrosos debido a torques muy elevados en el eje del rotor y flujos anormales producto del deslizamiento de polos, que pueden provocar calentamiento y debilitamiento del núcleo del estator de la máquina.

##### **5.7.4.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de protección contra pérdida de sincronismo (ANSI 78), se señala en los dos relés de protección del generador y se energiza el relé maestro de disparo y bloqueo  $86P_1$  y  $86P_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada parcial, por medio de las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación una vez confirmada la apertura del interruptor de unidad.
- Inicio de la secuencia de parada parcial en el sistema de control.

En la Figura 8 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 78.

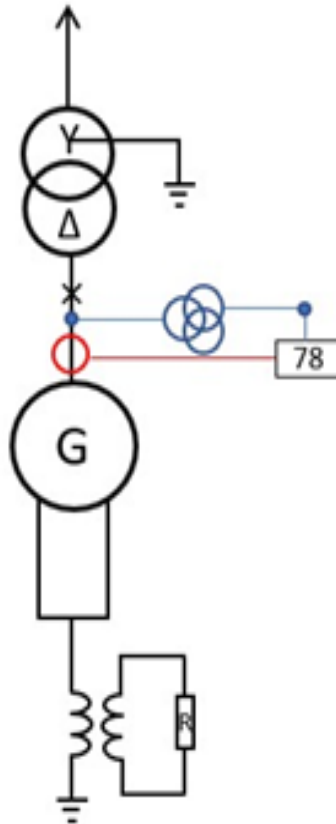


Figura 8. Esquema y conexión de la función ANSI 78.

#### 5.7.4.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

Ante un disparo por la función ANSI 78, se desconecta el interruptor principal y la excitación, pero la turbina continúa en movimiento, en este caso es muy probable que el disparo sea por causa de una perturbación en el sistema de potencia, externa a la central. Se debe:

- Consultar las condiciones del sistema de potencia con el operador de red y CND (Centro Nacional de Despacho).
- Verificar que la salida de sincronismo no haya sido originada por problemas internos y que no se hayan presentado daños en el generador, para esto se recomienda, realizar una inspección visual, revisar que no existan olores o sonidos anormales provenientes del generador, turbina o equipos auxiliares.
- Revisar las alarmas de los sistemas de protección mecánica y eléctrica en SCADA.
- Revisar el estado del sistema de control de la excitación.
- Si se detectan daños en el generador, se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se realicen las respectivas correcciones.
- Si no existen daños en el generador se puede realizar la reconexión de la unidad generadora una vez se normalicen las condiciones del sistema de potencia.

### **5.7.5 PROTECCIÓN CONTRA SOBREEXCITACIÓN ANSI 24:**

La condición de sobre excitación ocurre cuando la relación entre la tensión y la frecuencia (V/Hz) en bornes del generador es superior a sus límites de diseño, esta condición podría ser ocasionada por fallas en el sistema de control de la excitación de la máquina o por una respuesta no acorde por parte de los controles de la tensión o de la velocidad frente a una perturbación en el sistema.

La operación del generador en condición de sobre excitación tiene efectos como las sobretensiones que ponen en peligro los aislamientos de los devanados y la saturación del núcleo magnético debido a altas densidades de flujo, lo que provoca la generación de flujos de dispersión en componentes no laminados induciendo corrientes parásitas que generan calentamientos excesivos en dichos componentes.

#### **5.7.5.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de protección contra sobre excitación (ANSI 24), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86P_1$  y  $86P_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada parcial, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 9 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 24.



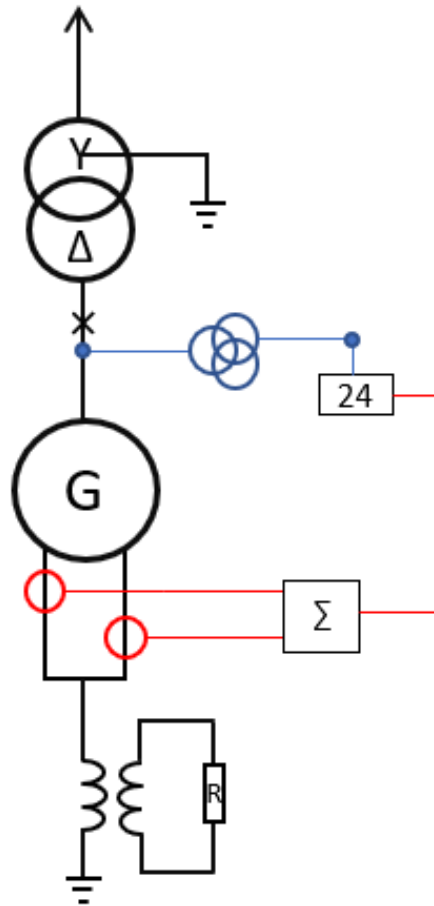


Figura 9. Esquema y conexión de la función ANSI 24.

### 5.7.5.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

Cuando se da un disparo por parte de la función ANSI 24, se desconecta el interruptor principal, el sistema de excitación y se detiene la turbina. En este caso se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se detecte la causa del problema, se verifique que no se presentaron daños por el fenómeno y se realicen las respectivas correcciones, para esto se recomienda:

- Validar el correcto funcionamiento del sistema de control de tensión.
- Revisar la medición de tensión por parte de los transformadores de potencial PT.
- Validar el correcto funcionamiento del regulador de velocidad.
- Consultar el estado del sistema de potencia con el operador de red y CND.
- Si no se presentó un daño evidente en el generador, tener en cuenta para la próxima parada de mantenimiento de la unidad.
- Revisar que no haya debilitamiento de aislamientos de los devanados del estator.
- Verificar que no haya daños en el núcleo del estator.

### **5.7.6 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA ANSI 46:**

Las condiciones de desbalance en el sistema se pueden presentar por varias razones, desde asimetrías en las cargas, hasta fallas bifásicas y monofásicas en el sistema, estos desbalances generan corrientes de secuencia negativa que son inducidas al rotor del generador, dichas corrientes de secuencia negativa fluyen en sentido opuesto al movimiento del rotor, así entonces se convierten en corrientes con frecuencia de aproximadamente el doble de la fundamental, por lo que se generan pérdidas de potencia disipada en formas de calor y esfuerzos en los elementos superficiales del rotor por el efecto piel.

La protección frente a esta condición se realiza con un relé de sobrecorriente temporizado que detecta la componente de secuencia negativa.

#### **5.7.6.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de protección contra Sobrecorriente de secuencia negativa (ANSI 46), se señala en los dos relés de protección del generador y se energiza el relé maestro de disparo y bloqueo  $86P_1$  y  $86P_2$ , el cual ejecuta el esquema de parada parcial, por medio de las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación una vez confirmada la apertura del interruptor de unidad
- Inicio de la secuencia de parada parcial en el sistema de control

En la Figura 10 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 46.

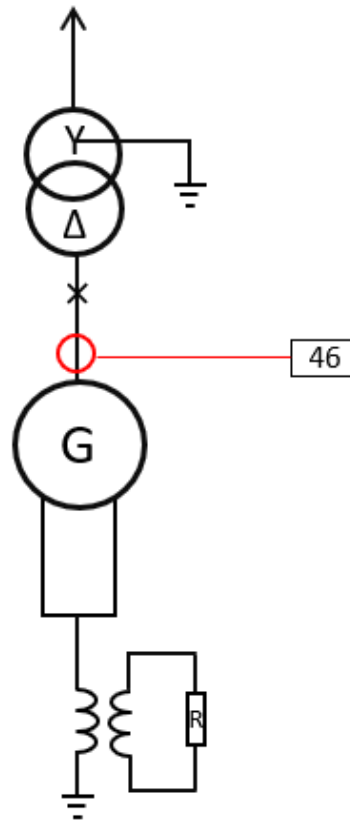


Figura 10. Esquema y conexión de la función ANSI 46.

### 5.7.6.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

Cuando la función de protección ANSI 46 genera el disparo, probablemente sea por un problema de desbalance causado por una perturbación externa a la central hidroeléctrica, entonces se desconectan el interruptor principal y la excitación de la máquina, pero la turbina continúa en operación, para esta situación se recomienda:

- Realizar una inspección visual y revisar que no existan olores o sonidos anormales provenientes del generador.
- Revisar las alarmas de los sistemas de protección mecánica y eléctrica en SCADA.
- Consultar las condiciones del sistema de potencia con el operador de red y CND (Centro Nacional de Despacho).
- Si no se detectan daños en el rotor del generador se puede realizar la reconexión de la unidad generadora una vez se normalicen las condiciones del sistema de potencia. Si se presentaron daños en el rotor debido al evento, se debe bloquear e inhabilitar la unidad de generación hasta que se realicen las respectivas correcciones.

### **5.7.7 PROTECCIÓN CONTRA POTENCIA INVERSA ANSI 32:**

Cuando los generadores comienzan a consumir potencia activa, significa que la maquina está motorizada, esta motorización se presenta debido a la incapacidad de la turbina de entregar la suficiente energía mecánica de entrada para suministrar la demanda interna del generador, por lo que la red se encarga de suministrar esta potencia, esto podría ser por causa de fallos en la turbina o en el regulador de velocidad.

Los principales daños debido a la motorización se pueden presentar en la turbina, por sobreesfuerzos y cavitación en los álabes, para detectar esta condición se utiliza una función de potencia direccional, la cual reconoce el sentido de flujo de la energía y actúa con cierto retardo frente a la presencia de potencia inversa.

#### **5.7.7.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de detección de potencia inversa (ANSI 32), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86P_1$  y  $86P_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada parcial, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de parada parcial en el sistema de control.

En la Figura 11 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 32.

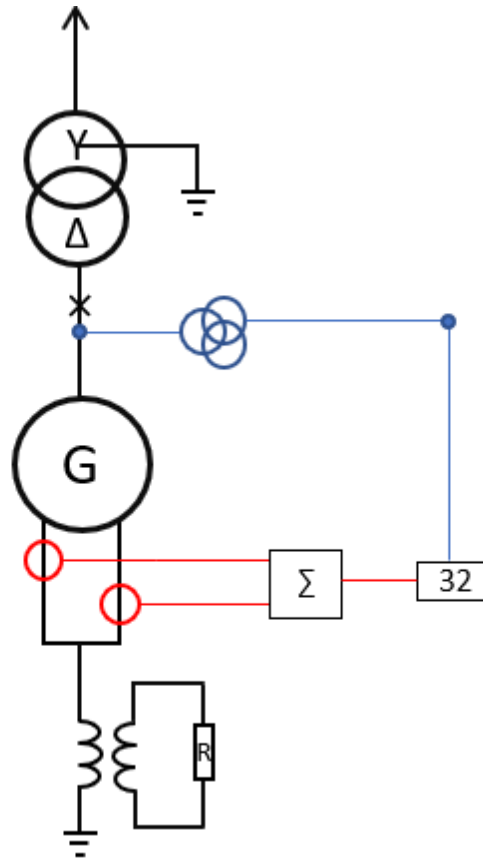


Figura 11. Esquema y conexión de la función ANSI 32.

### 5.7.7.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

En caso de paro por orden de la función ANSI 32R, es posible que exista alguna obstrucción del flujo de agua en las tuberías o en la turbina, por lo que se desconecta el generador, la excitación y se da la orden de paro de la turbina, en este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad de generación hasta que se detecte la causa del problema y se realicen las respectivas correcciones, para esto se recomienda:

- Revisar el estado y funcionamiento del regulador de velocidad.
- Revisar el estado de los elementos en la turbina (alabes, distribuidor y rodete).
- Revisar el estado y operación de la válvula cilíndrica de la turbina.
- Revisar el estado y operación del sistema de compuertas de las tuberías de carga.
- Revisar que no existan obstrucciones en la captación.

### **5.7.8 PROTECCIÓN CONTRA ENERGIZACIÓN INADVERTIDA ANSI 50/27:**

Una energización indeseada del generador ocurre cuando se encuentra detenido y fuera de servicio, debido al cierre accidental del interruptor o a la aparición de arcos en el interruptor abierto. Cuando el generador se energiza de manera inadvertida, se comporta como una máquina de inducción, por lo que se induce una corriente en el devanado de amortiguamiento del rotor, lo que puede generar calentamientos que pueden dañar los puntos de conexión. La magnitud de las corrientes en estator y rotor dependen de las impedancias del sistema, del transformador y del generador.

Para la detección de la energización inadvertida se utiliza un esquema de sobrecorriente supervisada por tensión.

#### **5.7.8.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función contra energización inadvertida (ANSI 50/27), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86E_1$  y  $86E_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 12 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 50/27.

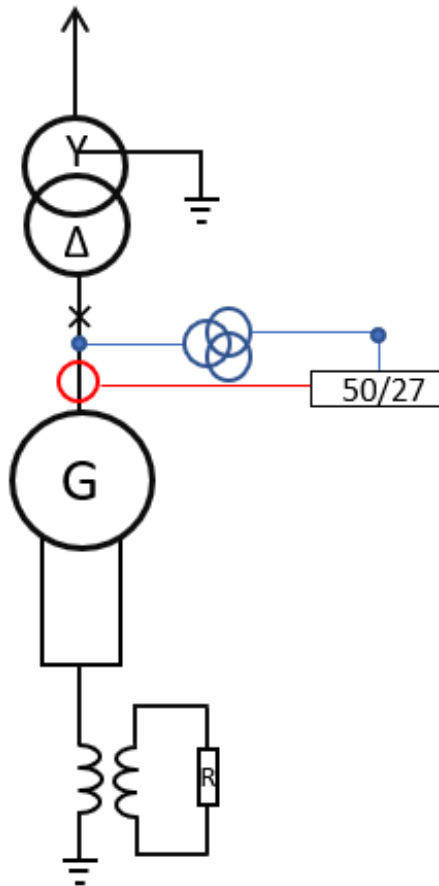


Figura 12. Esquema y conexión de la función ANSI 50/27.

### 5.7.8.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

En la activación de la función de protección contra energización inadvertida, se da la orden de desconexión del generador y cierre de la válvula de la turbina, en este caso se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se detecte la causa del problema y se realicen las respectivas correcciones. Para detectar la causa del fallo se recomienda:

- Revisar el estado del interruptor principal del generador.
- Revisar instrucciones de cierre al interruptor (local o remota).
- Los principales daños por el fenómeno se pueden presentar en el rotor, por lo que se recomienda realizar una inspección y realizar pruebas para evaluar el estado de los aislamientos en los devanados del rotor.
- Si la energización se dio debido a un error de operación y no se presentaron daños en el interruptor ni en el generador, es posible realizar la reconexión de la unidad generadora.

### **5.7.9 PROTECCIÓN CONTRA PÉRDIDA DE EXCITACIÓN ANSI 40:**

La pérdida de la excitación de un generador se podría dar debido a una interrupción del flujo de corriente continua en el circuito de campo, esto sucede debido a cortocircuitos en el devanado del rotor, fallos en el sistema de control de la excitación, la apertura o mala operación del interruptor de campo, o la pérdida del suministro de energía del sistema de excitación. Esta condición en la operación de un generador puede traer consecuencias muy graves, tanto para el sistema de potencia, el cual puede perder el soporte de energía reactiva, como para el generador, el cual comienza a actuar como máquina de inducción, girando a velocidades por encima de la sincrónica y tomando potencia reactiva del sistema aumentando la corriente en el estator lo que puede generar sobrecargas, además de la inducción de corrientes dañinas en los devanados del rotor y de amortiguamiento.

#### **5.7.9.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función contra pérdida de excitación (ANSI 40), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86E_1$  y  $86E_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 13 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 40.





### **5.7.10 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGA TÉRMICA ANSI 49:**

Una condición de sobrecarga en el generador se puede presentar principalmente por aumentos de la demanda o por perturbaciones en el sistema de potencia, también podría ser causada por fallas en sistemas de control de excitación y velocidad.

La protección contra sobrecarga se encarga de prevenir principalmente el sobrecalentamiento en los devanados del estator, ya que esta condición puede tener como consecuencia un debilitamiento de los aislamientos, aumentando así el riesgo de fallas más graves.

La protección contra sobrecarga realiza una estimación de la temperatura interna de la máquina por medio de la medida de corriente.

#### **5.7.10.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de sobre temperatura (ANSI 49), se señala en los dos relés de protección del generador y se energiza el relé maestro de disparo y bloqueo  $86P_1$  y  $86P_2$ , el cual ejecuta el esquema de parada parcial, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Inicio de la secuencia de paro de parada parcial en el sistema de control.

En la Figura 14 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 49.



contactos. Esto puede pasar por problemas de continuidad en el circuito de disparo o problemas mecánicos en los contactos o el sistema de apertura del interruptor.

La condición de falla de interruptor significa que no es posible aislar el equipo fallado, lo que lo pone en riesgo de daños más severos y pone en riesgo a los demás equipos del sistema.

Para detectar esta condición, la protección recibe la orden de disparo y realiza una medida de la corriente que pasa a través del interruptor. Para aislar la falla el relé primero realiza una confirmación de disparo al interruptor, si persiste la condición de falla de interruptor, se envía la orden de apertura a los interruptores de las subestaciones de 115 kV.

#### **5.7.11.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la primera etapa de la función de detección de falla de interruptor (ANSI 50BF), se señala en los dos relés de protección del generador y se realiza la reconfirmación del disparo al interruptor de unidad, de forma directa a las bobinas de disparo y por medio del relé de disparo y bloqueo  $86E_1$  Y  $86E_2$ , el cual ejecuta el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.
- En la segunda etapa, se envía la señal de disparo directo transferido a las subestaciones de 115 kV donde se ejecutan las instrucciones.
- Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
- Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 15 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 50BF.

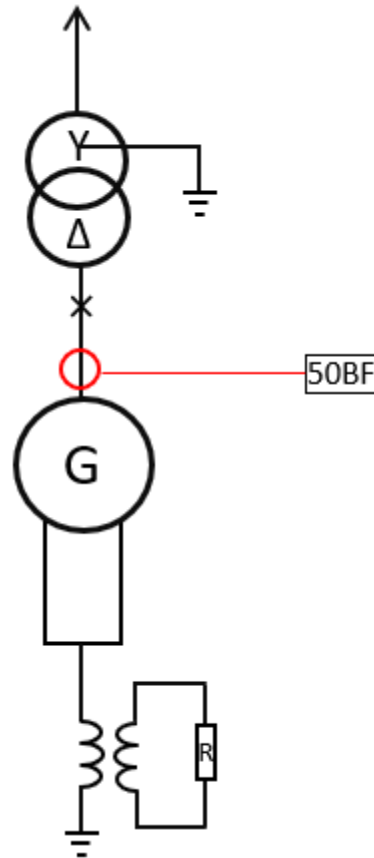


Figura 15. Esquema y conexión de la función ANSI 50BF.

#### 5.7.11.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

La activación y disparo por la función ANSI 50BF, representa una orden de disparo de alguna protección mecánica o eléctrica, y un problema en la apertura del interruptor, frente a esta situación se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se realicen las respectivas correcciones, para esto se recomienda:

- Revisar el estado de los elementos y sistemas del generador según el evento que ocasionó el arranque de la función ANSI 50BF.
- Revisar alarmas de circuitos de disparo en el relé.
- Revisar la posición del breaker de alimentación y la continuidad de los circuitos de disparo del interruptor.
- Revisar el estado y funcionamiento del interruptor principal del generador.

### **5.7.12 SUPERVISIÓN DE FALLO FUSIBLE ANSI 60FL:**

La pérdida de señal de un transformador de potencial se puede presentar debido a contactos abiertos, deteriorados o la fundición de los fusibles en el secundario de los PT por causa de cortocircuitos.

Estos problemas con la señal de tensión de los PT's generan una mala operación de ciertas funciones de protección, que tienen entrada de tensión como la ANSI 21, la ANSI 32, la ANSI 40 entre otras, también pueden ocasionar la mala operación del sistema de control de tensión.

Para detectar estas condiciones se realiza la medida de la tensión y la corriente en las fases del generador, y se utiliza un algoritmo de detección de falla de fusible por medio de la componente de secuencia cero.

#### **5.7.12.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando la función ANSI 60 detecta una condición de falla de fusible, no se envía señal de paro a los sistemas, sin embargo, se señaliza en los dos relés de protección del generador y realiza las siguientes acciones:

- Bloqueo de la función ANSI 40.
- Bloqueo de la función ANSI 32.
- Bloqueo de la función ANSI 21.
- Bloqueo de la función ANSI 50/27.
- Bloqueo de la función ANSI 27.
- Bloqueo de la función ANSI 59THD.
- Bloqueo de la función ANSI 59N.
- Envía señal de alerta al regulador de tensión.

En la Figura 16 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 60FL.

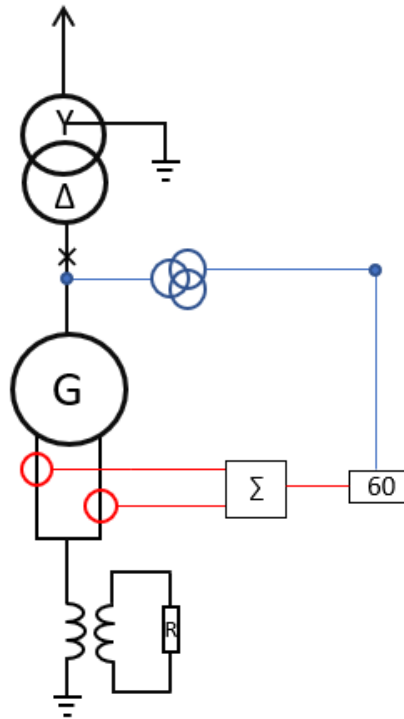


Figura 16. Esquema y conexión de la función ANSI 60.

### 5.7.12.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

La activación de la función de protección contra falla de fusible no envía orden de disparo del generador, pero bloquea la operación de las funciones que dependen de la tensión.

No es recomendable que el generador opere con dichas funciones de protección deshabilitadas por que se pone en riesgo la seguridad del equipo y de las personas, por lo que se recomienda desconectar, bloquear e indisponer la unidad, realizar la debida inspección para identificar el transformador de potencial que presenta problemas y realizar las correcciones pertinentes.

### 5.7.13 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE GENERADOR ANSI 87G:

Los cortocircuitos en la zona del generador pueden ser originados por fallas en aislamientos o elementos intrusivos que generan contacto entre fases en devanados del estator o en las terminales del generador.

La presencia de un cortocircuito en el generador es una condición crítica, debido a la extremadamente alta corriente circulante que puede ocasionar daños en los aislamientos de los devanados y del núcleo, además de grandes impactos mecánicos en el eje y los acoplamientos.

La protección diferencial de generador ofrece una protección selectiva y de alta sensibilidad frente a fallas que involucran varias fases en el devanado del estator. Funciona mediante la comparación de los valores de corriente de entrada y salida del generador, por lo que reacciona de manera instantánea ante un desbalance entre estas magnitudes según el ajuste especificado.

#### **5.7.13.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función diferencial del generador (ANSI 87G), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86E_1$  y  $86E_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 17 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 87G.



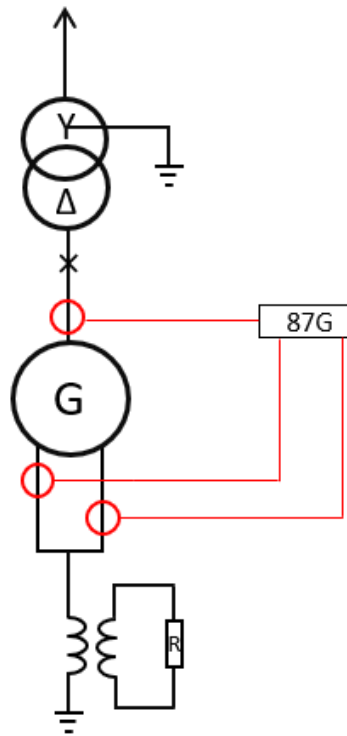


Figura 17. Esquema y conexión de la función ANSI 87G.

### 5.7.13.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

La protección diferencial tiene una alta selectividad amperimétrica, por lo que un disparo de esta función asegura la existencia de una falla dentro de la zona del generador, así entonces se detiene por completo al generador, la excitación y se para la turbina. En este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad de generación hasta que se encuentre la causa de la falla y se realicen las respectivas correcciones. Para localizar la falla se recomienda realizar un proceso de descarte al evaluar los elementos asociados al generador de la siguiente manera:

- Realizar una inspección visual para detectar posibles elementos extraños que hagan contacto entre fases.
- Separar las trenzas del generador y verificar los aislamientos entre fases en: Devanados del estator, terminales del generador y transformador de excitación.

### 5.7.14 PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIÓN RESIDUAL ANSI 59N:

Si se tiene la puesta a tierra de los generadores con alta impedancia, las protecciones de sobrecorriente se vuelven poco efectivas para la detección de fallas a tierra, a pesar de que las corrientes en las fallas monofásicas a tierra en la zona del generador no son de gran magnitud

debido a la puesta a tierra de alta impedancia del generador, una falla monofásica a tierra puede ocasionar problemas como daños en los devanados del estator, desbalances y sobretensiones en las fases sanas.

La protección de sobretensión residual ofrece una detección contra falla monofásica hasta en un 95% del estator, al reconocer la tensión que aparece en el neutro debido al desbalance de tensión ocasionado por la falla a tierra.

#### **5.7.14.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de sobretensión residual (ANSI 59N), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo  $86E_1$  y  $86E_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 18 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 59N.

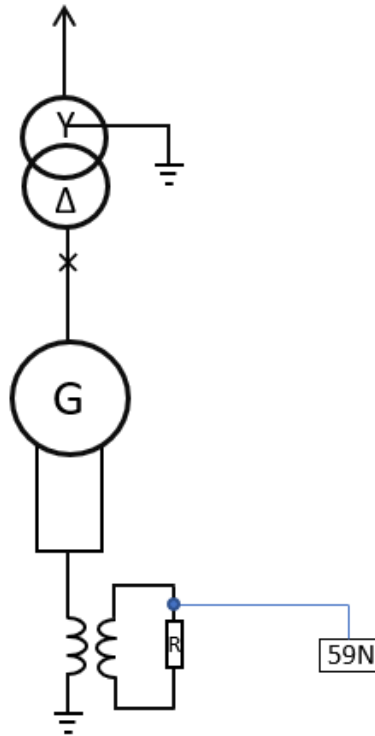


Figura 18. Esquema y conexión de la función ANSI 59N.

#### 6.7.14.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de la protección ANSI 59N, envía la orden de desconexión del generador, excitación y paro de la turbina, en este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se encuentre la causa del disparo y se realicen las respectivas correcciones. Para localizar la falla se recomienda realizar un proceso de descarte al inspeccionar los elementos asociados al generador de la siguiente manera:

- Realizar una inspección visual para detectar posibles elementos extraños que hagan contacto a tierra con partes energizadas.
- Separar las trenzas del generador y verificar los aislamientos en:
  - Devanados del estator.
  - Terminales del generador.
  - Transformador de excitación.

#### 5.7.15 PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIÓN DE TERCER ARMÓNICO ANSI 59THD:

Cuando la falla monofásica a tierra se da en las espiras más cercanas al neutro del estator, el desbalance de tensión ocasionado por esta falla se vuelve muy pequeño, de manera que la protección 59N no es capaz de detectarlo, por lo que se hace necesario complementar esta protección para reconocer estos eventos y brindar una protección al 100 % del estator.

Cuando se presenta una falla a tierra en las espiras cercanas al neutro de la máquina, se da un incremento en la tensión de la componente de tercer armónico cerca a los bornes del estator y una disminución de esta componente cerca al neutro, por lo que se utiliza una función de sobretensión que actúa como diferencial de tensión, ajustada para reconocer y reaccionar ante los cambios de la componente de tercer armónico originados por la falla a tierra cerca del neutro.

#### **6.7.15.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de sobretensión de tercer armónico (ANSI 59THD), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo *K86E1* y *K86E2*, los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 19 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 59THD.

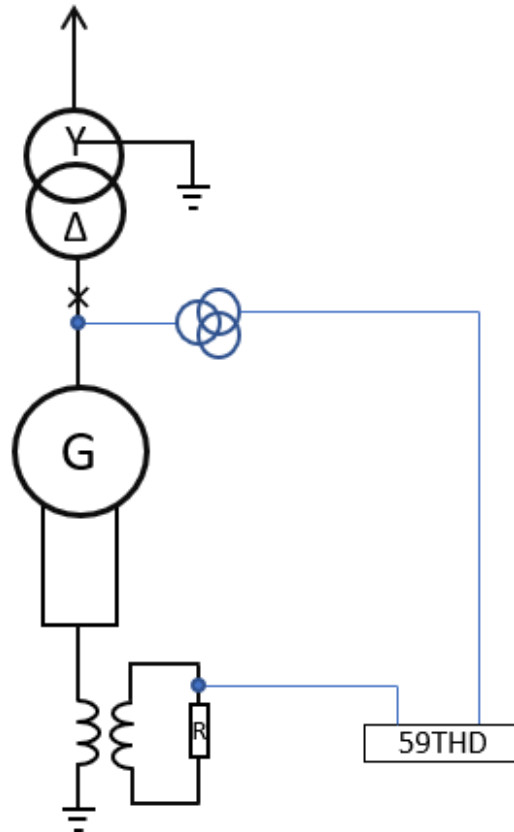


Figura 19. Esquema y conexión función ANSI 59THD.

#### 5.7.15.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo por la protección ANSI 59THD, representa un daño interno en el aislamiento de los devanados del estator que provoca la falla a tierra, por lo que se desconecta el generador, la excitación y se detiene la turbina, en este caso se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se localice la falla y se realicen las respectivas correcciones. Para esto se recomienda:

- Inspeccionar los devanados del estator, identificar si existen elementos extraños que hagan contacto a tierra.
- Evaluar el estado de los aislamientos en el devanado del estator.

#### 5.7.16 PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE RESIDUAL DEL GENERADOR ANSI 50N/51N:

Esta función de protección se utiliza como respaldo para la detección de fallas con fase a tierra en la zona del generador.

A pesar de que las corrientes en las fallas monofásicas a tierra en la zona del generador no son de gran magnitud debido a la puesta a tierra de alta impedancia del generador, una falla

monofásica a tierra puede ocasionar problemas como daños en los devanados del estator, desbalances y sobretensiones en las fases sanas.

Para esta protección se realiza una medida de corriente con un CT ubicado en el neutro, se cuenta con un elemento de sobrecorriente de actuación instantánea (50N) y uno de sobrecorriente de tiempo (51N).

#### **5.7.16.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activan las funciones de sobrecorriente instantánea y de tiempo residual (ANSI 50N y ANSI 51N), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo *K86E1* y *K86E2*, los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 20 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 50N/51N.

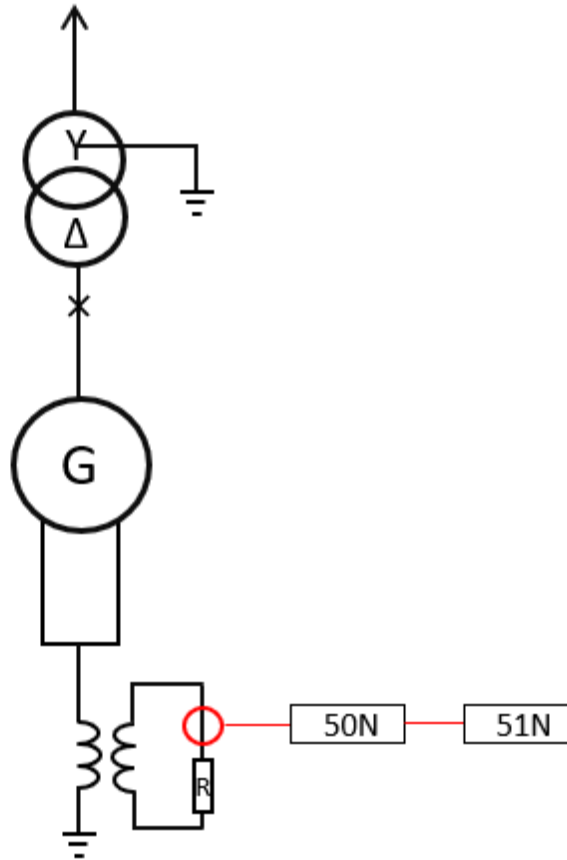


Figura 20. Esquema y conexión función ANSI 50N/51N.

### 5.7.16.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de por parte de las funciones ANSI 50N y ANSI 51N, se envía la orden de desconexión del generador, excitación y paro de la turbina, en este caso se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se encuentre la causa del disparo y se realicen las respectivas correcciones. Para localizar la falla se recomienda realizar un proceso de descarte evaluando los elementos asociados al generador de la siguiente manera:

- Realizar una inspección visual para detectar posibles elementos extraños que hagan contacto a tierra con partes energizadas.
- Separar las trenzas del generador y verificar los aislamientos de:
  - Devanados del estator.
  - Terminales del generador.
  - Transformador de excitación.

### **5.7.17 PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE RESTRINGIDA POR TENSIÓN ANSI 51V:**

La función de protección de sobrecorriente puede ser restringida o controlada por tensión y es implementada como una protección de respaldo para fallas entre fases.

Detecta cortocircuitos en el generador o en el sistema de potencia que no son despejadas apropiadamente, por ello, esta función de protección reduce su sensibilidad para una condición de sobrecarga de emergencia, mientras que incrementa su sensibilidad para corrientes de falla que presentan subtensión, esto debido a que la corriente de cortocircuito en el generador disminuye rápidamente.

#### **5.7.17.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

La función de protección sobrecorriente restringida por tensión (ANSI 51V) se encuentra activa en los relés principales *PPG1* y *PPG2* y los relés de respaldo, por lo que al activarse se señala en el relé respectivo y se energiza el relé maestro de disparo y bloqueo *K86P2*, el cual ejecuta el esquema de parada de parcial por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).

En la Figura 21 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 51V.





### **5.7.18 PROTECCIÓN DE FALLA A TIERRA ROTOR ANSI 64F:**

Si se presenta una falla a tierra en el rotor, esta puede ser originada por un fallo en el aislamiento, este fallo en el aislamiento representa una condición crítica, ya que se aumenta la probabilidad de que existan más daños, además, una segunda tierra en el rotor representaría un cortocircuito entre los devanados de este, lo que causaría flujos con desbalance que traerían esfuerzos mecánicos y daños en la máquina.

#### **5.7.18.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

La función de falla a tierra en el rotor (ANSI 64F) se encuentra ubicada en el tablero de control de la excitación, si esta se activa se señala en el relé donde se activó y envía la señal de disparo a relés maestros de disparo y bloqueo  $86E_1$  y  $86E_2$ , los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

En la Figura 22 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 64F.

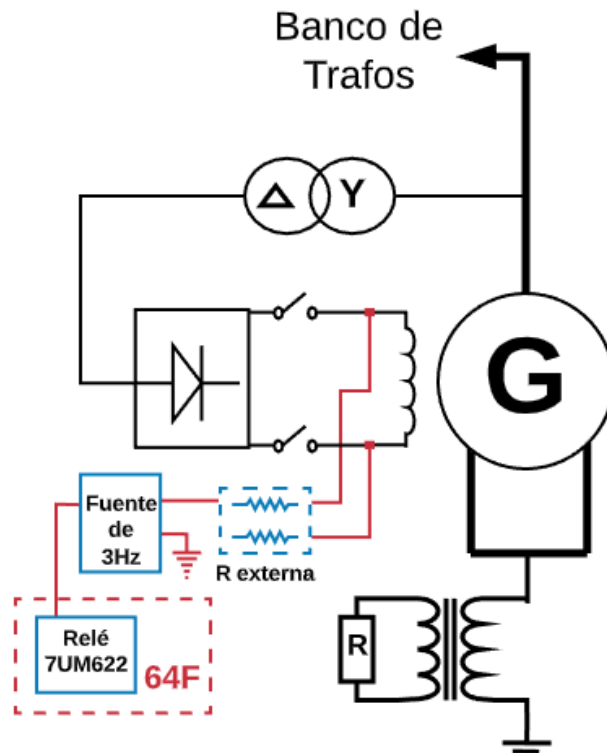


Figura 22. Esquema y conexión de la función ANSI 64F.

### 5.7.18.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo por la función ANSI 64F, se da por problemas con el devanado de campo del generador, por lo que se detiene por completo, desconectando el interruptor principal, el sistema de excitación y se da la parada de la turbina. En este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se localice la falla y se realicen las debidas correcciones. Para esto se recomienda:

- Revisar el estado del rotor, detectar la presencia de daños en el aislamiento de los devanados que pudiera generar la falla a tierra.

## 5.8 FUNCIONES DE PROTECCIÓN ACTIVAS EN LOS TRANSFORMADORES DE LA CENTRAL.

### 5.8.1 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR ANSI 87T:

La función diferencial del transformador se encarga de proteger de manera rápida y selectiva contra fallas internas en la zona de protección delimitada por los CT's ubicados en el lado de alta y en el lado de baja del transformador. Las corrientes de cortocircuito en un

transformador pueden tener severas consecuencias, desde daños en los aislamientos hasta la destrucción de los devanados, además de esfuerzos electromecánicos en el núcleo.

El principio de operación de la protección se basa en la comparación de las magnitudes de la corriente en la entrada y salida del transformador, actuando ante desbalances entre estas magnitudes.

#### **6.8.1.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Si se activa la función diferencial de transformador (87T), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia  $86E_1$  y  $86E_2$  del generador, y se ejecutan las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.
- Simultáneamente, se envía la señal de disparo directo transferido a la subestación 115 kV donde se ejecutan las instrucciones:
  - Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
  - Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 23 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 87T.

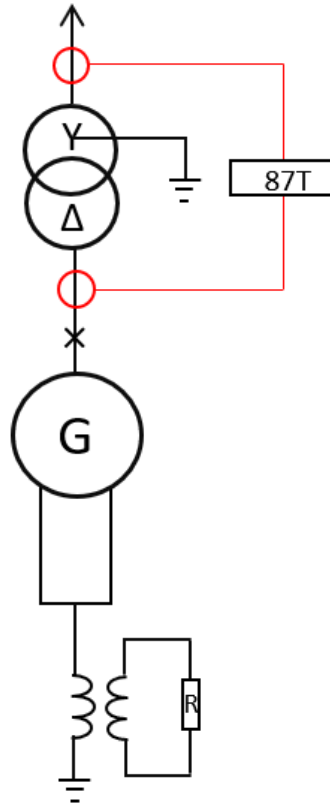


Figura 23. Esquema y conexión de la función ANSI 87T.

### 5.8.1.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de la función ANSI 87T detecta una falla en la zona del transformador y lo aísla, lo desconecta del generador y del sistema de potencia, en este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se detecte la ubicación de la falla y se realicen las respectivas correcciones. Para esto se recomienda:

- Revisar el estado físico del transformador, evaluar que no haya daños en bujes, devanados y núcleo.
- Inspeccionar los conductores de fases, barraje y devanados del transformador, buscar elementos extraños que puedan hacer contacto entre fases o a tierra.
- Examinar el estado de los aislamientos en los devanados de alta y baja tensión.

### 5.8.2 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE FALLA A TIERRA ANSI 87N:

La función diferencial de falla a tierra se encarga de proteger de manera rápida y selectiva contra fallas de fase a tierra en el devanado o en bornes del lado de alta tensión del transformador, para esto se requiere que el neutro del lado en estrella del transformador esté

aterrizado, de esta manera se toman las medidas de la corriente de salida del transformador y de la corriente del neutro aterrizado.

La protección realiza la comparación entre la suma de la corriente de las tres fases en la salida del transformador, con la corriente que circula por el neutro del devanado, reaccionando ante desbalances en estas.

#### **5.8.2.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Si se activa la función diferencial de falla a tierra del transformador (87N), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia  $86E_1$  y  $86E_2$  del generador y se ejecutan las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.
- Simultáneamente, se envía la señal de disparo directo transferido a la subestación 115 *kV* donde se ejecutan las instrucciones:
  - Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
  - Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 24 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 87N.

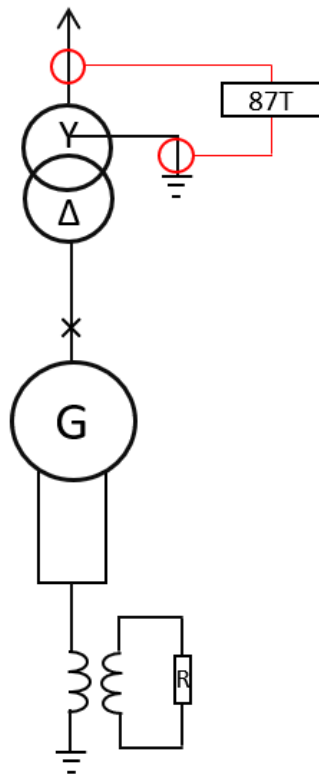


Figura 24. Esquema y conexión de la función ANSI 87T.

### 5.8.2.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de la función ANSI 87N detecta una falla a tierra en el lado de alta del transformador y lo aísla, desconectándolo del generador y del sistema de potencia, en este caso se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se encuentre la ubicación de la falla y se realicen las respectivas correcciones:

- Revisar el estado físico del transformador, evaluar que no haya daños en bujes, devanados y núcleo.
- Inspeccionar los conductores de fases, barraje y devanados alta tensión del transformador, buscar elementos extraños que puedan hacer contacto entre fase y tierra.
- Examinar el estado de los aislamientos en los devanados de alta tensión.

## 5.9 FUNCIONES DE PROTECCIÓN ACTIVAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE LA CENTRAL.

### **5.9.1 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO ANSI 51:**

Esta función actúa como protección de respaldo para fallas en la zona del transformador y la línea, para esta protección se realiza la medida de corriente en la salida del transformador de potencia por medio de los CT's conectados en el lado de alta y en el extremo de la línea en la subestación 115 *kV*.

#### **5.9.1.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Sí se activa la función de sobrecorriente (ANSI 51), ya sea en el tablero de protección del transformador o de línea en casa de máquinas o la subestación 115 *kV*, se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia  $86E_1$  y  $86E_2$  del generador, y se ejecutan las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.
- Simultáneamente, se envía la señal de disparo directo transferido a la subestación 115 *kV* donde se ejecutan las instrucciones:
  - Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
  - Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 25 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 51.



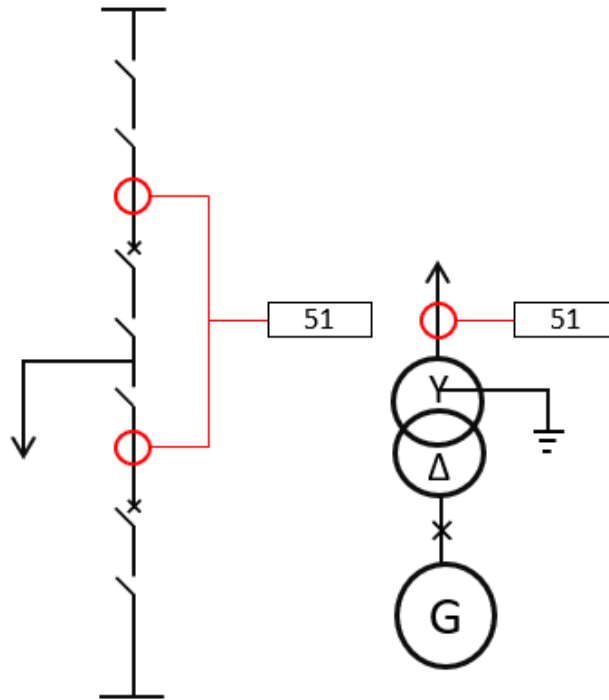


Figura 25. Esquema y conexión de la función ANSI 51.

### 5.9.1.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

Un disparo de la función de protección ANSI 51 desde cualquiera de los tableros de protección, ya sea transformador o línea en casa de máquinas o SE 115 kV, puede ser causado por fallas en la línea, el transformador o externos a la zona, la protección desconecta la línea y al generador, en este caso se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se detecte la ubicación de la falla y se realicen las respectivas correcciones:

- Revisar el estado físico del transformador, evaluar que no haya daños en bujes, devanados y núcleo.
- Inspeccionar los conductores de fases, barraje y devanados del transformador, buscar elementos extraños que puedan hacer contacto entre fases o a tierra.
- Examinar el estado de los aislamientos en los devanados de alta y baja tensión.
- Inspeccionar la línea de transmisión, buscar elementos extraños que puedan causar la falla, revisar que no existan daños.

### 5.9.2 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DE TIEMPO RESIDUAL ANSI 51N:

Esta función de protección se utiliza como respaldo para la detección de fallas a tierra en el lado de alta del transformador en la línea, la medida de corriente se realiza con un CT ubicado en el neutro del lado en estrella del transformador, y en el extremo de la línea en la subestación

115 kV por medio de la sumatoria de la corriente de las tres fases. De manera que, frente a fallas asimétricas a tierra, se presenta una corriente en el neutro ante la cual, según la intensidad y la curva de tiempo ajustada, el relé responde con una orden de desconexión para el despeje de la falla.

#### 5.9.2.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Si se activa la función de protección contra sobrecorriente residual (ANSI 51N), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia  $86E_1$  y  $86E_2$  del generador y se ejecutan las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.
- Simultáneamente, se envía la señal de disparo directo transferido a la subestación 115 kV donde se ejecutan las siguientes instrucciones:
  - Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
  - Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 26 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 51N.

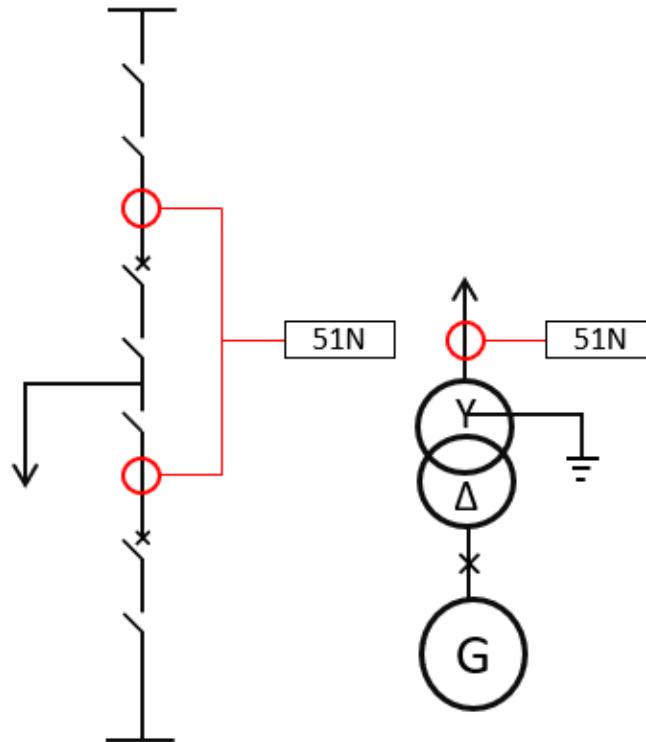


Figura 26. Esquema y conexión de la función ANSI 51N.

### 5.9.2.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de la función ANSI 51N puede representar una falla a tierra en el lado de alta del transformador y en la línea, para aislar la falla se desconectan la línea y el generador, en este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se encuentre la ubicación de la falla y se realicen las respectivas correcciones, para esto se recomienda:

- Revisar el estado físico del transformador, evaluar que no haya daños en bujes, devanados y núcleo.
- Inspeccionar los conductores de fases, barraje y devanados alta tensión del transformador, buscar elementos extraños que puedan hacer contacto entre fase y tierra.
- Examinar el estado de los aislamientos en los devanados de alta tensión.
- Inspeccionar la línea de transmisión, buscar elementos extraños que puedan causar la falla a tierra, especialmente en puntos cercanos a las torres, revisar que no existan daños.

### 5.9.3 PROTECCIÓN DISTANCIA EN LA LÍNEA ANSI 21:

Esta función se utiliza como protección contra fallas a lo largo de la línea de conexión, su principio de operación está basado en el reconocimiento de la impedancia por medio de las lecturas de tensión y corriente en el extremo de la línea en la subestación 115 kV, de manera que

actúa si detecta cambios significativos en la lectura de la impedancia, según el ajuste de la característica de detección.

### 5.9.3.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Si se activa la función de protección distancia de la línea (ANSI 21), se señala en el relé donde se activó y se energiza el relé maestro de disparo y bloqueo 86L1 Y 86L2, el cual ejecuta el esquema de parada parcial, por medio de las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación una vez confirmada la apertura del interruptor de unidad.
- Inicio de la secuencia de parada parcial en el sistema de control.
- Simultáneamente, se desconecta la línea de la subestación 115 kV con las siguientes instrucciones:
  - Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
  - Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 27 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 21.

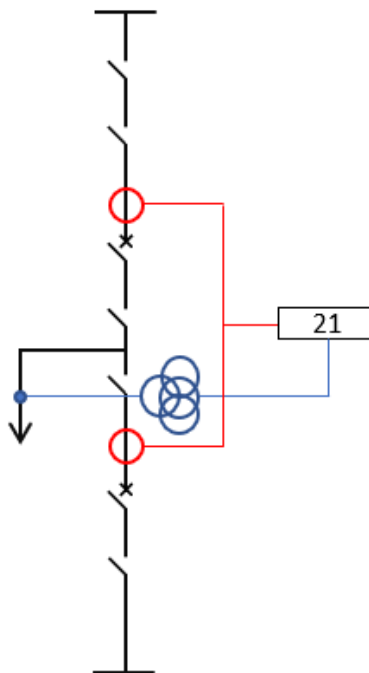


Figura 27. Esquema y conexión de la función ANSI 21.

### 5.9.3.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de la función ANSI 21 representa una falla en algún punto de la línea, para aislar la falla se desconectan la línea y el generador, en este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se detecte la ubicación de la falla y se realicen las respectivas correcciones:

- Inspeccionar la línea de transmisión, buscar elementos extraños que puedan causar la falla, revisar que no existan daños.

### 5.9.4 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL ANSI 67:

Descripción: La protección de sobrecorriente direccional se encarga de detectar aumentos considerables de la corriente que fluye con una polaridad determinada, protegiendo así contra fallas en la línea.

La polarización de la protección se realiza con el flujo de energía, por lo que se realiza una medida de tensión y corriente para estimar la polaridad del flujo de energía, además está configurada con una curva de tiempo de disparo inverso a la magnitud de la corriente.

La medida de la corriente y tensión se realiza en el extremo de la subestación de 115 *kV* y la protección se polariza mirando en dirección al generador.

#### 5.9.4.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Cuando se activa la función de sobrecorriente direccional (ANSI 67), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia *K86E1* y *K86E2* del generador, ejecutando las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

Simultáneamente, se desconecta la línea de la subestación 115 *kV* con las siguientes instrucciones:

- Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
- Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 28 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 67.

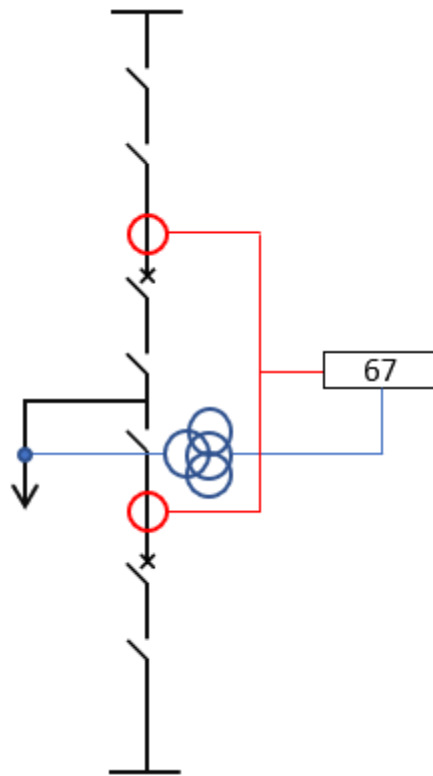


Figura 28. Esquema y conexión función ANSI 67.

#### 5.9.4.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de la función ANSI 67 representa una falla en algún punto de la línea, para aislar la falla se desconectan la línea y el generador, en este caso se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que se detecte la ubicación de la falla y se realicen las respectivas correcciones:

- Inspeccionar la línea de transmisión, buscar elementos extraños que puedan causar la falla, revisar que no existan daños.

#### 5.9.5 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL RESIDUAL ANSI 67N:

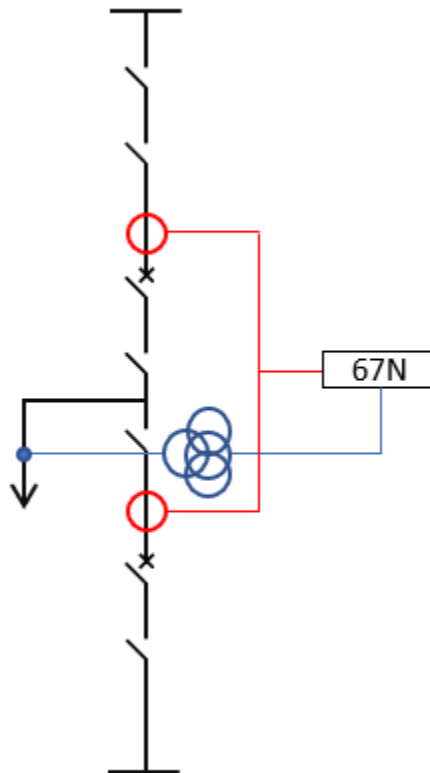
La protección de sobrecorriente direccional residual sirve para la protección de la línea contra fallas a tierra, detectando aumentos considerables de corriente en el neutro por medio de la sumatoria de las corrientes de fase, está configurada con dos elementos, una curva de tiempo de disparo inverso a la magnitud de la corriente y otro elemento de potencia inversa, La medida de la corriente y tensión se realiza en el extremo de la subestación de 115 kV y la protección se polariza mirando en dirección al generador.

### 5.9.5.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Si se activa la función de sobrecorriente direccional residual (ANSI 67N), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia  $86E_1$  y  $86E_2$  del generador y se ejecutan las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.
- Simultáneamente, se desconecta la línea de la subestación 115 kV con las siguientes instrucciones:
  - Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
  - Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 29 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 67N.



*Figura 29. Esquema y conexión de la función ANSI 67N.*

### **5.9.5.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:**

El disparo de la función ANSI 67N puede representar una falla a tierra en la línea, para aislar la falla se desconectan la línea y el generador, en este caso se debe bloquear e inhabilitar la unidad hasta que se detecte la ubicación de la falla y se realicen las respectivas correcciones de acuerdo con las siguientes indicaciones:

- Inspeccionar la línea de transmisión, buscar elementos extraños que puedan causar la falla a tierra, especialmente en puntos cercanos a las torres, revisar que no existan daños.

### **5.9.6 PROTECCIÓN CONTRA SUBTENSIÓN Y SOBRETENSIÓN EN LA LÍNEA: ANSI 27/59:**

Las funciones de sobre y baja tensión se utilizan para detectar condiciones de operación extremas en el sistema y como respaldo para la detección de fallas.

La operación de la línea de transmisión en sobretensión o subtensión, representa grandes requerimientos de despacho o consumo de potencia reactiva al generador, lo que puede causar sobrecargas tanto en el generador como en la línea.

Para esta protección se realiza la medida de tensión por medio de PT's en el extremo de la línea en la subestación 115 kV.

#### **5.9.6.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de sobretensión (ANSI 59), se señaliza en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia 1 y 2 del generador, ejecutando las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.
- Simultáneamente, se desconecta la línea de la subestación 115 kV con las siguientes instrucciones:
  - Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
  - Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF). Cuando se activa la función de subtensión (ANSI 27), se envía una señal de alarma.



En la Figura 30 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 27/59.

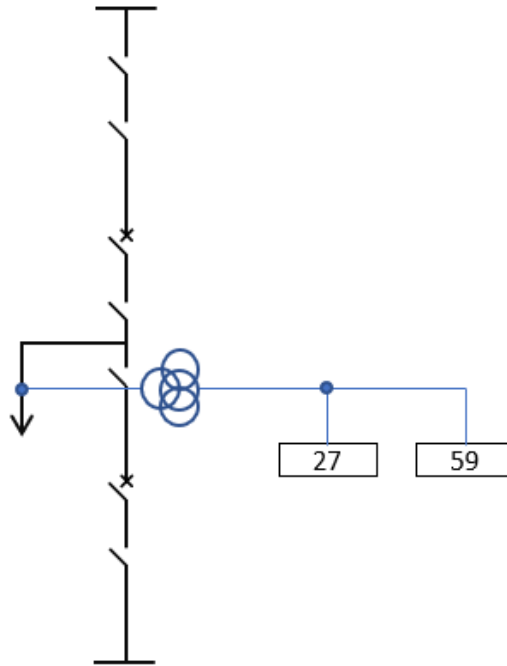


Figura 30. Esquema y conexión de la función ANSI 27/59.

### 5.9.6.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de la función ANSI 59 ocasiona la desconexión de la línea y el generador, se recomienda entonces:

- Inspeccionar la línea de transmisión que no existan daños en aisladores.
- Consultar el estado del sistema de potencia con el operador de red y el CND.
- La activación de la función ANSI 27 no genera disparo, por lo que se recomienda:
  - Consultar el estado del sistema de potencia con el operador de red y el CND.

### 5.9.7 ESQUEMA DE TELEPROTECCIÓN ANSI 21/85:

Estos esquemas permiten reducir el tiempo de operación de las protecciones de distancia o de sobrecorriente direccional, por esto, también se conocen como esquemas de aceleración de disparo.

La información sobre la zona de protección o la dirección en la cual un relé remoto ve la falla se utilizan en el relé local para confirmar si la falla es en la línea protegida.

### 5.9.7.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Cuando se activa la función de teleprotección (ANSI 21/85), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia *K86E1* y *K86E2* de la línea ejecutando las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad de línea en la subestación 115 kV.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad de línea (ANSI 50BF)
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.

En la Figura 31 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 21/85.

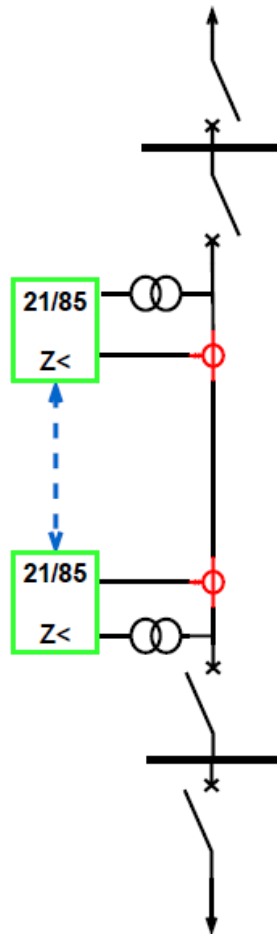


Figura 31. Esquema y conexión función ANSI 21/85.

### **5.9.7.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:**

El disparo de por parte de la función ANSI 21/85 tiene como requisito que el seccionador de línea esté abierto, por lo que en este caso la falla se encuentra en la zona comprendida entre los CT's y el seccionador. se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que el equipo de operación y mantenimiento de la subestación detecte la ubicación de la falla y realice las respectivas correcciones.

### **5.9.8 ESQUEMA DE TELEPROTECCIÓN ANSI 67/85:**

Estos esquemas permiten reducir el tiempo de operación de las protecciones de distancia o de sobrecorriente direccional, por esto, también se conocen como esquemas de aceleración de disparo.

La información sobre la zona de protección o la dirección en la cual un relé remoto ve la falla se utilizan en el relé local para confirmar si la falla.

#### **5.9.8.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:**

Cuando se activa la función de teleprotección (ANSI 21/85), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro de emergencia *K86E1* y *K86E2* de la línea ejecutando las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad de línea en la subestación 115 *kV*.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad de línea (ANSI 50BF)
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.

En la Figura 32 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 67/85.

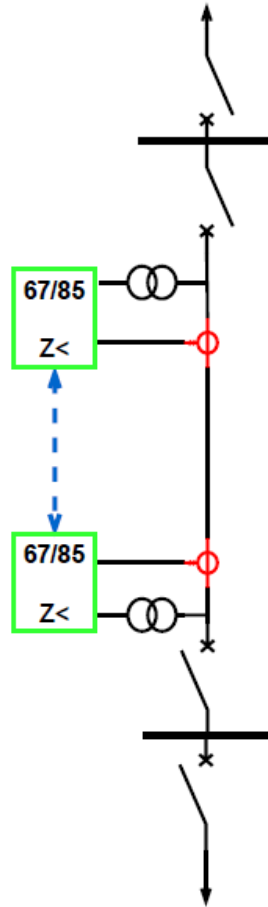


Figura 32. Esquema y conexión función ANSI 67/85.

### 5.9.8.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:

El disparo de por parte de la función ANSI 67/85 tiene como requisito que el seccionador de línea esté abierto, por lo que en este caso la falla se encuentra en la zona comprendida entre los CT's y el seccionador. se debe bloquear e indisponer la unidad hasta que el equipo de operación y mantenimiento de la subestación detecte la ubicación de la falla y realice las respectivas correcciones.

### 5.9.9 PROTECCIÓN DE VERIFICACIÓN DE SINCRONISMO ANSI 25:

La protección de verificación de sincronismo ANSI 25 se encarga de detectar las condiciones internas de la central con el sistema interconectado nacional para realizar la entrada de las unidades de generación al sistema de potencia eléctrico.

### 5.9.9.1 ACCIONES EJECUTADAS POR LA FUNCIÓN:

Cuando se activa la función de verificación de sincronismo (ANSI 25), se señala en el relé donde se activó y se energizan los relés maestros de paro parcial *K86E1* y *K86E2* del generador, ejecutando las siguientes órdenes:

- Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.
- Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).
- Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.
- Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.
- Paro de la turbina.

Simultáneamente, se desconecta la línea de la subestación 115 kV con las siguientes instrucciones:

- Disparo y bloqueo de interruptores de línea.
- Arranque de las protecciones contra falla de interruptores de la línea (ANSI 50BF).

En la Figura 33 se muestra el esquema de conexión de la función de protección ANSI 25.

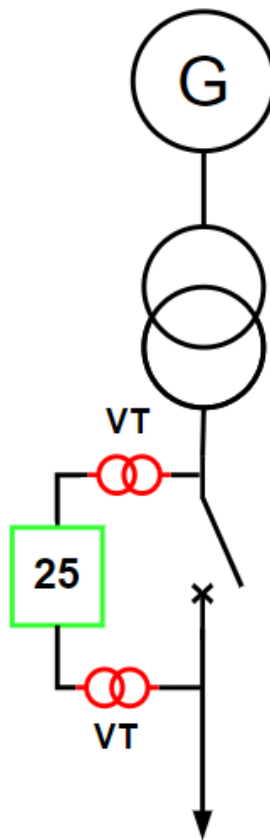


Figura 33. Esquema y conexión función ANSI 25.

### **5.9.8.2 ACTIVIDADES PARA REALIZAR:**

El cierre asincrónico del interruptor de unidad generador a la red eléctrica puede causar severos daños a la máquina eléctrica. Por este motivo se debe implementar un esquema que permita sincronizar la máquina con el sistema, el operador deberá con el CND, dirigirse a los tableros de protección y en el sistema SCADA de la central verificar valores similares en:

- Frecuencia del sistema
- Coincidencia de las tensiones y ángulos de fase.

### **5.10 ELABORACIÓN DEL MANUAL DE ATENCIÓN RÁPIDA DE PROTECCIONES:**

Una vez recopilada toda la información de la central, disposición física, de los equipos, unidades de generación, unidades de transformación, líneas de transmisión y tableros de control y protección, se procede a realizar y a comprimir la información de las funciones de protección eléctricas disponibles en la Central, el resultado final será un Documento que estará disponible en la Central Hidroeléctrica y que además, los operadores y asistentes técnicos de turno deberán leer con anticipación para así adquirir los conceptos técnicos y lograr identificar cuáles funciones de protección actúan, cómo lo hacen y que deberán hacer ellos frente a una contingencia eléctrica o ante un posible evento de falla.

En la Figura 34 se muestran una de las páginas del manual operativo que tendrán a disposición los trabajadores de la Central Hidroeléctrica, se puede apreciar que allí se indican cada una de las partes que componen la explicación de las funciones de protección disponibles en los relés, cada una de las funciones mostradas en las Tablas anteriores sigue el mismo formato y explicación, mostrando desde el nombre de la función, posibles causas de la falla bien sea en generador, transformador o línea de transmisión, el esquema de conexión de los transformadores de corriente y transformadores de potencial, explicación sobre cómo actúa el relé, el esquema de parada que realiza, los disparos y bloqueos de acuerdo con el esquema de parada ejecutado, que sucede con el generador, transformador o línea de transmisión cuando la función de protección se ha activado y finalmente la secuencia de actividades que deben ejecutar los asistentes técnicos u operadores de la Central para poder intervenir correctamente el relé de protección sin afectar los otros componentes eléctricos u otros relés de protección.

Además, dentro de la empresa se realizó un curso sobre las protecciones de sobrecorriente de los generadores, la finalidad de este era sintetizar y que el personal que tenga acceso al manual de instrucción rápida pudiera comprender conceptualmente las funciones de protección de sobrecorriente de una manera más sencilla. Se necesitó trabajar con la persona encargada de diseño de la empresa para que pudiera tomar el contenido hecho en documentos, realizar grabaciones de voz explicando el contenido, posteriormente la persona encarga del diseño realizaba la producción del material audiovisual.

<b>MANUAL INSTRUCTIVO</b>		ATENCIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA CENTRAL 26 MW	
VERSIÓN 01	Página 14 de 48		

<p>Función.</p> <p>Descripción y causas de la falla.</p> <p>Efectos.</p> <p>Instrucciones del relé y el esquema de parada.</p> <p>Disparo y bloqueo activado según el esquema de parada.</p> <p>Estado de la unidad una vez activada la función.</p> <p>Cómo proceder una vez activada la función de protección.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Protección Contra Baja Tensión En El Generador: ANSI 27</b></p> <p><b>Descripción:</b> La baja tensión es una condición de operación anormal que se puede presentar en los elementos de un sistema de potencia. La disminución de la tensión en bornes del generador puede ser originada por: Problemas en el sistema de control de la excitación, perturbaciones en el sistema o fallas externas cercanas al generador. Los generadores están normalmente diseñados para trabajar continuamente a un mínimo del 95 % de su tensión nominal, por lo que la operación por debajo de este valor puede tener efectos como: La reducción del límite de estabilidad, absorción excesiva de potencia reactiva que aumenta la corriente en bornes, y un mal funcionamiento o esfuerzos en equipos alimentados desde el generador.</p> <p><b>Acciones ejecutadas por la función</b></p> <p>Cuando se activa la función de baja tensión (ANSI 27), se señala en los dos relés de protección del generador y se energizan los relés maestros de disparo y bloqueo <math>K86E_1</math> y <math>K86E_2</math>, los cuales ejecutan el esquema de parada de emergencia, por medio de las siguientes acciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disparo y bloqueo del interruptor de unidad.</li> <li>• Arranque función de protección contra falla de interruptor de unidad (ANSI 50BF).</li> <li>• Desconexión y bloqueo del sistema de excitación.</li> <li>• Inicio de la secuencia de paro de emergencia en el sistema de control.</li> <li>• Paro de la turbina.</li> </ul> <p><b>Esquema general</b></p> <p><b>Actividades para realizar</b></p> <p>El disparo por la protección ANSI 27 del generador puede ser debido a problemas en el sistema de potencia o problemas en la excitación, por lo que se detiene por completo la operación, desconectando el generador, la excitación y deteniendo la turbina. En este caso se debe:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar si el disparo se dio por problemas internos, para esto:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Revisar el estado del sistema de control de la excitación.</li> <li>○ Revisar alarmas o señales de arranque de otras protecciones de excitación.</li> </ul> <p>En caso de confirmar problemas internos, bloquear e indisponer la unidad hasta que se realicen las respectivas correcciones.</p> </li> <li>• Evaluar si el disparo se dio debido a condiciones externas, para esto, consultar el estado del sistema de potencia, si se presentaron posibles perturbaciones o fallas cercanas, si este es el caso, se puede reconectar la unidad una vez se normalicen las condiciones del sistema.</li> </ul>
--	---

Página 14 de 48

Figura 34. Una de las páginas sobre la función ANSI 27 del manual operativo de la Central.

## 5.11 ELABORACIÓN DEL CURSO VIRTUAL PARA OPERADORES Y ASISTENTES TÉCNICOS:

Dentro de lo realizado en esta parte, por medio del asesor interno se asignaban algunas funciones de protección que debían ser estudiadas y explicadas a través de audio e imágenes por parte del estudiante, posteriormente luego de crear una serie de instrucciones con el material educativo, esto se enviaba al equipo de diseño y finalmente se creaba un curso con material audiovisual.



Las Figuras 36 y 37 muestran la portada del material audiovisual del curso de protecciones de sobre corriente disponibles en el portal de la empresa y que deberán realizar los asistentes técnicos de todas las centrales hidroeléctricas de la empresa.



Figura 35. Parte del video del curso de protecciones contra sobrecorrientes en generadores.



Figura 36. Parte del video del curso de protecciones contra sobrecorrientes en generadores.

En la Figura 37 se muestra una de las partes del video del curso para asistentes técnicos de las centrales hidroeléctricas de la empresa.



Figura 37. Parte del video del curso de protecciones contra sobrecorrientes en generadores.

### 5.12 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CARGA DE LA CENTRAL EN DIGSILENT:

Si bien la Central es de una capacidad instalada de 26 MW, pero por necesidades del sistema interconectado nacional y necesidades propias de la empresa se considera como una pequeña central hidroeléctrica, es así entonces que su despacho no puede superar los 20 MW.

Partiendo de la premisa anterior, los escenarios sugeridos para el análisis de flujo de carga fueron despachos máximos y mínimos de potencia activa y reactiva de acuerdo con la curva de capacidad de los generadores de la Central. La Figura 38 muestra la curva genérica obtenida en DIGSILENT para la simulación de los escenarios operativos.

En la Tabla 6 se muestra además los valores de potencia para el despacho de los generadores bajo el criterio explicado anteriormente. Con estos despachos se puede evidenciar que los resultados mostrados por las Tablas 7 y 8 muestra que ni los barrajes, subestación, tableros de servicios auxiliares, generadores y transformadores corren riesgo frente a un posible disparo indeseado por parte de los relés de protección ya que de acuerdo con la información proporcionada por los asistentes, las tensiones en los barrajes y equipos deben mantenerse dentro de  $\pm 10\%$  de su valor de tensión nominal y el criterio es no superar el 100% de carga en ningún

equipo, con esto se garantiza entonces la confiabilidad del sistema de protección bajo una operación normal de la Central.

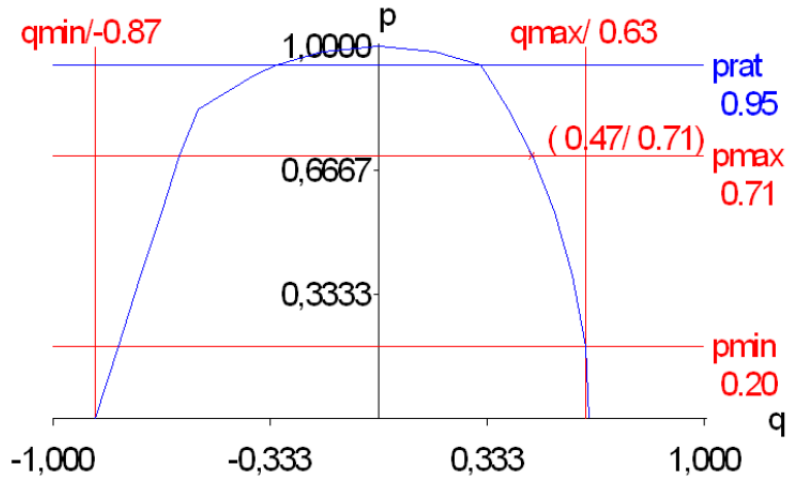


Figura 38. Curva de capacidad genérica de los generadores de la Central.

Tabla 6. Despachos de potencia activa y reactiva analizados

CARGA DE LA UNIDAD 1		CARGA DE LA UNIDAD 2	
P [MW]	Q [MVar]	P [MW]	Q [MVar]
2,58	-10,54	2,58	-10,54
2,58	8,37	2,58	8,37
9,34	-8,08	9,34	-8,08
9,34	6,23	9,34	6,23

En las Tablas 6 y 7 se muestran las tensiones en los nodos, barras y equipos principales de la Central, así como también los porcentajes de carga en los equipos.

En el caso de la red externa a 13,2 kV y la planta Diesel, no se evidencia resultados ya que no se disponen de estos equipos si no en condiciones de emergencia o críticas para el sistema, es decir son usados como respaldo en caso de que el transformador conectado a la barra de 13,8 kV quede fuera de servicio.

Tabla 7. Tensiones en nodos y barras con los dos generadores en operación.

ELEMENTO DEL SISTEMA	TENSIÓN EN LA RED [ <i>p. u</i> ]			
	$P_{m\acute{a}x}$ & $Q_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{a}x}$ & $Q_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{i}n}$ & $Q_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$ & $Q_{m\acute{i}n}$
Red 115 kV	0,9500	1,0500	0,9500	1,0500
Red 13, 2 kV	-	-	-	-
Generador 1	0,9841	1,0086	0,9946	0,9944
Generador 2	0,9842	1,0085	0,9946	0,9943
Planta Diesel	-	-	-	-
Barra 13, 8 kV	0,9840	1,0086	0,9945	0,9945
TD 0, 48 kV	0,9573	0,9817	0,9676	0,9677

Tabla 8. Porcentaje de carga en los equipos con las dos unidades de generación en servicio.

EQUIPO ELÉCTRICO	% DE CARGA DEL EQUIPO			
	$P_{m\acute{a}x}$ & $Q_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{a}x}$ & $Q_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{i}n}$ & $Q_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$ & $Q_{m\acute{i}n}$
Generador 1	85,1	93,6	66,4	82,2
Generador 2	85,1	93,6	66,4	82,2
Planta Diesel	-	-	-	-
TRF POTENCIA	68,5	74,0	52,9	66,3
TRF SAB 13,8 kV	74,9	73,8	74,4	74,4
TRF red 13,2 kV	-	-	-	-

## 6. ANÁLISIS:

Dentro de lo encontrado en campo, se pudo tener acceso fácil a la información, respecto de planos de la subestación, información física y virtual sobre las máquinas eléctricas, tableros de protección y las funciones activas en los mismos. En la Figura 38 se muestra uno de los tableros a los que se tuvo acceso en casa de máquinas de la Central.



Figura 39. Tablero de protección inspeccionado en casa de máquinas.

Las causas de las fallas dentro de todos los equipos a proteger pueden ser de diferente naturaleza, bien sea debido a fallas externas o internas dentro de la casa de máquinas, sin embargo, las usadas para la guía fueron tomadas de acuerdo a la experiencia de los operadores de la Central, quienes con sus largos años de trabajo han visto las causas comunes de fallas que fueron las usadas para la elaboración de la guía, los despejes de las fallas las pueden realizar desde la casa de máquinas los asistentes técnicos, en caso de que estos no tengan la competencia para la manipulación de los relés de protección, el grupo de protecciones de la empresa puede intervenir de manera remota todos los relés de la Central para poner en marcha lo más pronto posible el equipo fallado.

para una persona que haya estudiado Ingeniería Eléctrica o carreras a fin, la guía de acción rápida será una gran ayuda para comprender la mayoría de las funciones de protección usadas típicamente en las centrales de generación de energía eléctrica de manera hidráulica, si bien la guía no tiene en cuenta los criterios de cálculo, ajustes y/o normas técnicas nacionales e internacionales para realizar la coordinación de protecciones, será una primera aproximación a lo que es un esquema de protección eléctrica en la generación de electricidad, primera parte del sistema de potencia eléctrico, además se contará con el apoyo audiovisual del curso de protecciones eléctricas contra sobrecorrientes.

## 7. CONCLUSIONES:

Se realizó una guía de actuación rápida para afrontar los eventos de falla que activen las funciones de protección eléctrica disponibles en los relés de una Pequeña Central Hidroeléctrica de 26 MW mediante un procedimiento preciso con el que se busca identificar las posibles causas de fallas y se describen las actividades a realizar para determinar los efectos en los diferentes equipos dentro de la Central.

Todas las consideraciones y recomendaciones para la actuación contempladas en la guía de actuación rápida serán de gran apoyo y aprendizaje para todo el personal técnico de una Central de Generación Hidroeléctrica al momento de tomar decisiones cuando se presenten eventos anormales de operación o eventos de falla y que involucren las funciones de protección eléctrica de los relés.

Se complementa la guía de acción rápida con el material audiovisual para una mejor comprensión de los conceptos técnicos y un primer acercamiento a los estándares internacionales aplicables a las funciones de protección eléctrica, sin embargo, ante el disparo de una función de protección eléctrica será obligación realizar un profundo por parte del grupo de protecciones de la central.

La guía de acción rápida fue desarrollada de manera general, es decir podría aplicar para cualquier central hidroeléctrica con valores de generación similares o cercanos a los de la Central de estudio, así que los procedimientos de reacción ante el disparo de las funciones de protección eléctrica de los relés presentados en este trabajo pueden y deben ser profundizados para diferentes centrales de generación al considerar las particularidades de cada central, subestación y equipos eléctricos.

Dentro de los conocimientos adquiridos, se distinguen:

- Un gran progreso en el desarrollo e y proceso de investigación de un problema real de ingeniería.
- Fortalecimiento de habilidades comunicativas, compromiso, gestión del tiempo y autonomía de aprendizaje.

---

## 8. REFERENCIAS:

- [1] B. S. Guru y H. R. Hiziroglu, *Electric Machinery and Transformers*, New York: Oxford University Press, 2001.
- [2] L. L. Grigsby, *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*, London: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, 2012.
- [3] J. Das, *Power Systems Protective*, Georgia, USA: Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
- [4] F. H. Núñez Ramírez, *Centrales de Generación y Subestaciones Eléctricas*, Santo Domingo, República Dominicana: Universidad APEC, 2015.
- [5] IEEE Power Engineering Society, «IEEE Guide for AC Generator Protection». Power System Relaying Committee, 16 de febrero de 2007.
- [6] IEEE Power and Energy Society, «IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines». Power System Relaying Committee, 5 de diciembre de 2015.
- [7] IEEE Industry Applications Society, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*. New York USA: National Manufacturers Association, 2001.
- [9] Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society (2008). *IEEE Standard C37.2 Standard for Electrical Power System Device Function Numbers Acronyms and Contact Designations*.
- [10] *Guías para el Ajuste y la Coordinación de Protecciones del SIN*. Documento XM CND. Julio de 2018.
- [11] *Protección Multifuncional de Máquinas 7UM62*. SIPROTEC. Manual. V4.6 2006.