

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Implementación del relé de protección M-3425A y su
impacto en el OEE en equipos generadores de energía
ante perturbaciones de tensión y frecuencia
en empresas de generación eléctrica**

Kevin Josimar Gomez Condori

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Arequipa, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Alberto Sergio Tejada Rojas
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 13 de Mayo de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Implementación del relé de protección M-3425A y su impacto en el OEE en equipos generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia en empresas de generación eléctrica.

Autores:

1. Kevin Josimar Gomez Condori – EAP. Ingeniería Eléctrica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 16 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	11
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	11
1.1.1. Problema general.....	12
1.1.2. Problemas específicos	12
1.2. Objetivos	12
1.2.1. Objetivo general	12
1.2.2. Objetivos específicos.....	12
1.3. Justificación e importancia	13
1.4. Hipótesis.....	14
1.4.1. Hipótesis general	14
1.5. Operacionalización de variables.....	14
1.5.1. Variables.....	14
2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	16
2.1. Antecedentes del problema.....	16

2.1.1.	Antecedentes internacionales	16
2.1.2.	Antecedentes nacionales.....	18
2.2.	Bases teóricas	22
2.2.1.	Relés de protección	22
2.2.2.	Relé de protección M-3425A	23
2.2.3.	Overall Equipment Effectiveness	26
2.2.4.	Interpretación del OEE.....	30
2.2.5.	Perturbaciones en el sistema eléctrico	30
2.3.	Definición de términos básicos	36
3.	CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	38
3.1.	Métodos y alcance de la investigación	38
3.1.1.	Método General.....	38
3.1.2.	Método Específico.....	38
3.1.3.	Tipo de investigación	38
3.1.4.	Nivel de investigación	39
3.2.	Diseño de la investigación.....	39
3.3.	Población y muestra	39
3.3.1.	Población	39
3.3.2.	Muestra.....	39
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	40
3.4.1.	Técnicas de recolección de datos	40
3.4.2.	Materiales	40
3.4.3.	Procedimientos	41

3.5.	Consideraciones éticas	43
4.	CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1.	Diagnóstico de la eficiencia global de los equipos de la línea de generación de energía	44
4.2.	Comprobación del funcionamiento del relé M-3425A ante perturbaciones de tensión y frecuencia	62
4.2.1.	Configuración externa del equipo	62
4.2.2.	Configuración externa del equipo	66
4.2.3.	Realización de las pruebas de fallas	68
4.2.4.	Prueba de hipótesis	78
4.2.5.	Resultados	78
5.	CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
5.1.	Conclusiones	95
5.2.	Recomendaciones	95
	BIBLIOGRAFÍA	97
	ANEXOS.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables.....	15
Tabla 2 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 1	46
Tabla 3 OEE de los equipos de generación eléctrica: Mes 1	47
<i>Tabla 4 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 2.....</i>	<i>48</i>
Tabla 5 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 2.....	49
<i>Tabla 6 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 3.....</i>	<i>50</i>
Tabla 7 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 3.....	52
<i>Tabla 8 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 4.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 9 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 4.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 10 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 5.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 11 OEE de generación eléctrica: Mes 5.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 12 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 6.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 13 OEE de generación eléctrica: Mes 6.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 14 Consolidado del OEE de la línea de generación eléctrica: Diagnóstico.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 15 Resultados de las pruebas de falla</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 16 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 7.....</i>	<i>79</i>
Tabla 17 OEE de los equipos de generación eléctrica: Mes 7	81
Tabla 18 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 8	82
<i>Tabla 19 OEE de los equipos de generación eléctrica: Mes 8.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 20 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 9.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 21 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 9.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 22 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 10.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 23 OEE de generación eléctrica: Mes 10.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 24 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 11.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 25 OEE de generación eléctrica: Mes 11.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 26 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 12.....</i>	<i>91</i>

<i>Tabla 27 OEE de generación eléctrica: Mes 12.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 28 Resumen: Etapa previa a la instalación, etapa posterior a la instalación del relé de proyección M-3425A.....</i>	<i>93</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Indicadores OEE</i>	27
<i>Figura 2 Subtención transitoria</i>	32
<i>Figura 3 Brownout</i>	32
<i>Figura 4 Subtención</i>	33
<i>Figura 5 Sobretensión momentánea</i>	33
<i>Figura 6 Sobretensión</i>	34
<i>Figura 7 Armónicos</i>	35
<i>Figura 8 Perturbaciones de alta frecuencia</i>	36
<i>Figura 9 Bajada de frecuencia</i>	36
<i>Figura 10 Fases del procedimiento</i>	41
<i>Figura 11 Las Seis Grandes Pérdidas y su impacto en la Eficiencia Global de los Equipos</i> .	45
<i>Figura 12 Reconocimiento de entradas de tensión y corriente de medición y salidas</i>	62
<i>Figura 13 Conexiones del relé</i>	62
<i>Figura 14 TC de medición</i>	63
<i>Figura 15 TT de medición</i>	63
<i>Figura 16 Conexión RS-485 y mediciones de tensión.</i>	64
<i>Figura 17 Modelo VI usado según manual para la comprobación de nuestras fallas</i>	64
<i>Figura 18 Conexión del relé de protección de generador</i>	65
<i>Figura 19 Pasos para activar el relé</i>	66
<i>Figura 20 Método de comunicación del relé</i>	67
<i>Figura 21 Prueba de Generador conectado</i>	69
<i>Figura 22 Simulación de baja tensión (Subtención)</i>	69
<i>Figura 23 Baja tensión (Subtención) señal en relé</i>	70
<i>Figura 24 Baja tensión (subtención) en software</i>	70
<i>Figura 25 Subtención leds de aviso y alarmas</i>	71
<i>Figura 26 Conexión del sistema</i>	71

<i>Figura 27 Conexión del sistema Simulación de Sobretenión</i>	72
<i>Figura 28 Alta tensión (Sobretenión) señal en relé</i>	72
<i>Figura 29 Alta tensión (sobretenión) en software</i>	73
<i>Figura 30 Alta tensión (sobretenión) software y leds</i>	73
<i>Figura 31 Conexión simulación de Subfrecuencia</i>	74
<i>Figura 32 Frecuencia nominal</i>	74
<i>Figura 33 Simulación Subfrecuencia</i>	75
<i>Figura 34 Baja frecuencia (Subfrecuencia) señal en relé</i>	75
<i>Figura 35 Conexión de funcionamiento para prueba de falla de Sobretenión</i>	76
<i>Figura 36 Sobretenión</i>	76
<i>Figura 37 Sobretenión</i>	77
<i>Figura 38 Sobretenión Software y Leds</i>	77

RESUMEN

La industria y la minería desempeñan un papel crucial en el progreso nacional, albergando empresas dedicadas al bien común y la prestación de servicios vitales para la sociedad. Estas entidades dependen en gran medida de la energía eléctrica para su funcionamiento continuo, y aquellas que requieren una mayor cantidad de energía emplean generadores eléctricos para optimizar su producción. Sin embargo, la operación diaria de estos generadores enfrenta el riesgo de distorsiones energéticas y sobresaltos, lo que puede reducir su durabilidad y eficiencia con el tiempo, resultando en pérdidas significativas.

Para abordar este desafío, se introduce el estudio de un dispositivo de protección específico para los generadores, conocido como M-3425A, que proporciona diversas características y funcionalidades para garantizar la seguridad y fiabilidad de estos equipos. Este dispositivo ofrece una solución que se adapta perfectamente a la creciente demanda de automatización en la industria minera y manufacturera, presentando una alternativa invaluable que aborda las necesidades actuales del sector de manera efectiva.

El OEE es una métrica crucial que evalúa la eficiencia global de los equipos, incluyendo factores como disponibilidad, rendimiento y calidad. Al realizar pruebas de simulación de perturbación en el generador G-3425A y analizar cómo responde el relé de protección M-3425A a cada escenario, se obtiene una visión detallada del impacto de estas perturbaciones en el OEE del generador.

Este enfoque permite identificar áreas de mejora específicas para optimizar el rendimiento y la fiabilidad del generador. Al comprender cómo el dispositivo de protección interactúa con diferentes tipos de perturbaciones, se pueden implementar ajustes y mejoras para aumentar la disponibilidad del generador, mejorar su rendimiento y garantizar una mayor calidad en la producción. En última instancia, esta integración entre el dispositivo de protección y el análisis del OEE proporciona una herramienta invaluable para maximizar la eficiencia operativa y reducir las pérdidas en la industria y la minería.

ABSTRACT

Industry and mining play a crucial role in national progress, hosting enterprises dedicated to the common good and providing vital services to society. These entities rely heavily on electrical power for their continued operation, and those that require a greater amount of energy employ electrical generators to optimize their output. However, the daily operation of these generators faces the risk of power distortions and disturbances, which can reduce their durability and efficiency over time, resulting in significant losses.

To address this challenge, the study of a specific protection device for generators, known as M-3425A, is introduced, which provides several features and functionalities to ensure the safety and reliability of this equipment. This device offers a solution that is perfectly suited to the growing demand for automation in the mining and manufacturing industry, presenting an invaluable alternative that effectively addresses the current needs of the sector.

OEE is a crucial metric that evaluates the overall efficiency of equipment, including factors such as availability, performance and quality. By performing disturbance simulation tests on the G-3425A generator and analyzing how the M-3425A protection relay responds to each scenario, a detailed view of the impact of these disturbances on the OEE of the generator is obtained.

This approach allows the identification of specific areas of improvement to optimize generator performance and reliability. By understanding how the protection device interacts with different types of disturbances, adjustments and improvements can be implemented to increase generator availability, improve performance and ensure higher output quality. Ultimately, this integration between protection device and OEE analysis provides an invaluable tool to maximize operational efficiency and reduce losses in industry and mining.

INTRODUCCIÓN

En el capítulo I, está el planteamiento de investigación, donde se explica el problema desde una perspectiva internacional y nacional. Además, se formularon los problemas a nivel general y específico. Seguidamente, se presentan los objetivos generales y específicos, junto con sus argumentos. También la hipótesis general y las hipótesis específicas, las cuales son fundamento para describir y operacionalizar las variables.

En el capítulo II, se desarrolló el marco teórico tomando en cuenta antecedentes a nivel internación y nacional, asimismo se incluyó bases teóricas para respaldar y fundamentar las variables, identificando también los términos clave y definiéndolos individualmente.

En el capítulo III está la metodología, abordando aspectos como el método, tipo, alcance, diseño y enfoque de la investigación. Además, se describía la población y muestra con sus características. Se detalló los procedimientos incluyendo los métodos de recolección de datos, las herramientas utilizadas y los aspectos éticos implicados.

En el capítulo IV se describe las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó cualitativamente a raíz del análisis y verificación de los objetivos.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

En el contexto empresarial actual, maximizar la eficiencia operativa es fundamental para asegurar el éxito a largo plazo. Las empresas de generación eléctrica se encuentran confrontando desafíos en la gestión de sus equipos eléctricos, especialmente en lo que respecta a sus generadores de energía, debido a perturbaciones eléctricas, tanto de corta como de larga duración, que afectan la tensión y la frecuencia.

Con el propósito de abordar estos desafíos, se está considerando la implementación del Relé de protección M-3425A. Este estudio de investigación se enfocará en analizar cómo esta implementación impacta en el Índice de Efectividad General del Equipo (OEE) en la empresa, centrándose en las causas de las perturbaciones y el efecto del relé en la calidad, disponibilidad y rendimiento de los generadores de energía.

Nuestro enfoque inicial consistirá en plantear el problema de cómo llevar a cabo pruebas de simulación para analizar las perturbaciones y desviaciones que podrían causar graves daños en los generadores de energía, superando los límites establecidos por la norma IEEE Guide for AC Generator Protection. Este análisis nos permitirá observar el tipo de protección que proporciona el mencionado relé, con el objetivo de verificar su eficacia en el funcionamiento del sistema.

Para llevar a cabo estas pruebas de simulación de manera efectiva, se requerirá una metodología detallada que incluya la selección de las variables eléctricas a monitorear, la definición de los escenarios de perturbación a simular y la evaluación de los resultados obtenidos. Además, será crucial considerar la configuración óptima del Relé de protección M-3425A, así como su integración con los sistemas existentes de monitoreo y control de los generadores de energía.

Una vez completadas las pruebas de simulación, se procederá a analizar los datos recopilados para determinar el impacto del relé en la mitigación de las perturbaciones eléctricas y su efecto en el OEE de los generadores de energía. Este análisis permitirá identificar posibles áreas de mejora en la gestión de equipos eléctricos en empresas de generación eléctrica y proporcionará recomendaciones para optimizar su eficiencia operativa y maximizar su rendimiento a largo

plazo.

1.1.1. Problema general

¿Cuál es el impacto la implementación del Relé de protección M-3425A en el OEE en generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia en empresas de generación eléctrica?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las causas específicas de las perturbaciones de tensión y frecuencia en generadores de energía en empresas de generación eléctrica?
- ¿Cómo impacta la implementación del relé M-3425A ante perturbaciones de sub tensión para asegurar la calidad de generadores de energía en empresas de generación eléctrica?
- ¿Cómo impacta la implementación del relé M-3425A ante perturbaciones de sobre tensión para asegurar la disponibilidad de generadores de energía en empresas de generación eléctrica?
- ¿Cómo impacta la implementación del relé M-3425A ante perturbaciones de sub frecuencia para asegurar el rendimiento de generadores de energía en empresas de generación eléctrica?
- ¿Cómo impacta la implementación del relé M-3425A ante perturbaciones de sobre frecuencia para asegurar la calidad de generadores de energía en empresas de generación eléctrica?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Implementar el relé de protección M-3425A y determinar su impacto en el OEE en generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia en empresas de generación eléctrica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar la eficiencia global de los equipos de la línea de generación de energía en las empresas de generación eléctrica.
- Comprobar el funcionamiento del relé M-3425A ante perturbaciones de tensión y

frecuencia a fin de asegurar la eficiencia global de los generadores de energía en empresas de generación eléctrica.

- Verificar la eficiencia global de los equipos con la implementación del relé de protección M-3425A en los generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia en empresas de generación eléctrica

1.3. Justificación e importancia

Respecto a la justificación práctica, a implementación del relé M-3425A para abordar perturbaciones específicas en los generadores de energía en empresas de generación eléctrica, es fundamental para garantizar la continuidad operativa y la integridad de los sistemas eléctricos. Las perturbaciones de tensión y frecuencia, como las de sub tensión, sobre tensión, baja tensión y sobre tensión, pueden provocar daños significativos en los generadores de energía, lo que a su vez podría resultar en interrupciones costosas en la producción, tiempos de inactividad prolongados y posiblemente incluso riesgos para la seguridad de los trabajadores. Al implementar el relé M-3425A, se establece una estrategia proactiva para detectar y mitigar estas perturbaciones de manera oportuna, lo que contribuye directamente a mantener la operatividad y la fiabilidad de los generadores de energía en la industria.

Respecto a la justificación metodológica, la implementación del relé M-3425A se basa en un enfoque sistemático y técnico para abordar las diferentes causas de perturbaciones de tensión y frecuencia en los generadores de energía. Este relé está diseñado específicamente para monitorear y proteger contra variaciones en la tensión y la frecuencia eléctrica, ofreciendo una solución integral para proteger los sistemas contra sub tensión, sobre tensión, baja tensión y sobre tensión. Además, la configuración y ajustes del relé pueden adaptarse según las necesidades específicas en empresas de generación eléctrica, permitiendo una implementación personalizada que maximiza la efectividad de la protección eléctrica.

Respecto a la justificación económica, la implementación del relé M-3425A representa una inversión rentable a largo plazo para la empresa. Si bien puede implicar costos iniciales asociados con la adquisición e instalación del equipo, estos gastos se ven compensados por los ahorros derivados de la prevención de daños en los generadores de energía, la reducción de

tiempos de inactividad no planificados y la prolongación de la vida útil de los activos. Además, al evitar interrupciones en la producción y posibles pérdidas de ingresos, la implementación del relé M-3425A contribuye a mejorar la eficiencia operativa y la competitividad de la empresa en el mercado.

Respecto a la justificación ambiental, la implementación del relé M-3425A también tiene beneficios significativos en términos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental. Al proteger los generadores de energía contra perturbaciones de tensión y frecuencia, se reduce la probabilidad de incidentes que podrían resultar en fugas de sustancias peligrosas, emisiones nocivas o impactos ambientales negativos. Además, al garantizar un funcionamiento más eficiente de los generadores de energía, se puede reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático y a la preservación de los recursos naturales. En resumen, la implementación del relé M-3425A no solo protege los activos en empresas de generación eléctrica, sino que también respalda sus objetivos de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Ho: La implementación del Relé de protección M-3425A no va a tener un impacto significativo en el OEE en generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia en empresas de generación eléctrica.

Ha: La implementación del Relé de protección M-3425A va a tener un impacto significativo en el OEE en generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia en empresas de generación eléctrica.

1.5. Operacionalización de variables

1.5.1. Variables

V₁: Implementación del relé de protección M-3425A

V₂: OEE de generadores de energía

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
V1: Implementación del relé de protección M- 3425A	Proceso de instalar y configurar este dispositivo como parte de las medidas de seguridad y control en una instalación.	Especificación de los ajustes de configuración y pruebas a simular ante cualquier escenario como lo pueden ser las perturbaciones de tensión y frecuencia.	Tensión	Sobre tensión	Nominal
				Sub tensión	
			Frecuencia	Sobre frecuencia	
				Sub frecuencia	
V2: OEE de generadores de energía	Indicador que mide la eficiencia global de los equipos teniendo en cuenta factores como el tiempo de funcionamiento, la velocidad y la calidad.	El cálculo de OEE específicamente para los generadores de energía, esto implica determinar las métricas exactas que utilizaremos (como tiempo de disponibilidad, rendimiento y calidad).	Disponibilidad	Tiempo operativo / Tiempo planificado	
			Rendimiento	Tiempo de funcionamiento / Tiempo operativo	
			Calidad	Tiempo productivo / Tiempo de funcionamiento	

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes internacionales

Morán et al. en “Modelamiento y simulación del conjunto disyuntor principal de potencia - relé de protección (CB-R) de una subestación eléctrica de distribución” expone la representación y emulación de un mecanismo de seguridad compuesto por el sistema de desconexión de energía CB - relé de protección diferencial utilizando el entorno Simulink de Matlab. El modelo ha sido construido incorporando información empírica proveniente de una red eléctrica real. Se han tomado en cuenta aspectos físicos como el aumento de la capacidad aislante del medio en el interruptor y la recuperación de la tensión transitoria, los cuales son esenciales para apagar el arco eléctrico. Además, se ha definido una región de seguridad para el transformador de potencia delimitada por los transformadores de corriente, demostrando que la resolución de las fallas eléctricas está directamente vinculada al comportamiento de los elementos físicos relacionados con el CB. Los gráficos generados a partir de la simulación de múltiples eventos de fallo muestran cómo las corrientes de cortocircuito interactúan con la curva característica del relé diferencial y los aspectos internos del interruptor durante condiciones de fallo hasta su posible resolución. Finalmente, tras evaluar el modelo, se concluye que la velocidad de aumento de la capacidad aislante influye en la extinción del arco, y si no se encuentra dentro de los valores normales de operación, podría producirse un fenómeno llamado reignición del arco, afectando los dispositivos del sistema de energía al no resolver las fallas y seguir conduciendo corrientes de cortocircuito elevadas (1).

Becerra en “Estrategia de detección e identificación de fallas eléctricas para sistemas de distribución eléctrica con generación distribuida basado en redes neuronales artificiales” hace referencia que con el aumento de la población, las compañías proveedoras de electricidad necesitan ofrecer servicios de alto nivel a todos los usuarios, lo que implica un crecimiento significativo en la red de distribución. Sin embargo, esta expansión conlleva riesgos de daños en la infraestructura y posibles fallos. Además, la adopción de la generación distribuida puede

confundir los sistemas convencionales de detección de fallos, generando diagnósticos erróneos. Por lo tanto, uno de los principales retos para estas empresas es detectar y diagnosticar eficazmente los fallos en la red, especialmente en presencia de generación distribuida. Esta investigación presenta una estrategia para identificar y localizar fallos eléctricos en sistemas de distribución que incluyen generación distribuida. La propuesta se basa en algoritmos de inteligencia artificial, específicamente en Redes Neuronales Artificiales. La eficacia de este enfoque se validó utilizando el software Simulink Matlab/Simulink, que permitió obtener patrones claros para identificar fallos (2).

Hernández et al. en “Detección y diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de potencia (SEP) combinando lógica difusa, métricas y una red neuronal probabilística” parte identificando que en diversas áreas industriales, la identificación y evaluación de problemas juega un papel crucial debido a la complejidad de los sistemas utilizados en los procesos actuales. Esta complejidad surge de la multitud de variables involucradas en dichos procesos, lo que dificulta su supervisión. Para abordar esta dificultad, se emplean técnicas de inteligencia artificial para mejorar la eficacia del diagnóstico y detección de fallas. Este artículo se enfoca en desarrollar un sistema que pueda identificar y diagnosticar problemas en sistemas complejos utilizando datos históricos. Se aplica esta metodología al monitoreo de un sistema eléctrico de potencia propuesto por la IEEE. La metodología consta de dos fases: la detección de fallas mediante lógica difusa y el diagnóstico final mediante la comparación de frecuencias utilizando la distancia Euclidiana. Estos diagnósticos se clasifican mediante una red neuronal probabilística para obtener un sistema confiable. La sección 2 introduce el problema y revisa literatura relevante, la sección 3 describe las herramientas matemáticas empleadas, la sección 4 presenta el caso de estudio, la metodología y la evaluación de técnicas utilizadas, y finalmente, la sección 6 ofrece las conclusiones (3).

Vásquez en “Análisis y simulación de las protecciones eléctricas del generador de la Central Hidroeléctrica 15 de septiembre” se detalla el proceso llevado a cabo en la investigación y simulación de dicho documento, donde se efectuó un análisis de diversas fuentes que contienen datos relacionados con las salvaguardias utilizadas para el funcionamiento eficiente y óptimo de los generadores eléctricos. Dentro de este informe se recopila información sobre las salvaguardias

eléctricas para los generadores sincrónicos, ya que estos son empleados en las centrales hidroeléctricas, siendo una base sólida para la parte teórica el Tutorial de la IEEE de Salvaguardias de Generadores Sincrónicos, el cual ofrece una amplia gama de información esencial para comprender la estructura de un generador eléctrico sincrónico, los modelos de cortocircuito del generador basados en componentes simétricas, las prácticas de puesta a tierra comúnmente utilizadas para los generadores eléctricos, así como las salvaguardias eléctricas, entre otros aspectos. Asimismo, se consultaron fuentes bibliográficas y documentos de tesis relacionados con el tema en cuestión. El informe detalla los ajustes realizados en las salvaguardias del generador de la central, así como los ajustes de las salvaguardias del sistema de respaldo disponible. Se presentan también los diagramas de las salvaguardias eléctricas de los dos generadores presentes en la central hidroeléctrica, junto con un registro de rendimiento de las salvaguardias para el año 2019, información proporcionada por el personal de Grupo CEL destacado en la Central Hidroeléctrica 15 de septiembre, datos cruciales para la elaboración de este informe. Para las simulaciones, se utilizó el software ETAP en su versión 19.0.1, en el cual se llevó a cabo una simulación simplificada de la central hidroeléctrica. Esta simulación incluyó la introducción de datos de los equipos según las placas de características correspondientes, así como la suma de las cargas internas de la central proporcionadas por el personal de CEL. Se realizó una simulación del análisis de corrientes de cortocircuito en cada bus de potencia del circuito de la central, así como una simulación del análisis de flujo de potencia. Además, se simularon las salvaguardias eléctricas del generador utilizando las capacidades del software, mostrando gráficos de corriente contra tiempo para algunas salvaguardias y activación de las salvaguardias eléctricas para otras. (4).

2.1.2. Antecedentes nacionales

Bernaola en “Configuración y regulación de relé de protección para arrancador síncrono en planta de procesos” en su informe trata sobre la práctica adquirida en la Compañía de Minas Buenaventura, específicamente sobre la configuración y ajuste del dispositivo de protección para iniciar un motor de molino de bolas de forma sincronizada. Se explican los antecedentes del problema, sus impactos en la planta de procesamiento, las posibles soluciones propuestas, la

elección de la solución y sus fundamentos. Además de los antecedentes, se presenta la teoría que respalda la configuración y ajuste del dispositivo de protección. Tras la aprobación del proyecto, se llevó a cabo su implementación, respaldada por evidencia fotográfica. También se mencionan otras actividades profesionales realizadas, donde se aplicaron los conocimientos universitarios en electrónica de potencia, sistemas eléctricos, líneas de transmisión y redes de distribución. Finalmente, se resumen los resultados y conclusiones previstos después de la implementación (5).

Murillo en “Protección con ajustes de los relés para obtener alta confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia” indica que las compañías industriales en la actualidad emplean sistemas eléctricos de poder en sus operaciones comerciales e industriales, utilizando métodos de control tradicionales que carecen de evaluaciones de seguridad en la coordinación de la protección, sin ajustes a las necesidades de sus cargas. Este estudio presenta el uso de equipos modernos construidos con tecnología actualizada, esenciales para garantizar sistemas eléctricos industriales seguros, particularmente en sectores como manufactura y minería, donde la fiabilidad es crucial. Se modela inicialmente el sistema eléctrico utilizando resistencias e inductancias, sobre el cual se realiza un estudio de coordinación de protecciones para asegurar niveles aceptables de corriente, tensión y frecuencia nominales. Estos principios se aplican en las instalaciones de RST INGENEIRORS S.A.C. en la zona industrial Macropolis del distrito de Lurín, Lima. Los relés utilizados cumplen con las normativas de IEEE Std C37. 2 1996, y se integran con otras funciones según las necesidades de las máquinas para su control y protección. Para alcanzar estos resultados, se emplean sistemas de comunicación modernos totalmente automatizados, manteniendo altos niveles de autonomía, seguridad y fiabilidad en el sistema eléctrico (6).

Calderón en “Análisis de calibración de los relés para mejorar el sistema de protección de configuración en anillo de la mina” tomó como propósito de esta investigación examinar el ajuste de los dispositivos de seguridad para mejorar la configuración de protección en la red eléctrica de la mina. Se clasifica como investigación aplicada, ya que busca resolver problemas reales, con un diseño cuasi experimental. La población y muestra consisten en el sistema eléctrico de la mina. Se utilizó recursos digitales para la recolección de datos, con un análisis que incluyó recolección, procesamiento y presentación de resultados. La conclusión principal aboga por la implementación

de una lógica selectiva basada en comunicaciones mediante el uso de mensajería GOOSE, para reducir los tiempos de respuesta de las protecciones sin comprometer su operatividad selectiva, asegurando así la seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico de la distribución de energía en la mina a cielo abierto (7).

Velarde en “Estudio de las perturbaciones armónicas en la calidad de energía eléctrica en la Universidad de Piura - campus Lima” tuvo como meta explorar la parte conceptual relacionada con las fluctuaciones eléctricas, técnicas de evaluación, reglamentos, influencias y contrarresto de armónicos, que surgen tras la implementación de mejoras en los dispositivos electrónicos de potencia, con el propósito de potenciar su eficacia y autonomía, haciéndolos más avanzados. Dichas fluctuaciones armónicas perturban el desempeño de otros dispositivos de menor potencia. Las regulaciones son aplicadas en uno de los sitios de la Universidad de Piura - Sede Lima, específicamente en el Bloque Administrativo, un lugar con una elevada producción de armónicos que son transmitidos a la red, tales como variadores de frecuencia, reguladores, UPS, estabilizadores, dispositivos electrónicos (teléfonos móviles, computadoras portátiles, cajeros automáticos). Para detectar los armónicos presentes en la red, se empleará un medidor de energía, el cual se basa en la transformada discreta de Fourier para determinar la intensidad de los armónicos. La instalación del aparato usualmente se lleva a cabo en un punto de conexión común (PCC), del cual se derivan los subcircuitos. Después de realizar las mediciones, los resultados son analizados y comparados con las regulaciones para verificar si están dentro de los límites establecidos. El análisis realizado por el medidor de energía indica que el armónico de tensión más destacado es del 2.38% para el quinto orden, y de acuerdo con la Norma Técnica de Calidad de los Sistemas Eléctricos (NTCSE) se halla dentro de los límites, al ser inferior al 5%. En cuanto a los armónicos de corriente, la NTCSE no los considera, por lo que se apela a la norma internacional IEEE 519, la cual relaciona la corriente máxima de cortocircuito con la corriente de demanda máxima de carga. Según las lecturas, no se cumple con esta normativa, presentando valores de 18.05%, 27.21% y 13.69% en los armónicos 3, 5 y 7, respectivamente, y valores de 6.126% y 8.701% para los armónicos 11 y 13, respectivamente. Se sugiere el uso de filtros activos, ya que se adaptan mejor a esta situación debido a la cantidad de armónicos significativos. Se

procede a elegir los filtros comerciales que mejor se ajusten al sistema, realizando un análisis de costos y beneficios, con el fin de reducir las perturbaciones por debajo de los límites establecidos. Se concluye que tener un seguimiento periódico de los armónicos presentes en la red permite contar con una base de datos sobre la evolución de los armónicos a lo largo del tiempo, para así reconocer la tendencia de los armónicos significativos y anticipar los posibles efectos en los dispositivos a corto, mediano y largo plazo. Los medidores de energía no solo miden los armónicos sino también la potencia, energía, entre otros; la información recopilada sería útil también para la gestión de la red (8).

Ramírez-Murillo et al. en “Metodología de diagnóstico de perturbaciones en la calidad de potencia usando la Transformada S” este informe presenta un enfoque denominado Transformación S para examinar las variaciones en el tiempo y la frecuencia de diversas irregularidades en sistemas eléctricos de potencia. Estas irregularidades, en su mayoría transitorias y de breve duración, surgen debido a las características de la red eléctrica y las cargas conectadas por los usuarios. Identificar todas las formas de irregularidades en la calidad de energía incrustadas en las señales de corriente y tensión es crucial para comprender las causas de fallos y mal funcionamiento en dispositivos de medición, protección y control en las redes eléctricas. Una característica destacada de la Transformación S es su capacidad para combinar una resolución en frecuencia dependiente del tiempo con información completamente relacionada con la fase local, lo que permite definir la fase en un espectro local. Además, presenta una respuesta de amplitud constante en frecuencia, a diferencia de otras transformadas como la Wavelet y la Transformada de Fourier de Tiempo Corto. Para ilustrar su eficacia, se simularán varios escenarios utilizando el software PSCAD, incluyendo el arranque y la operación de motores, fallas de línea a tierra, armónicos de secuencia cero en cargas trifásicas balanceadas, cargas trifásicas desbalanceadas, señales con muescas y componentes de alta frecuencia (9).

Betancourt en “Análisis de la trayectoria de la impedancia de falla vista por el relé de distancia en sistemas eléctricos ante oscilaciones de potencia”, identifica que los rechazos y entradas de grandes bloques de carga, abruptas desconexiones de líneas, ingresos y rechazos de centrales generadoras ocasionan perturbaciones en el flujo de potencia. Estas perturbaciones provocan

cambios en los ángulos de las máquinas síncronas, generando oscilaciones de potencia. Estas oscilaciones pueden tener un impacto devastador en los sistemas eléctricos, revelando vulnerabilidades en sistemas grandes. Por lo tanto, es necesario aislar los sistemas oscilantes para preservar la estabilidad del resto del sistema eléctrico. Las oscilaciones de potencia también pueden interferir con las zonas de protección de los relés de distancia, ya que las ondas a diferentes frecuencias alteran las magnitudes de tensión y corriente, lo que puede llevar a la apertura errónea de las líneas de transmisión. Los relés de protección de distancia están programados para responder a eventos oscilatorios, utilizando una función que analiza la trayectoria de la impedancia y decide bloquear o abrir las líneas eléctricas de transmisión en consecuencia. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es examinar las oscilaciones de potencia cuando el centro de la oscilación del sistema eléctrico está en la línea de transmisión y cómo se comporta la trayectoria de la impedancia cuando entra en la zona de protección del relé de distancia, utilizando simulaciones de laboratorio (10).

Encala y Tonata en “Coordinación de protecciones en sistemas eléctricos de distribución, mediante el uso de Relés SEL-751” identifica que los sistemas eléctricos de distribución, junto con otros sistemas similares, está vulnerable a fallos eléctricos. Por lo tanto, la coordinación de protección se emplea para garantizar que cualquier fallo que ocurra pueda ser mitigado mediante la activación de dispositivos de protección como relés, fusibles o una combinación de ambos. En este proyecto, se empleó el Relé SEL-751 como sistema de protección, mientras que el equipo Omicron CMC 356 se utilizó para simular fallos en el sistema eléctrico (11).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Relés de protección

El dispositivo de protección es un artefacto eléctrico diseñado para reaccionar ante señales de entrada predefinidas y, una vez cumplidas, provocar un cambio repentino en los circuitos eléctricos conectados. Estas señales de entrada pueden ser eléctricas, mecánicas o térmicas. El propósito principal de los dispositivos de protección es detectar fallos en el sistema y desconectar rápidamente el elemento afectado para reducir los efectos adversos de un fallo eléctrico. Aunque

no pueden prevenir los fallos, pueden minimizar sus efectos. Los dispositivos de protección deben poseer las siguientes características: fiabilidad, que asegura su funcionamiento cuando es necesario (dependabilidad) y evita que opere cuando no es necesario (seguridad); selectividad, que permite identificar el equipo afectado y desconectar solo ese componente; sensibilidad, para operar con los mínimos valores de fallo; rapidez, para actuar lo más rápido posible y evitar daños mayores o pérdidas de estabilidad; simplicidad, en su construcción, diseño y circuitería asociada para cumplir los objetivos del sistema de protección; y economía, garantizando la máxima protección a un costo razonable (12).

2.2.2. Relé de protección M-3425A

El Beckwith Electric M-3425A es un dispositivo digital utilizado para las salvaguardias eléctricas del generador. Es un relé de protección integral diseñado para garantizar el correcto funcionamiento y la seguridad de los generadores eléctricos. Este dispositivo ofrece una serie de características y funciones específicas para proteger el generador contra diversas condiciones adversas, cumpliendo con los estándares y requisitos establecidos por organizaciones como el IEEE y la IEC. Además, proporciona opciones adicionales para mejorar la configuración y el monitoreo del sistema eléctrico, como la conexión Ethernet, la protección contra fallas a tierra y la ampliación de entradas y salidas. Algunas de las características que presenta esta salvaguardia integral para generadores son: Supera los requisitos IEEE C37.102 y la Norma 242 para salvaguardia de generador. Protege generadores de cualquier tipo de motor primario, conexión o tierra. Ofrece las funciones principales de salvaguardia para proteger el generador, incluyendo Fuera de Paso (78), Diferencial de Fase de Arranque (50DT), Acumulación de Tiempo de Baja Frecuencia (81A), Energización Inadvertida (50/27) y Detección de Falla Espira-Espira (59X). El Programa de Comunicación IPScom® Expandido facilita una configuración y ajuste sencillo y lógico, incluyendo los esquemas lógicos. Fácil aplicación con opciones de salvaguardia Básica y Completa. Dispositivos de protección contra sobrecargas y bloqueo por oscilaciones de potencia para garantizar la protección de respaldo del sistema (21) y mejorar la seguridad en condiciones anómalas del sistema. Opciones adicionales: Conexión Ethernet, Protección de Tierra en el Campo/Escobillas Sueltas (64F/B), Verificador de Sincronización (25), Protección contra Falla a

Tierra en el 100% del Estator mediante Inyección de Baja Frecuencia (64S) y Ampliación de E/S (15 Contactos de Salida adicionales y 8 Entradas de Control/Estado adicionales) (4).

El relé de protección para generadores M-3425A es apropiado para generadores de todo tamaño y tipo de máquina prima, ya que proporciona una amplia gama de funciones de protección diseñadas para garantizar la seguridad y la integridad de los sistemas eléctricos. Con su capacidad para proteger contra diversas condiciones, como sub tensión, sobre tensión, baja frecuencia y sobre frecuencia, así como su capacidad de adaptación a diferentes esquemas de protección, el M-3425A es una solución versátil y confiable para la protección de generadores en una variedad de aplicaciones industriales. Su diseño robusto y su facilidad de configuración lo convierten en una opción ideal para garantizar el rendimiento óptimo y la protección efectiva de los generadores de energía y más allá (13).

El sistema unificado de salvaguarda M-3425A facilita salvaguarda, control, vigilancia y funciones de enlace con el usuario para la protección de generadores. Las señales registradas y las gráficas de oscilación pueden ser sincronizadas utilizando un puerto IRIG-B. Dispone de puertos RS-232 dobles y un puerto RS-485 que brinda capacidades de interacción con el usuario. Se incluye el software M-3820dD IPScm para acceso directo serial o comunicaciones a distancia. Los datos de la forma de onda pueden ser descargados (Formato comtrade). Los módulos opcionales abarcan la interfaz de usuario para la operación desde el panel frontal, el módulo de señalización para indicar el estado de activación de señales, así como la fuente de energía redundante, y un botón para borrar todas las señales. El sistema de salvaguarda multifuncional Beckwith M-3425, permite resolver fallos en el sistema tales como: sobre corriente del generador, frecuencia máxima, frecuencia mínima, tensión máxima, tensión mínima, potencia inversa, y muchos más parámetros que se activarán para resguardar al generador, medidos desde el lado del neutro, enviando una señal mediante contactos hacia el interruptor principal del generador y el solenoide de la válvula principal de la turbina para salvaguardar el equipo poniéndolo fuera de servicio. Facilita la apertura del interruptor principal y el cierre de la válvula. El Beckwith M-3425 A, además, mide parámetros eléctricos como la corriente de fase, y permite determinar demandas máximas del mismo día, del día anterior y desde el último reset. El interruptor de potencia

resguarda al generador contra sobrecargas, y desconecta al generador en caso de fallo. La bobina de activación del interruptor de potencia está conectada al contacto de activación del Relé (12).

2.2.2.1. Funciones de protección – base

Este paquete incluye las funciones primordiales de protección para generadores, superando las normativas IEEE C37.102 y el Estándar 242. Ofrece protección contra diversas condiciones, como sub tensión, sobre tensión y baja tensión, mediante funciones como Fuera de Paso (78), Diferencial de Fase Partida (50DT), y Energización Inadvertida (50/27), entre otras. El software de comunicación IPSCOM, facilita la programación y ajuste del sistema de forma lógica, y se adapta a diferentes esquemas. Además, proporciona características estándar como ventanas de invasión de carga y bloqueo por oscilaciones de potencia para mejorar la seguridad en situaciones anormales, con opciones adicionales disponibles como conexión Ethernet y protección de tierra en el campo (13).

2.2.2.2. Funciones de protección – completo

Este paquete incluye todas las funciones del paquete base y se complementa con características adicionales, como tres zonas de protección de distancia de fase para respaldo de perturbaciones de fase, protección de 100% de falla a tierra del estator, sobrecarga del estator y funciones de baja tensión. Asimismo, ofrece opciones para verificador de sincronismo, protección de tierra en el campo y escobillas sueltas, y protección 100% de tierra en el estator mediante inyección de baja tensión. Se ofrecen funciones opcionales para satisfacer necesidades específicas, como verificador de sincronismo con ángulo de fase, protección de tierra en el campo y escobillas sueltas, y protección 100% de tierra en el estator mediante inyección de baja tensión. Para estas funciones, se requieren equipos adicionales, como generador de señal de 20 Hz, filtro pasa-bandas y transformadores de corriente. Y elección de baja tensión, entre otras (13).

2.2.2.3. Funciones de protección opcional

Estas funciones ofrecen flexibilidad adicional para adaptarse a requisitos específicos del sistema eléctrico. Incluyen el verificador de sincronismo con ángulo de fase, protección de tierra en el campo y escobillas sueltas, y protección 100% de tierra en el estator mediante inyección de baja

tensión. Para estas funciones opcionales, se requieren equipos adicionales, como generador de señal de 20 Hz, filtro pasa-bandas y transformadores de corriente. Estas opciones permiten una personalización más amplia del sistema de protección de generador para satisfacer las necesidades particulares en empresas de generación eléctrica (13).

2.2.2.4. Características estándar y opcionales

Las características estándar incluyen múltiples salidas y entradas programables, registrador de oscilografía, almacenamiento de eventos, protocolos de comunicación, diseño de montaje en rack estándar, y opciones para 50 y 60 Hz, entre otros. Por otro lado, las características opcionales comprenden fuentes de alimentación redundantes, módulos de tarjetas adicionales, interfaz hombre-máquina, puertos Ethernet, software de análisis de oscilografía, y expansión de entradas y salidas, ofreciendo flexibilidad y adaptabilidad según las necesidades del sistema eléctrico (13).

2.2.3. Overall Equipment Effectiveness

El **OEE (Overall Equipment Effectiveness)** es un indicador crucial para medir la productividad en la fabricación de máquinas en cualquier industria. Nos permite identificar qué período del tiempo total de fabricación es realmente productivo en cada uno de los equipos que conforman la línea de producción. Sin embargo, el OEE se centra exclusivamente en las máquinas y su eficiencia (14).

Es un indicador expresado en forma porcentual que mide la eficiencia global productiva de una máquina, planta industrial o proceso específico. Su cálculo considera tres parámetros fundamentales:

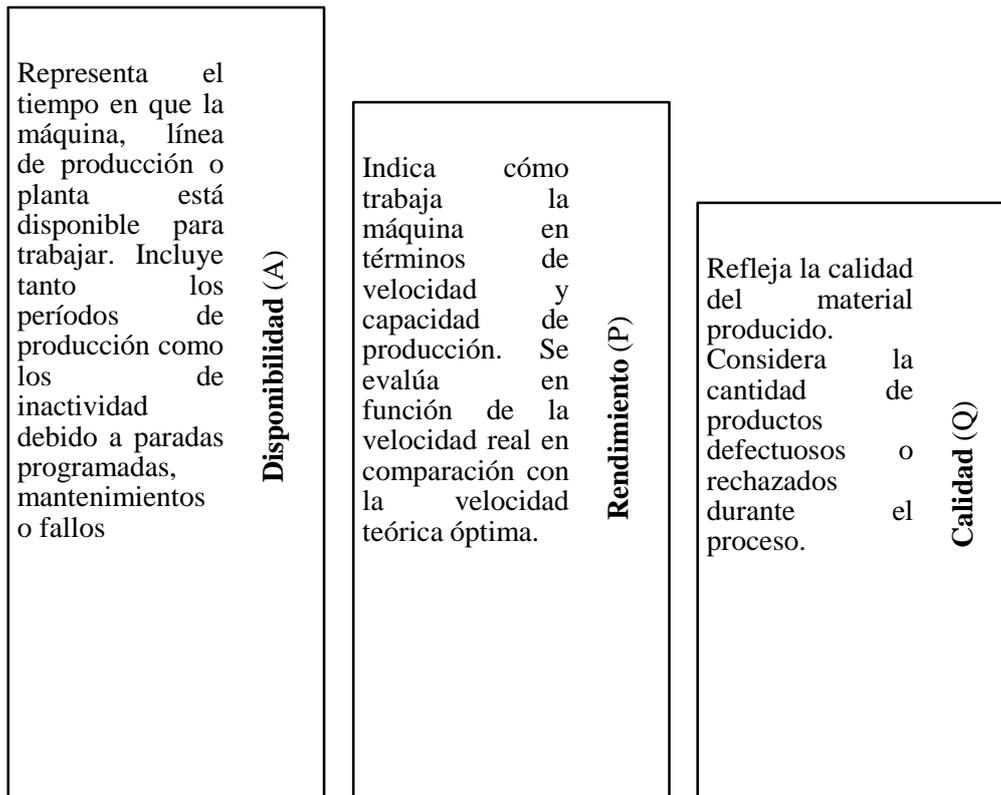


Figura 1 Indicadores OEE

Fuente: Rodríguez (2019). Nuevo sistema de Gestión de Eficiencia Global (OEE) en tiempo real para industria (14).

2.2.3.1. Disponibilidad

La disponibilidad de una maquinaria industrial es esencial para medir cuánto tiempo está en funcionamiento. Se clasifican las paradas en dos categorías: planificadas y no planificadas. Las paradas planificadas incluyen actividades como mantenimiento predictivo, verificaciones de calidad y ajustes. Por otro lado, las no planificadas pueden deberse a averías, falta de materiales o energía, entre otros (14).

La disponibilidad se calcula mediante la ecuación:

$$A = \frac{\text{Tiempo productivo}}{\text{Tiempo disponible}}$$

2.2.3.2. Rendimiento

El rendimiento de una máquina se refiere a la cantidad de producción en relación con su capacidad

total. Las pérdidas de rendimiento pueden surgir de microparadas y reducciones de velocidad. Las microparadas son interrupciones breves pero frecuentes, mientras que la reducción de velocidad puede ser voluntaria o debido al deterioro de la máquina (14).

Se calcula mediante la ecuación:

$$P = \frac{\text{Número total de unidades}}{(\text{Tasa esperada} \times \text{tiempo de actividad})}$$

2.2.3.3. Calidad

La calidad en la producción se mide por la cantidad de unidades conformes en relación con el total producido. Las pérdidas de calidad incluyen defectos y mermas. Los defectos son productos que no cumplen con las especificaciones de calidad, mientras que las mermas son unidades que no llegan a ser productos finales por razones ajenas a la calidad (14).

Se calcula mediante la ecuación:

$$Q = \frac{\text{Número de unidades conformes}}{\text{Número de unidades totales}}$$

2.2.3.4. Velocidad nominal y cuellos de botella

La velocidad nominal de una línea de producción se determina por el cuello de botella, que es la máquina con la menor velocidad nominal. Es importante tener en cuenta que la velocidad nominal puede variar según el producto fabricado. Cualquier parada o reducción de velocidad en el cuello de botella limita la capacidad productiva de toda la línea. Por lo tanto, es fundamental mantener esta máquina operativa y retirar los productos defectuosos antes de que lleguen a ella (14).

2.2.3.5. Ventaja del OEE

La ventaja del OEE radica en que combina estos tres aspectos clave de la producción. Es un estándar internacional ampliamente reconocido y su implementación ofrece ventajas significativas, como la reducción de paradas de máquinas, la identificación de cuellos de botella y la mejora del índice de calidad del producto. Su seguimiento y monitorización son vitales para optimizar el rendimiento en cualquier proceso productivo.

2.2.3.6. Energy OEE

Para abordar las necesidades de relacionar los valores medidos dentro de las industrias y evaluar la competitividad energética, se creó un nuevo indicador: el **Energy OEE**. Este indicador parte del OEE y busca relacionar los indicadores con el consumo de energía de las máquinas evaluadas. El Energy OEE se utiliza para hacer seguimiento y evaluar la eficiencia energética de los recursos empleados en cualquier proceso de producción (15).

El Energy OEE también se compone de 3 subindicadores, que corresponden a los 3 aspectos más impactantes al evaluar todo proceso:

- **Disponibilidad de Energía:** Representa la disponibilidad de las máquinas evaluando el consumo eléctrico en periodos dentro y fuera de producción. Se calcula utilizando servicios de medición de energía en tiempo real, considerando los horarios de producción y analizando incidentes como paradas programadas, mantenimientos y fallos críticos (15).

$$\text{Disponibilidad de energía} = \frac{\text{Horas disponibles}}{\text{Horas de producción}}$$

- **Energía en Pérdidas de Calidad:** Este indicador está directamente relacionado con las pérdidas de energía debido a productos defectuosos o retirados después de un control de calidad. La precisión al evaluar la calidad es fundamental para optimizar el uso de energía en el proceso de producción (15).

$$\text{Energía en pérdidas de calidad} = \frac{\text{Energía utilizada para producir unidades conformes}}{\text{Energía utilizada para producir unidades totales}}$$

- **Rendimiento de la energía**
Reflejará el desempeño de la línea de producción comparando un escenario ideal contra el funcionamiento usual. Para calcular será imprescindible un estudio a detalle por parte de las personas profesionales usando data histórica de consumo eléctrico de la empresa e información detallada de la producción (15).

$$\text{Rendimiento de la energía} = \frac{\text{Energía utilizada para producir total de unidades}}{(\text{Horas disponibles} * \text{Capacidad Nominal})}$$

2.2.4. Interpretación del OEE

Tabla 2: Interpretación del OEE

OEE	CALIFICATIVO	CONSECUENCIAS
<65%	INACEPTABLE	IMPORTANTES PÉRDIDAS ECONÓMICAS BAJA COMPETITIVIDAD PÉRDIDAS ECONÓMICAS
>=65%; < 75%	REGULAR	ACEPTABLE SOLO SI ESTA EL PROCESO DE MEJORA LIGERAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS
>= 75%; < 85%	ACEPTABLE	COMPETITIVIDAD LIGERAMENTE BAJA
>= 85%; < 95%	BUENA	BUENA COMPETITIVIDAD
>= 95%	EXCELENTE	EXCELENTE COMPETITIVIDAD

Nota: Extraído de BLAUDENERGY (2021). ¿Qué es el indicador Energy OEE? (15).

2.2.5. Perturbaciones en el sistema eléctrico

La importancia de la calidad de energía en el funcionamiento adecuado de equipos electrónicos sensibles ha sido reconocida y abordada por diferentes normativas internacionales. Entre estas normativas, se destacan la IEEE 1100 y la IEC 61000, las cuales ofrecen definiciones y criterios específicos para evaluar y garantizar la calidad de energía en distintos entornos.

IEEE 1100

La norma IEEE 1100 establece que la calidad de energía se refiere a la alimentación y la puesta a tierra de equipos electrónicos sensibles de una manera que sea adecuada para su correcta operación. Esto implica no solo la entrega de energía eléctrica de manera confiable, sino también la consideración de aspectos como la estabilidad del tensión, la frecuencia y la forma de onda, así

como la minimización de armónicos y otros fenómenos que puedan afectar el rendimiento de los equipos (16).

IEC 61000

La norma IEC 61000 aborda la calidad de energía desde la perspectiva de la Compatibilidad Electromagnética (EMC, por sus siglas en inglés). En este contexto, la calidad de energía se define como la capacidad de un aparato, equipo o sistema para funcionar de manera satisfactoria en su entorno electromagnético, sin generar perturbaciones electromagnéticas intolerables para otros dispositivos o sistemas que se encuentren en dicho entorno. Esto implica no solo la capacidad de los equipos para resistir interferencias externas, sino también su capacidad para no generar interferencias que puedan afectar a otros dispositivos o sistemas cercanos (16).

Ambas normativas resaltan la importancia de garantizar la calidad de energía para mantener el funcionamiento óptimo de los equipos electrónicos sensibles y para evitar problemas como mal funcionamiento, daños o pérdida de datos. Asimismo, subrayan la necesidad de implementar medidas de protección y mitigación de perturbaciones electromagnéticas para asegurar un entorno eléctrico confiable y seguro para todos los dispositivos y sistemas conectados. En este sentido, el cumplimiento de estas normativas puede contribuir significativamente a mejorar la eficiencia operativa y la fiabilidad de las instalaciones eléctricas en diversos entornos industriales, comerciales y residenciales.

2.2.5.1. Categorías de perturbaciones eléctricas según IEE Std 1159-2009

Según la IEEE Std 1159-2009, las perturbaciones se pueden clasificar según su duración, amplitud, espectro armónico de los fenómenos electromagnéticos que provocan las perturbaciones. Estos se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.2.5.1.1. Transitorios

Los transitorios impulsionales, caracterizados por breves pero intensos incrementos en la tensión, pueden ser desencadenados por eventos como descargas atmosféricas o maniobras de gran carga en la red eléctrica. Por otro lado, los transitorios oscilantes presentan una respuesta sub amortiguada y pueden originarse por la conexión de equipos como bancos de

compensación reactiva.

2.2.5.1.2. Variaciones según duración

A. Subtensiones

Las subtensiones transitorias, son las interrupciones implican una pérdida de tensión por debajo del 10% del suministro eléctrico, mientras que las de larga duración son disminuciones prolongadas por debajo del 90% del valor nominal (16).

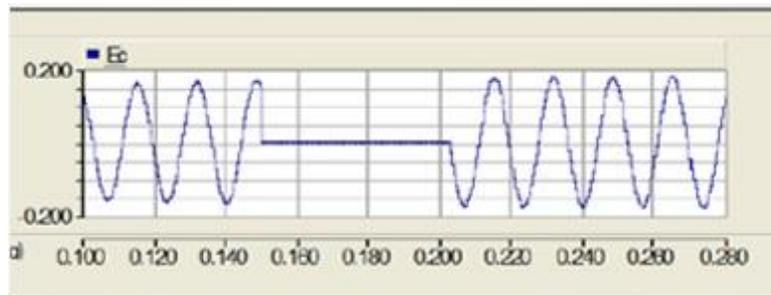


Figura 2 Subtención transitoria

Fuente: Gonzales (2021) Perturbaciones en el sistema eléctrico y formas de mitigarlo (16).

Las subtensiones graduales y prolongadas, también conocidas como "Brownout", se caracterizan por una disminución progresiva en la tensión durante varios segundos, a menudo culminando en una interrupción total del suministro. Estas situaciones suelen ocurrir durante fuertes perturbaciones en la operación de redes y centrales eléctricas, y pueden tener efectos similares a los cortes de energía o microcortes (17).

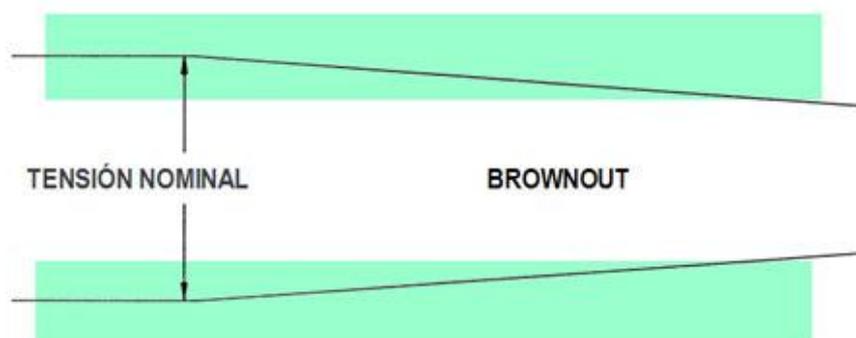


Figura 3 Brownout

Fuente: Extraído de Salicru S. A. (2024) MONTAWEB.com (17).

Las subtensiones, ya sean transitorias o de larga duración, resultan de caídas repentinas

en la tensión debido a sobrecargas momentáneas o permanentes en la red eléctrica. Estas caídas pueden afectar el rendimiento de máquinas impulsadas por motores de inducción, generar puntos oscuros en instalaciones de iluminación y provocar paros en sistemas debido a la entrada en la zona de mínima tensión de trabajo (17).

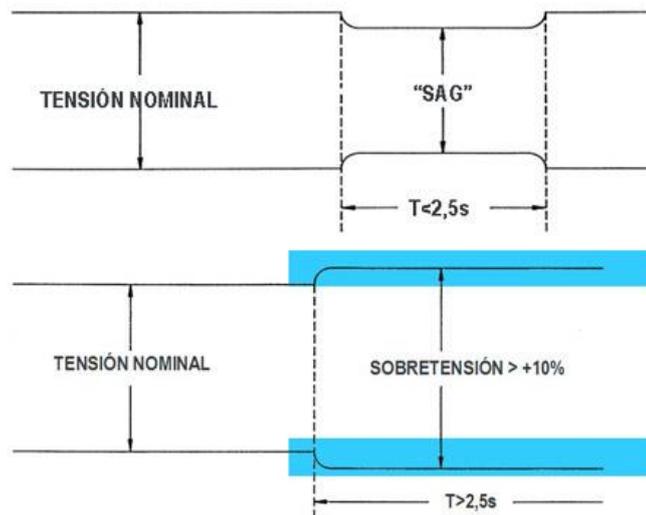


Figura 4 Subtensión

Fuente: Extraído de Salicru S. A. (2024) MONTAWEB.com (17).

B. Sobretensiones

Las sobretensiones momentáneas son aumentos temporales entre un 110% y un 180% de su valor nominal (16).

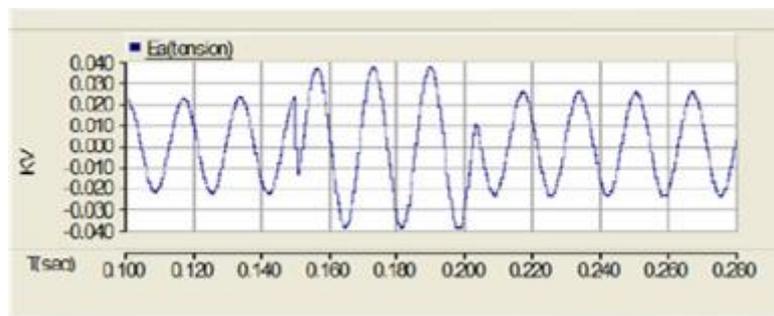


Figura 5 Sobretensión momentánea

Fuente: Gonzales (2021) Perturbaciones en el sistema eléctrico y formas de mitigarlo. (16).

Se caracterizan por elevaciones prolongadas de la tensión por encima del 110% de su valor nominal (16).

Las sobretensiones transitorias y de larga duración se originan por variaciones en la carga de redes eléctricas con regulación deficiente, lo que puede ocasionar problemas en diversos equipos e instalaciones. Estas sobretensiones acortan la vida útil de las luminarias en sistemas de iluminación y causan fallos en los equipos informáticos, como interrupciones en la alimentación y problemas en los monitores (17).

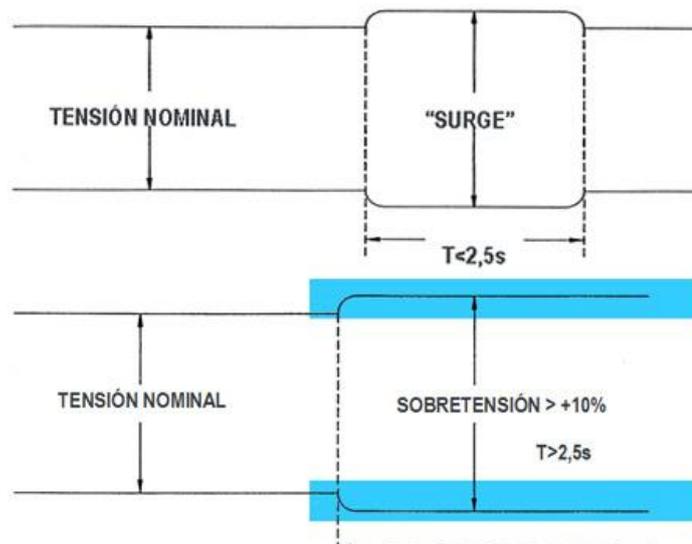


Figura 6 Sobretensión

Fuente: Extraído de Salicru S. A. (2024) MONTAWEB.com (17).

C. Las interrupciones mantenidas

Son cortes absolutos de la alimentación durante períodos superiores a un minuto.

2.2.5.1.3. Desequilibrio

El desequilibrio de tensión y de corriente se relaciona con la aparición de componentes no deseados en las tensiones y corrientes de red, como la presencia de cargas monofásicas en sistemas trifásicos o la desconexión de una fase en un banco de condensadores (16).

2.2.5.1.4. Distorsión de forma de onda

Los armónicos, subarmónicos e interarmónicos, así como los microcortes, componentes de continua y ruidos de alta frecuencia, constituyen formas específicas de distorsión de la forma

de onda de la tensión o corriente, pudiendo ser originados por diversos dispositivos eléctricos y afectar el funcionamiento adecuado de los sistemas eléctricos (16).

Los armónicos de corriente y/o tensión ocupan un papel importante en la producción de caídas de tensión senoidal en el orden (alternadores de las centrales) (17).

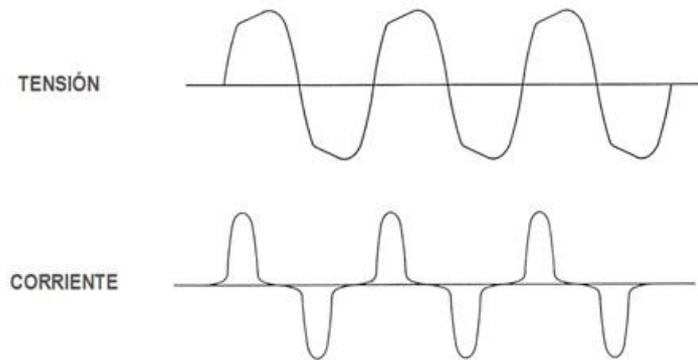


Figura 7 Armónicos

Fuente: Extraído de Salicru S. A. (2024) MONTAWEB.com (17).

2.2.5.1.5. Fluctuaciones de tensión

Hacen referencias a valores eficaces de la tensión entre 95% y 10% del valor nominal, usualmente a causa de cargas industriales:

- Fluctuaciones aleatorias
- Fluctuaciones repetitivas
- Fluctuaciones esporádicas

2.2.5.1.6. Variaciones de frecuencia

Son desviaciones de la frecuencia del sistema de potencia con referencia a su valor nominal, ocasionadas por desequilibrios bruscos entre producción y carga (16).

Las perturbaciones de alta frecuencia, son señales de cualquier frecuencia que son definidas o de banda ancha, estacionarias o ráfagas o a impulso repetitivos. Serán los resultados de acoplos no deseados de las líneas de red comercial con aparatos que emplean tecnologías de alta frecuencia o de conmutación (17).

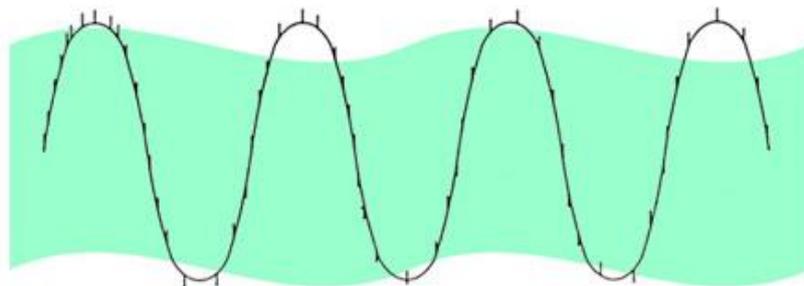


Figura 8 Perturbaciones de alta frecuencia

Fuente: Extraído de Salicru S. A. (2024) MONTAWEB.com (17).

Las variaciones de frecuencia, las redes eléctricas continentales interconectadas, como las predominantes en Europa, mantienen una frecuencia prácticamente constante y cercana a la nominal debido al control centralizado en un sistema de gran escala que incorpora numerosas máquinas síncronas con una potencia combinada significativa y una inercia prácticamente infinita. En contraste, en áreas aisladas o con instalaciones independientes con pequeñas centrales eléctricas, se experimentan con frecuencia fluctuaciones importantes en la frecuencia eléctrica, especialmente al conectar o desconectar cargas que equivalen a la potencia total del sistema. (17).

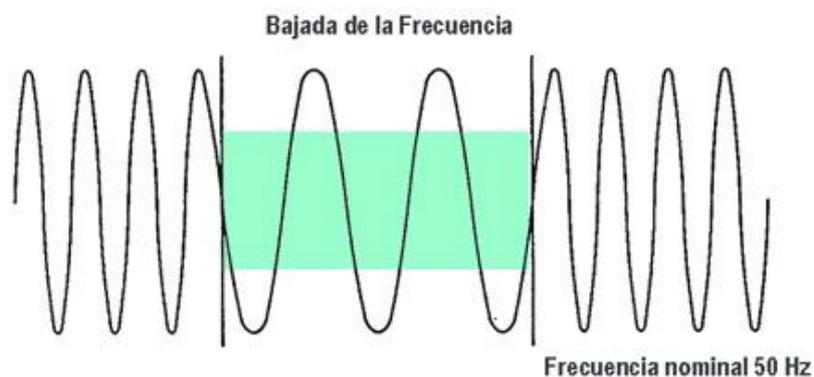


Figura 9 Bajada de frecuencia

Fuente: Extraído de Salicru S. A. (2024) MONTAWEB.com (17).

2.3. Definición de términos básicos

Relé de protección

Dispositivo electromecánico o electrónico diseñado para detectar condiciones anómalas en un sistema eléctrico y tomar acciones para protegerlo, como desconectar circuitos en caso de sobrecargas o cortocircuitos.

OEE

Métrica utilizada para medir la eficiencia global de un equipo o sistema de producción, considerando su disponibilidad, rendimiento y calidad.

Sub tensión

Condición en la que la tensión eléctrica suministrada a un sistema o dispositivo es inferior a su nivel nominal, lo que puede causar un funcionamiento inadecuado o daños en equipos eléctricos.

Sobre tensión

Condición en la que la tensión eléctrica suministrada a un sistema o dispositivo es superior a su nivel nominal, lo que puede causar daños en equipos eléctricos o reducir su vida útil.

Sub frecuencia

Caída momentánea o prolongada en la frecuencia eléctrica por debajo de su nivel nominal, generalmente causada por sobrecargas o problemas en la red eléctrica.

Sobre frecuencia

Incremento momentáneo o prolongado en la frecuencia eléctrica por encima de su nivel nominal, usualmente originado por descargas atmosféricas, maniobras de conmutación u otros eventos similares.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcance de la investigación

3.1.1. Método General

Este método se clasifica como método científico puesto que se siguió un procedimiento con pasos ya establecidos con el fin de obtener conocimiento, tomando de partida la identificación de la variables en un entorno donde existirá influencia o comprensión del fenómeno de investigación, se desarrolló el planteamiento de los aspectos metodológicos que van a aumentar la confiabilidad de los hallazgos obtenidos. Este análisis permitió controlar las variables y observar directamente cómo responden el generador de energía y el relé de protección ante diversas condiciones simuladas. Esto proporciona datos concretos y reproducibles para concluir que la implementación de este relé de protección será un método que tenga un impacto en el OEE en generadores de energía.

3.1.2. Método Específico

El método específico empleado en esta investigación es inductivo puesto que se caracteriza porque va desde lo más específico hasta lo general, en base a eso al realizar pruebas de simulación para cada una de las perturbaciones específicas que pueden afectar al generador, como sub tensión de fase, sobre tensión de fase, baja frecuencia y sobre frecuencia se determinó si la implementación de este relé de protección será un método adecuado en el OEE.

3.1.3. Tipo de investigación

Esta investigación es de carácter aplicado, ya que tiene como objetivo aplicar conocimientos teóricos para resolver problemas prácticos relacionados con la protección y el funcionamiento del generador eléctrico. La investigación aplicada tiene un valor práctico inmediato al abordar los desafíos operativos específicos relacionados con la protección y el funcionamiento del generador eléctrico. Al comprender mejor cómo el relé de protección responde a diferentes perturbaciones, se pueden tomar medidas proactivas para mejorar la fiabilidad y eficiencia del equipo, lo que se traduce en una menor probabilidad de interrupciones no planificadas y una mayor productividad

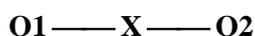
que se traduce como el OEE.

3.1.4. Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo puesto que se buscó determinar el impacto de la implementación del relé de protección en el OEE. Este enfoque permite no solo describir los efectos observados de la implementación del relé, sino también buscar explicaciones causales que ayuden a comprender por qué ocurren estos efectos.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es pre experimental, ya que implicó la manipulación de variables controladas para observar sus efectos en el rendimiento del generador de energía con un análisis pre y post de la implementación. Esto permite una evaluación rigurosa de la efectividad de las medidas de protección implementadas y proporciona una base sólida para tomar decisiones informadas sobre mejoras futuras. El diseño de investigación se representa en el siguiente esquema:



Donde:

O1: OEE de los generadores de energía antes de la implementación

X: Implementación del relé de protección

O2: OEE de los generadores de energía después de la implementación

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población objetivo son los generadores de energía en empresas de generación eléctrica.

3.3.2. Muestra

La muestra es la misma población, es decir los generadores de energía en empresas de generación eléctrica, puesto que se proyecta implementar los relés de protección, una vez comprobado su correcto funcionamiento, a todos los equipos generadores de energía.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

- Revisión documental: Se recopilará información previa sobre las perturbaciones registradas en empresas a nivel general, así como cualquier documentación relevante sobre el diseño y operación de los generadores de energía y el funcionamiento del relé de protección. Esta revisión documental proporcionará una base sólida para el estudio y ayudará a identificar las variables clave a analizar.
- Simulaciones: Se realizarán simulaciones de diferentes escenarios de perturbaciones asimétricas en los generadores de energía utilizando software especializado. Estas simulaciones permitirán observar el comportamiento del relé de protección en situaciones controladas y evaluar su eficacia en la detección y respuesta a las perturbaciones.
- Datos operativos: Se recopilarán datos operativos reales de los generadores de energía, como registros de mantenimiento, informes de producción y registros de tiempos de inactividad. Estos datos proporcionarán información cuantitativa sobre el rendimiento y la fiabilidad de los equipos eléctricos antes y después de la implementación del relé de protección.

3.4.2. Materiales

Para la simulación de los escenarios ante perturbaciones asimétricas se utilizaron:

- Generador síncrono
- Fuente de alimentación DC
- Freno eléctrico
- Multímetros
- Relé de protección a generador y su software IPSCOM
- Acoples, bananas y perillero

3.4.3. Procedimientos

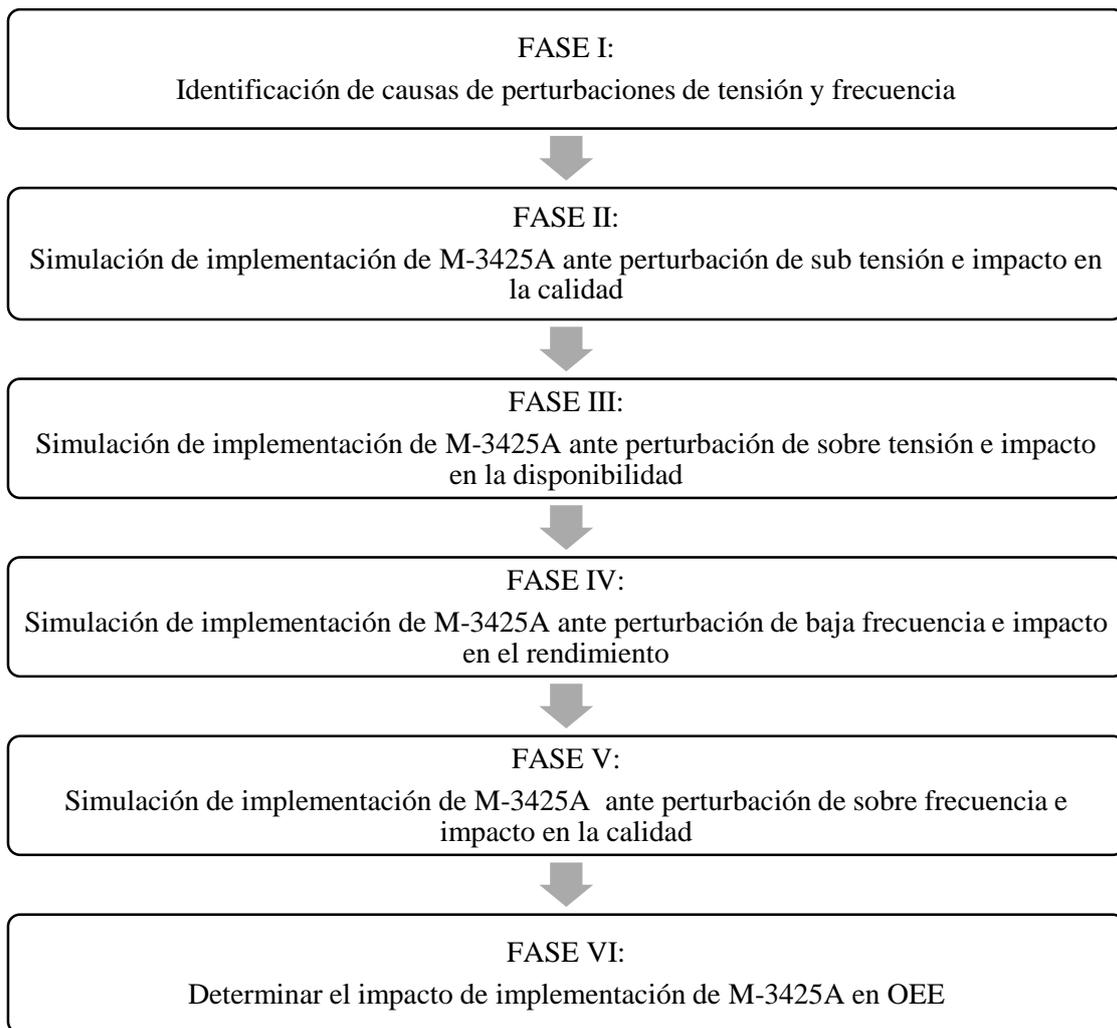


Figura 10 Fases del procedimiento

En este estudio, se realizará una exhaustiva simulación de diversos escenarios de perturbaciones asimétricas en los generadores de energía en empresas de generación eléctrica. El objetivo principal es determinar cómo la implementación y configuración del relé de protección M-3245A puede influir en el rendimiento general de los equipos eléctricos, específicamente en términos de su Overall Equipment Effectiveness (OEE).

Para dar inicio a este análisis, en la Fase I del estudio se llevó a cabo una recopilación detallada de información sobre todas las fallas en la empresa. Posteriormente, se procedió a delimitar y priorizar aquellas que afectan directamente a los generadores de energía. Una vez identificadas estas perturbaciones, se clasificaron según su naturaleza en relación con el tensión y la frecuencia.

Esta clasificación permitirá establecer un marco de referencia para comparar los resultados obtenidos antes y después de la implementación del relé de protección.

En la Fase II, se describió con precisión el procedimiento utilizado para simular una caída de tensión en los generadores de energía. A través de esta simulación, se observará cómo el relé de protección M-3245A responde ante esta situación específica de perturbación. Además, se analizará en profundidad el impacto de esta respuesta en la calidad de la energía perdida, evaluando las unidades producidas de manera conforme y total, tanto antes como después de la implementación del relé.

La Fase III del estudio se centró en la simulación de una situación de sobretensión en los generadores de energía y en la correspondiente respuesta del relé de protección. Se detalló el procedimiento utilizado para llevar a cabo esta simulación y se examinó cómo afecta la disponibilidad de energía, considerando las horas disponibles y de producción. Esta fase permitirá comprender mejor el impacto de la implementación del relé en la eficiencia operativa de los equipos eléctricos.

En la Fase IV, se abordó el escenario de una baja frecuencia en los generadores de energía y se analizó cómo responde el relé de protección ante esta situación. Se evaluó el impacto en el rendimiento energético, teniendo en cuenta factores como la energía utilizada para producir unidades totales, las horas disponibles y la capacidad nominal. Este análisis ayudará a determinar la efectividad del relé en la mejora del rendimiento de los equipos eléctricos.

La Fase V se enfocó en la simulación de una sobre frecuencia en los generadores de energía y en la correspondiente respuesta del relé de protección. Se examinó el impacto en la calidad de la energía perdida, comparando las unidades producidas conforme y totales antes y después de la implementación del relé. Este análisis proporcionará información valiosa sobre cómo el relé puede contribuir a minimizar los efectos adversos de las perturbaciones en la producción.

Finalmente, en la Fase VI del estudio, se llevará a cabo una evaluación integral del impacto de la implementación del relé de protección M-3245A en el OEE de los generadores de energía en empresas de generación eléctrica. Se considerarán todas las dimensiones relevantes del OEE, incluida la disponibilidad, rendimiento y calidad, con el fin de proporcionar una visión holística

del efecto de esta implementación en la eficiencia operativa de la empresa.

3.5. Consideraciones éticas

Se garantizó la confidencialidad de la información recopilada. Además, se respetarán los principios de integridad y honestidad en la recolección y análisis de datos, asegurando la objetividad y la precisión en los resultados del estudio. Se evitará cualquier conflicto de intereses y se seguirán todas las normativas y estándares éticos relevantes en la investigación científica.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diagnóstico de la eficiencia global de los equipos de la línea de generación de energía

Como paso inicial, se llevó a cabo la evaluación del OEE en la línea de generación eléctrica de las empresas objeto de estudio, durante un periodo de análisis de seis meses durante el año 2023 con el propósito de determinar el estado inicial de dicha línea en términos de disponibilidad, rendimiento y calidad de los equipos involucrados. Cabe mencionar que para la determinación del eficiencia global de los equipos (OEE) se emplearon las siguientes fórmulas de cálculo.

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad (D)} * \text{Rendimiento (R)} * \text{Calidad (C)}$$

Siendo que, para la determinación de la disponibilidad, rendimiento y calidad, se emplearon las siguientes fórmulas de cálculo.

$$\text{Disponibilidad(D)} = \frac{\text{Tiempo operativo(B)}}{\text{Tiempo planificado(A)}}$$

$$\text{Rendimiento(R)} = \frac{\text{Tiempo de funcionamiento (F)}}{\text{Tiempo operativo (B)}}$$

$$\text{Calidad(C)} = \frac{\text{Tiempo productivo (P)}}{\text{Tiempo de funcionamiento (F)}}$$

Donde la disponibilidad (D) correspondía al cociente entre el tiempo operativo (B) sobre el tiempo planificado (A); el índice de rendimiento correspondía a la división del tiempo de funcionamiento (F) sobre el tiempo operativo (B); mientras que el índice de calidad correspondía al cociente del tiempo productivo (P) sobre el tiempo de funcionamiento (F).

Asimismo, para la determinación de los niveles de tiempo se emplearon las siguientes fórmulas de cálculo.

$$\text{Tiempo operativo (B)} = A - \text{Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP)}$$

$$\text{Tiempo de funcionamiento (F)} = A - \text{Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP)}$$

$$\text{Tiempo productivo (P)} = F - \text{Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP)}$$

Como se puede apreciar en las fórmulas de cálculo, el tiempo operativo (B) correspondía al tiempo planificado o programado de trabajo (A), menos los tiempos de inactividad suscitados en la línea de generación eléctrica a raíz de averías y reparación – ajustes; mientras que el tiempo de

funcionamiento (F) correspondía al tiempo operativo (B) menos los tiempos de inactividad ocasionados por pérdidas relacionadas con el funcionamiento a velocidad reducida y tiempos en vacío – paradas cortas; por último, el tiempo productivo correspondía a la diferencia del tiempo de funcionamiento (F) menos los tiempos de inactividad ocasionados por el tercer grupo de las seis grandes pérdidas (defectos de calidad – repetición de trabajo y puesta en marcha).

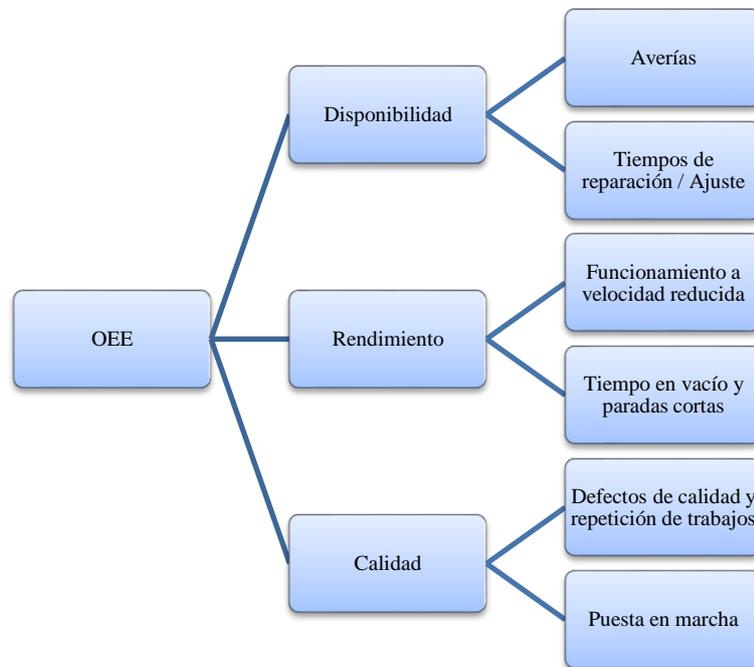


Figura 11 Las Seis Grandes Pérdidas y su impacto en la Eficiencia Global de los Equipos

Como se aprecia en la figura, la disponibilidad de los equipos es afectada por los tiempos de inactividad ocasionados por el primer grupo de las seis grandes pérdidas (averías y tiempos de reparación / ajuste); mientras que el rendimiento se encuentra afectado por los tiempos de inactividad ocasionados por el segundo grupo de las seis grandes pérdidas (funcionamiento a velocidad reducida y tiempo en vacío y paradas cortas); por último la calidad se ve afectado por los tiempos de inactividad ocasionados por el tercer grupo de las seis grandes pérdidas (defectos de calidad y repetición de trabajo, y puesta en marcha).

Habiéndose desarrollado la forma de cálculo para cada uno de los indicadores, se procedió a diagnosticar la línea de generación eléctrica de las empresas durante el primer semestre del año 2023; determinándose las fallas presentadas por cada equipo, así como el tiempo de inactividad que acarrearón y el indicador del OEE que era afectado producto de estas fallas.

Tabla 3 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 1

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador A	Trifásico	55	Sobretensión durante tormenta eléctrica	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Transformador B	Trifásico	40	Subtensión debido a fluctuación en la red eléctrica	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Motor C	Trifásico	57	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador D	Trifásico	36	Sobrefrecuencia debido a falla en el regulador de voltaje	Averías	Disponibilidad
Compresor E	Trifásico	76	Baja tensión durante mantenimiento en la subestación	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Generador A	Trifásico	66	Interrupción de suministro debido a caída de postes eléctricos	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor F	Trifásico	41	Sobrecarga de corriente durante arranque	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 2, durante el mes uno en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes uno.

Tabla 4 OEE de los equipos de generación eléctrica: Mes 1

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Generador A	192	0	121	0	192	71	71	100.00%	36.98%	100.00%	36.98%
Generador D	192	36	0	0	156	156	156	81.25%	100.00%	100.00%	81.25%
Transformador B	192	0	0	40	192	192	152	100.00%	100.00%	79.17%	79.17%
Motor C	192	0	57	0	192	135	135	100.00%	70.31%	100.00%	70.31%
Motor F	192	0	0	41	192	192	151	100.00%	100.00%	78.65%	78.65%
Compresor E	192	0	0	76	192	192	116	100.00%	100.00%	60.42%	60.42%
Totales	1152	36	178	157	1116	938	781	96.88%	84.05%	83.26%	67.80%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes uno se registraron un total de 1,152 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 36 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador D; mientras que se registraron un total de 178 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Generador A y el Motor C; por último, se registraron un total de 157 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en el Compresor E y Motor F respectivamente. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 67.80% durante el primer mes de análisis.

Tabla 5 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 2

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Transformador B	Trifásico	40	Sobretensión durante restablecimiento de red	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador C	Trifásico	29	Subfrecuencia debido a sobrecarga de la red eléctrica	Averías	Disponibilidad
Compresor D	Trifásico	51	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador E	Trifásico	64	Sobretensión debido a falla en el sistema de regulación	Averías	Disponibilidad
Motor F	Trifásico	57	Interrupción del suministro debido a corte de línea principal	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 4, durante el mes dos en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducían en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes dos.

Tabla 6 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 2

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor D	192	0	51	0	192	141	141	100.00%	73.44%	100.00%	73.44%
Generador C	192	29	0	0	163	163	163	84.90%	100.00%	100.00%	84.90%
Generador E	192	64	0	0	128	128	128	66.67%	100.00%	100.00%	66.67%
Motor F	192	0	0	57	192	192	135	100.00%	100.00%	70.31%	70.31%
Transformador B	192	0	40	0	192	152	152	100.00%	79.17%	100.00%	79.17%
Totales	960	93	91	57	867	776	719	90.31%	89.50%	92.65%	74.90%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes dos se registraron un total de 960 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 93 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador C y Generador E; mientras que se registraron un total de 91 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor D y Transformador B; por último, se registraron un total de 57 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha

y repetición de trabajos en el Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 74.90% durante el primer mes de análisis.

Tabla 7 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 3

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador A	Trifásico	44	Subtensión debido a falla en el sistema de distribución	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Transformador B	Trifásico	56	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	62	Sobrecarga de corriente durante operación a plena carga	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad
Generador D	Trifásico	56	Interrupción del suministro debido a falla en el regulador	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Compresor E	Trifásico	37	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento

			Sobretensión		
Generador A	Trifásico	44	durante	Averías	Disponibilidad
			restablecimiento		
			de red		

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 6, durante el mes tres en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes tres.

Tabla 8 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 3

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor E	192	0	37	0	192	155	155	100.00%	80.73%	100.00%	80.73%
Generador A	192	44	44	0	148	104	104	77.08%	70.27%	100.00%	54.17%
Generador D	192	0	0	56	192	192	136	100.00%	100.00%	70.83%	70.83%
Motor C	192	0	0	62	192	192	130	100.00%	100.00%	67.71%	67.71%
Transformador B	192	0	56	0	192	136	136	100.00%	70.83%	100.00%	70.83%
Totales	960	44	137	118	916	779	661	95.42%	85.04%	84.85%	68.85%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes tres se registraron un total de 960 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 44 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador A; mientras que se registraron un total de 137 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor E, Generador A y Transformador B; por último, se registraron un total de 118 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en el Generador D y en el Motor C. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada

uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 68.85% durante el primer mes de análisis.

Tabla 9 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 4

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Transformador B	Trifásico	31	Subtensión debido a fluctuación en la red eléctrica	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	74	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador D	Trifásico	37	Sobrefrecuencia debido a falla en el regulador de voltaje	Averías	Disponibilidad
Compresor E	Trifásico	64	Baja tensión durante mantenimiento en la subestación	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Generador A	Trifásico	65	Interrupción de suministro debido a caída de postes eléctricos	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor F	Trifásico	28	Sobrecarga de corriente durante arranque	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 8, durante el mes tres en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes cuatro.

Tabla 10 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 4

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor E	192	0	0	64	192	192	128	100.00%	100.00%	66.67%	66.67%
Generador A	192	0	65	0	192	127	127	100.00%	66.15%	100.00%	66.15%
Generador D	192	37	0	0	155	155	155	80.73%	100.00%	100.00%	80.73%
Motor C	192	0	74	0	192	118	118	100.00%	61.46%	100.00%	61.46%
Motor F	192	0	0	28	192	192	164	100.00%	100.00%	85.42%	85.42%
Transformador B	192	0	31	0	192	161	161	100.00%	83.85%	100.00%	83.85%
Totales	1152	37	170	92	1115	945	853	96.79%	84.75%	90.26%	74.05%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes cuatro se registraron un total de 1,152 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 37 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador D; mientras que se registraron un total de 170 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Generador A, Motor C y Transformador B; por último, se registraron un total de 92 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en el Compresor E y el Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada

uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 74.05% durante el cuarto mes de análisis.

Tabla 11 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 5

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador B	Trifásico	45	Sobretensión durante restablecimiento de red	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	35	Subfrecuencia debido a sobrecarga de la red eléctrica	Averías	Disponibilidad
Compresor D	Trifásico	26	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador E	Trifásico	58	Sobretensión debido a falla en el sistema de regulación	Averías	Disponibilidad
Motor F	Trifásico	40	Interrupción del suministro debido a corte de línea principal	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 10, durante el mes cinco en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes cinco.

Tabla 12 OEE de generación eléctrica: Mes 5

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor D	192	0	26	0	192	166	166	100.00%	86.46%	100.00%	86.46%
Generador B	192	0	45	0	192	147	147	100.00%	76.56%	100.00%	76.56%
Generador E	192	58	0	0	134	134	134	69.79%	100.00%	100.00%	69.79%
Motor C	192	35	0	0	157	157	157	81.77%	100.00%	100.00%	81.77%
Motor F	192	0	0	40	192	192	152	100.00%	100.00%	79.17%	79.17%
Totales	960	93	71	40	867	796	756	90.31%	91.81%	94.97%	78.75%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes cinco se registraron un total de 960 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 93 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador E y Motor C; mientras que se registraron un total de 71 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor D y Generador B; por último, se registraron un total de 40 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y

repetición de trabajos en el Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 78.75% durante el quinto mes de análisis.

Tabla 13 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 6

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador A	Trifásico	54	Subtensión debido a falla en el sistema de distribución	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Transformador B	Trifásico	45	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	51	Sobrecarga de corriente durante operación a plena carga	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad
Generador D	Trifásico	63	Interrupción del suministro debido a falla en el regulador	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Compresor E	Trifásico	72	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador A	Trifásico	37	Sobretensión durante restablecimiento de red	Averías	Disponibilidad
Motor F	Trifásico	45	Sobrecarga de corriente durante arranque	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 12, durante el mes seis en análisis se suscitaron una serie de

fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes seis.

Tabla 14 OEE de generación eléctrica: Mes 6

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor E	192	0	72	0	192	120	120	100.00%	62.50%	100.00%	62.50%
Generador A	192	37	54	0	155	101	101	80.73%	65.16%	100.00%	52.60%
Generador D	192	0	0	63	192	192	129	100.00%	100.00%	67.19%	67.19%
Motor C	192	0	0	51	192	192	141	100.00%	100.00%	73.44%	73.44%
Motor F	192	0	0	45	192	192	147	100.00%	100.00%	76.56%	76.56%
Transformador B	192	0	45	0	192	147	147	100.00%	76.56%	100.00%	76.56%
Totales	1152	37	171	159	1115	944	785	96.79%	84.66%	83.16%	68.14%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes seis se registraron un total de 1,152 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 37 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador A; mientras que se registraron un total de 171 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor E, Generador A y Transformador B; por último, se registraron un total de 159 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta

en marcha y repetición de trabajos en el Generador D, Motor C y Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 68.14% durante el sexto mes de análisis.

Tabla 15 Consolidado del OEE de la línea de generación eléctrica: Diagnóstico

Periodo de análisis	Tiempo planificado (A)	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	Disponibilidad (D)	Rendimiento (R)	Calidad (C)	OEE
Mes 1	1152	1116	938	781	96.88%	84.05%	83.26%	67.80%
Mes 2	960	867	776	719	90.31%	89.50%	92.65%	74.90%
Mes 3	960	916	779	661	95.42%	85.04%	84.85%	68.85%
Mes 4	1152	1115	945	853	96.79%	84.75%	90.26%	74.05%
Mes 5	960	867	796	756	90.31%	91.81%	94.97%	78.75%
Mes 6	1152	1115	944	785	96.79%	84.66%	83.16%	68.14%
Totales	6336	5996	5178	4555	94.63%	86.36%	87.97%	71.89%

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con lo desarrollado en la tabla 14, durante el semestre en análisis se registró un tiempo planificado total de 6,336 horas; 5,996 horas correspondiente al tiempo operativo; 5,178 horas correspondientes al tiempo de funcionamiento y 4,555 horas correspondientes al tiempo productivo. Traduciéndose, en una disponibilidad de 94.63%, un rendimiento de 86.36% y un 87.97% de calidad semestral, siendo la eficiencia global de los equipos en este periodo semestral de 71.89%, lo que se traducía en una eficiencia global de calificativo regular y se interpretaba que dentro de la línea de generación eléctrica se presentaban pérdidas económicas.

4.2. Comprobación del funcionamiento del relé M-3425A ante perturbaciones de tensión y frecuencia

En el siguiente apartado se procedió con la experimentación del relé M-3425A con el propósito de comprobar su funcionamiento ante perturbaciones de tensión y frecuencia; siendo que se planteaba implementar este dispositivo dentro de la línea de generación eléctrica de las empresas a fin de incrementar la Eficiencia Global de los Equipos (OEE).

4.2.1. Configuración externa del equipo

El primer paso consistía en el reconocimiento de los puertos de entrada de tensión y corriente de medición, así como los contactos asignados de salida.

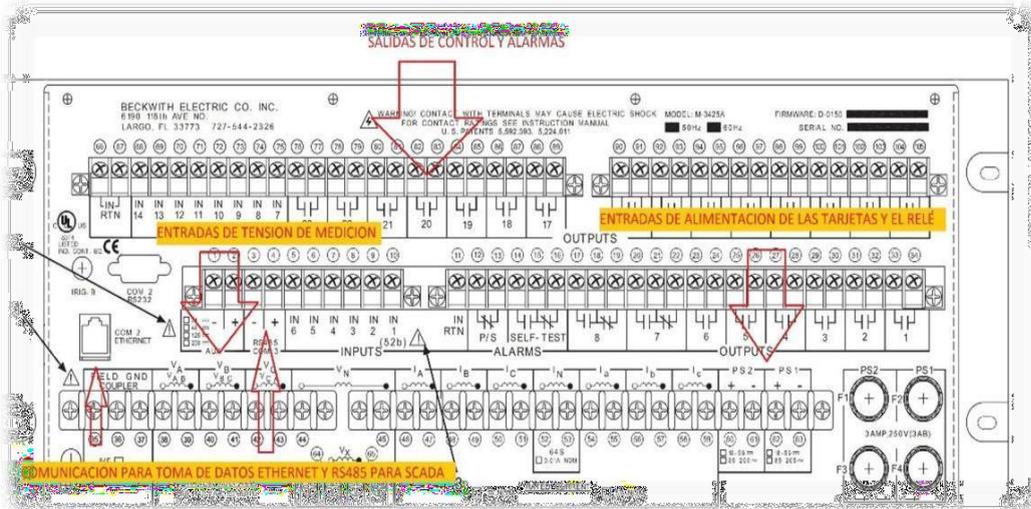


Figura 12 Reconocimiento de entradas de tensión y corriente de medición y salidas

Fuente: Elaboración propia



Figura 13 Conexiones del relé

Fuente: Elaboración propia

Debido a que los niveles de tensión de salida de un generador no resultaban adecuados en una aplicación real, resulto necesario conectar transformadores de tensión y corriente, a fin de comparar las señales y mantener el relé en un funcionamiento óptimo. Cabe mencionar que, durante las pruebas se desconectaron los transformadores de tensión, ya que los niveles de prueba eran mínimos a los valores nominales, así como se corroboró que no se encontraban en funcionamiento previo a las pruebas.

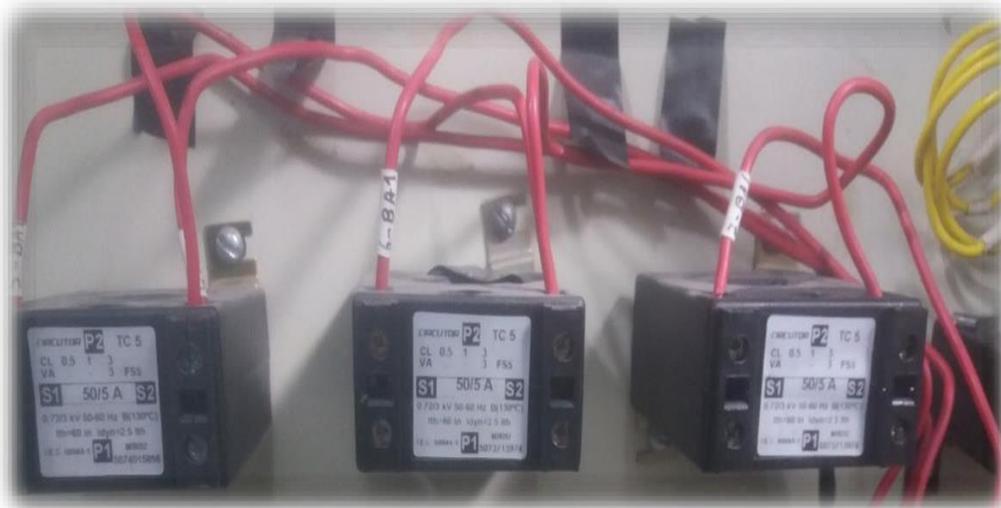


Figura 14 TC de medición

Fuente: Elaboración propia



Figura 15 TT de medición

Fuente: Elaboración propia

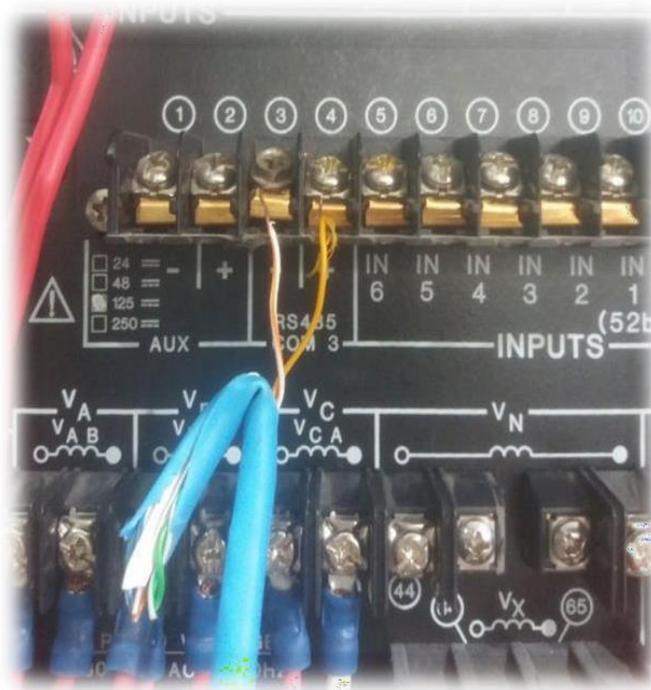


Figura 16 Conexión RS-485 y mediciones de tensión.

Fuente: Elaboración propia

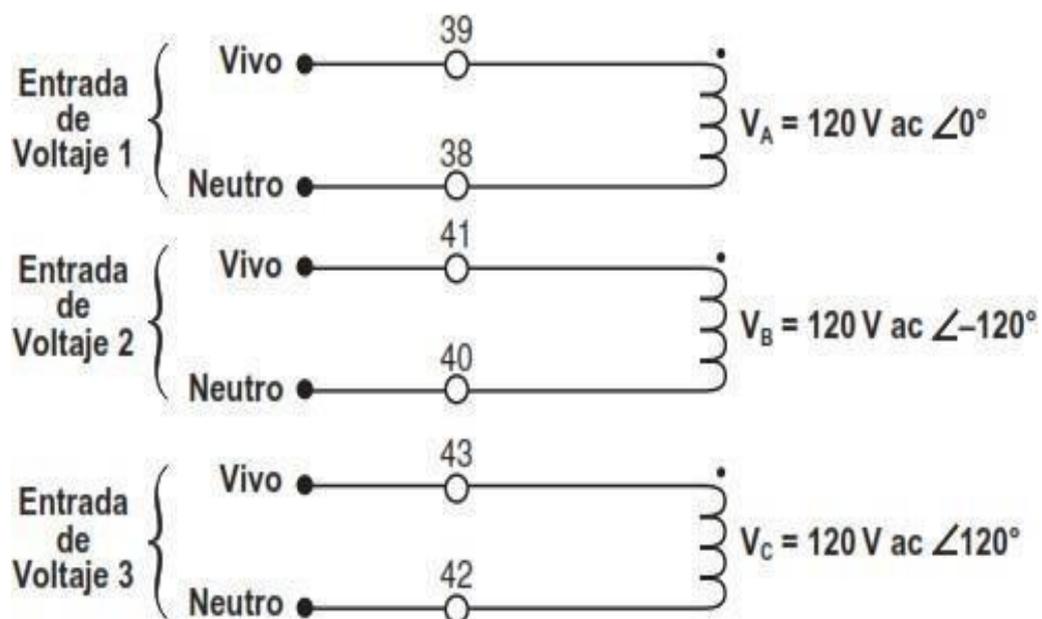
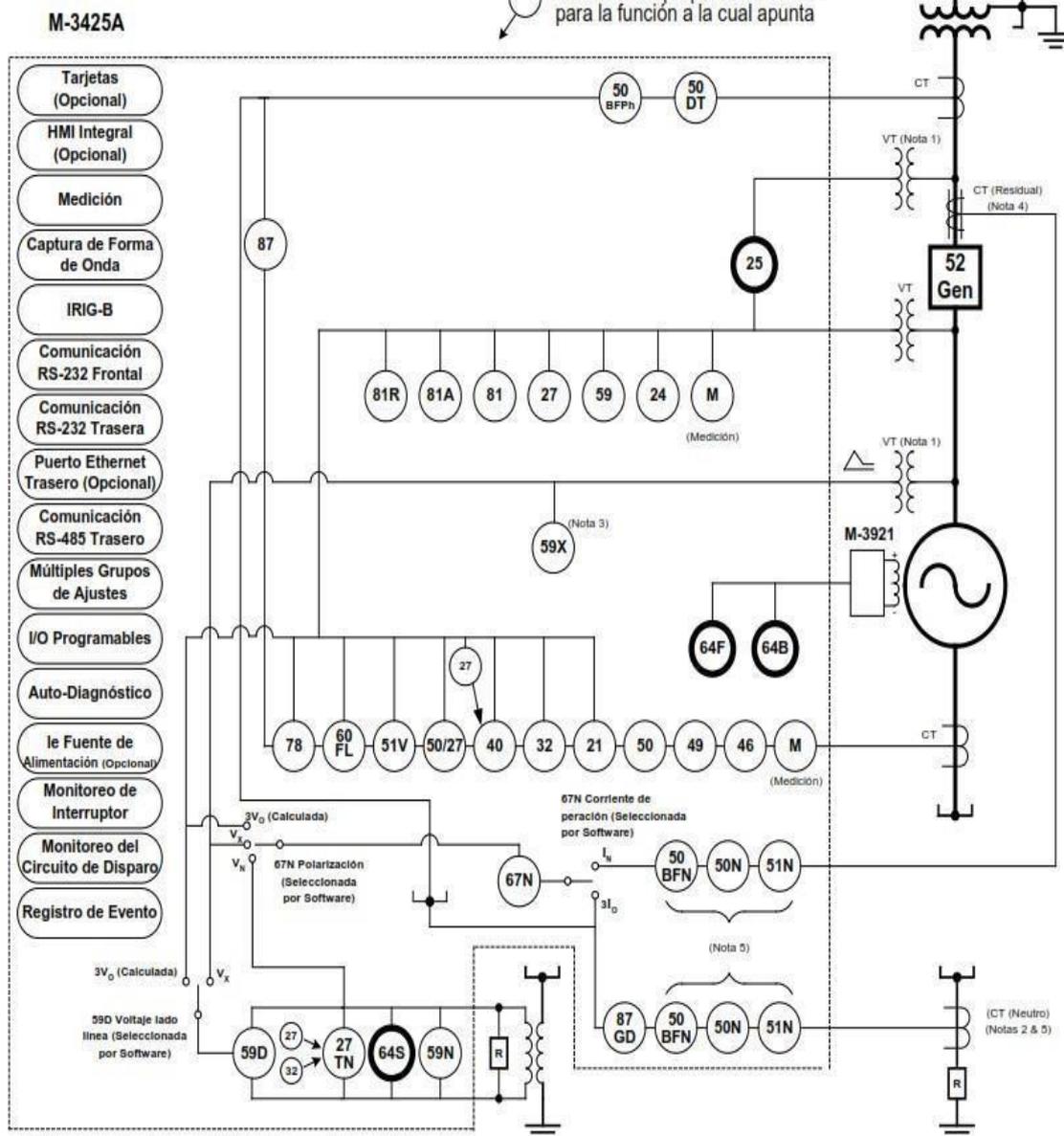


Figura 17 Modelo V1 usado según manual para la comprobación de nuestras fallas

Fuente: Elaboración propia

**Diagrama de Conexiones
Típicas del M-3425A**

-  Estas funciones están disponibles en el Paquete Completo. Un subgrupo de estas funciones están disponibles en un Paquete Base
-  Esta función está disponible como una función de protección opcional
-  Esta función proporciona control para la función a la cual apunta



Aterrizamiento de Alta impedancia con Protección de Falla a Tierra 100% de Tercera Armónica

Aterrizamiento de Baja impedancia con Diferencial de Tierra y Protección de Falla a Tierra del Estator por Sobrecorriente

Figura 18 Conexión del relé de protección de generador

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Configuración externa del equipo

De acuerdo con el manual se procedió a seguir los pasos indicados en la configuración inicial, esto en caso de tener un relé sin configuración alguna, ya que el relé empleado ya contaba con configuraciones.

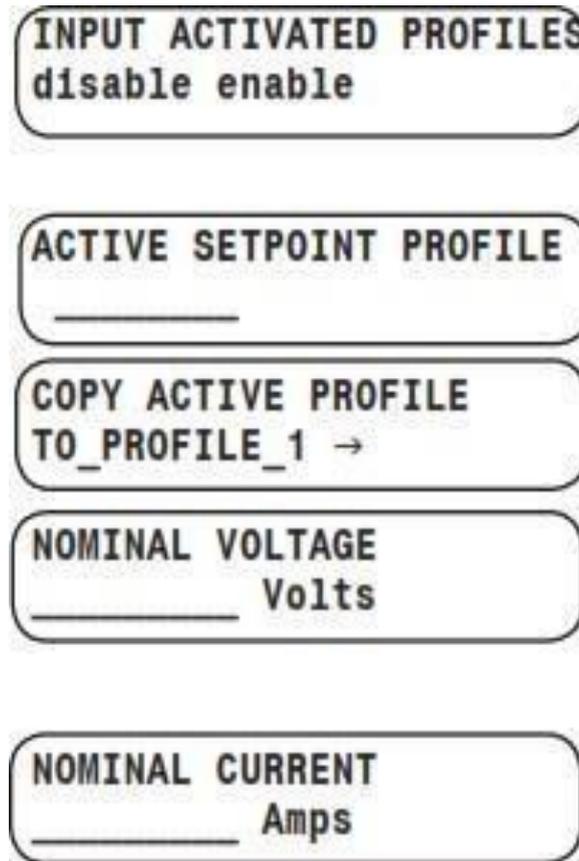


Figura 19 Pasos para activar el relé

Fuente: Elaboración propia

Habiéndose realizado la comunicación externa se modificarán los parámetros nominales y de pruebas del relé de protección desde el software brindado por la marca BECWITH ELECTRIC.

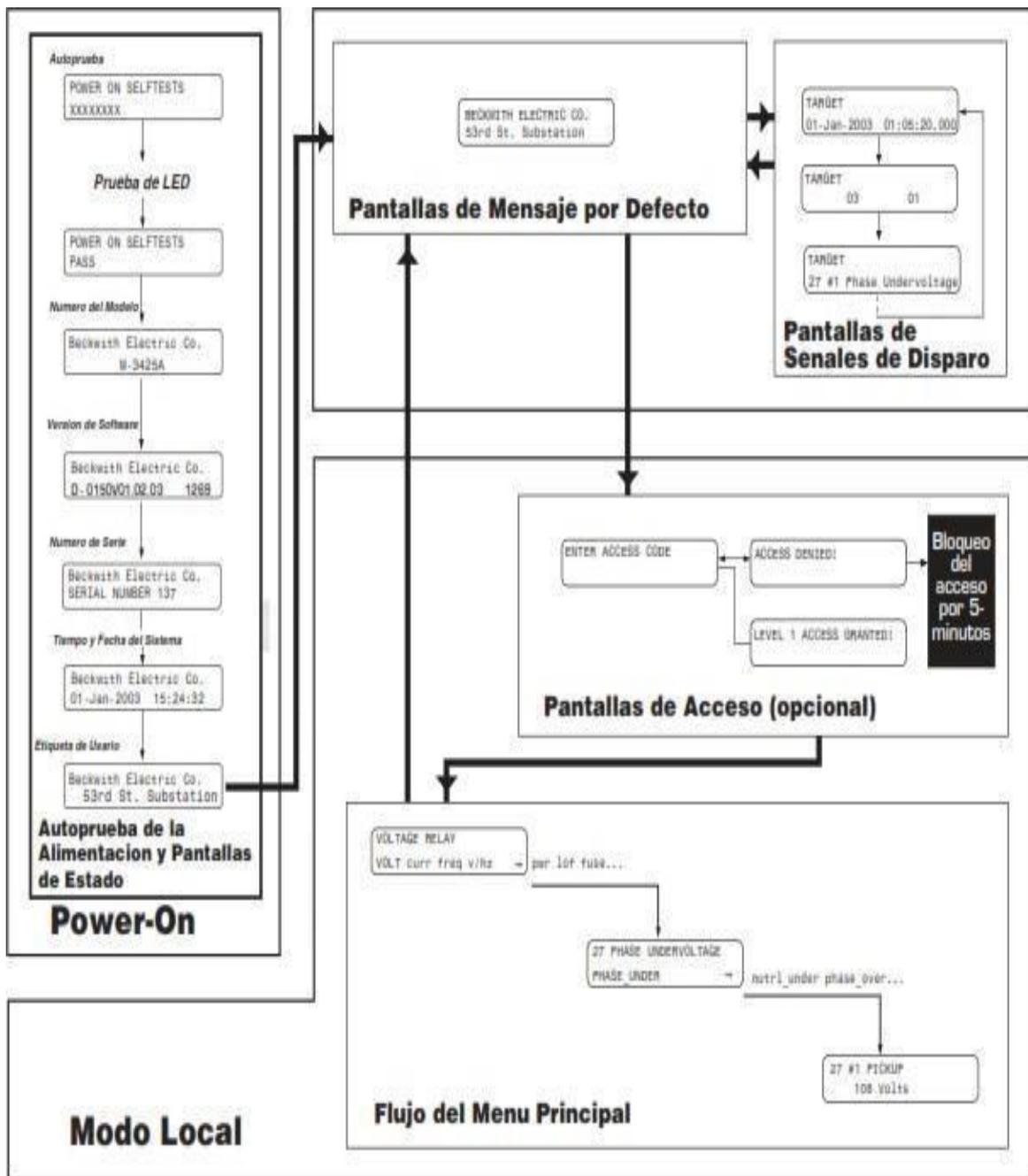


Figura 20 Método de comunicación del relé

Fuente: Elaboración propia

El Relé de Protección de Generador M-3425A incorporaba tres puertos seriales para tener comunicación con dispositivos externos. Equipos tales como RTU's, concentradores de datos, módems o computadoras pueden ser puestos en interface para adquisición de datos y control directo, en línea y tiempo real. Generalmente, todos los datos disponibles al operador a través del panel frontal del relevador con el módulo de interface hombre- máquina M-3931 son accesibles remotamente a través de BECO 2200 o protocolo de intercambio de datos MODBUS.

Cuando el puerto Ethernet está habilitado el puerto serial COM2 (RS-232) no está disponible para comunicación. Aunque la velocidad de la conexión Ethernet sea más rápida que el puerto RS-232 (puede ser de hasta 10 Mbps), el módulo Ethernet se conecta internamente a través de la conexión serial COM2 y es por lo tanto limitada a las velocidades de conexión de hasta 9600 bps.

Para este experimento se realizó la comunicación mediante el Puerto Ethernet accediéndose desde una red local.

4.2.3. Realización de las pruebas de fallas

4.2.3.1. Etapa 1: Configuración y prueba de fallas al relé M-3245A

Se llevó a cabo esta etapa definiéndose los siguientes objetivos:

- Conocer el funcionamiento del relé de protección del generador G-3425A.
- Realizar pruebas de simulación para cada una de las fallas.
- Realizar el conexionado y configuración del relé M-3425A para cada una de las fallas.

Asimismo, se definieron los siguientes materiales a utilizarse:

- 1 generador síncrono.
- 1 Fuente de alimentación DC.
- 1 freno eléctrico
- 2 multímetros.
- 1 relé de protección a generador.
- 1 acople.
- Bananas.
- Perillero.

De esta forma el sistema elaborado presentaba las siguientes características:

- Tensión de generación: 90V
- Frecuencia estable: 60Hz

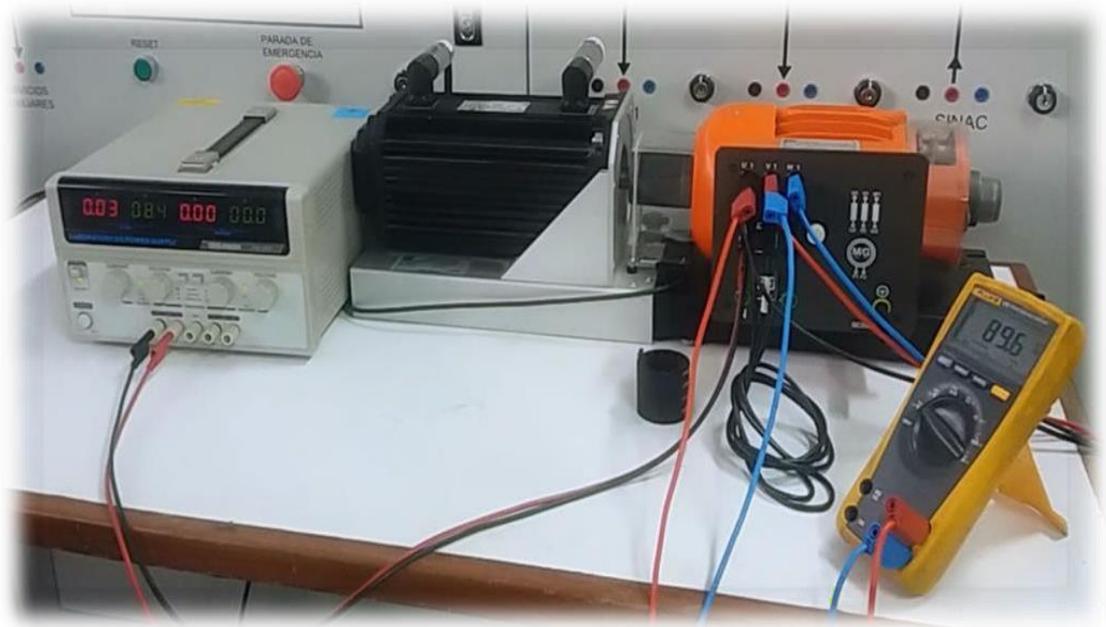


Figura 21 Prueba de Generador conectado

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2. Simulación de falla de Subtensión

Para el desarrollo de esta simulación se trabajó con una tensión $V = 85V$. Asimismo, para la realización de esta simulación se tuvo que variar la tensión generada, por lo tanto se procedió a variar la tensión producido en el campo del generador y se procedió a simular una caída de tensión produciendo una falla de Subtensión en un sistema real.



Figura 22 Simulación de baja tensión (Subtensión)

Fuente: Elaboración propia

De esta forma, cuando el generador entregaba una tensión de menor a la que estaba programada el relé, se activaba la opción 27, dándose a entender que el generador presentaba una falla de Subtensión.



Figura 23 Baja tensión (Subtensión) señal en relé

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, cuando el generador enviaba menos cantidad de tensión de la programa, el relé activaba su función 27, misma que se podía apreciar a través del software IPSCOM.

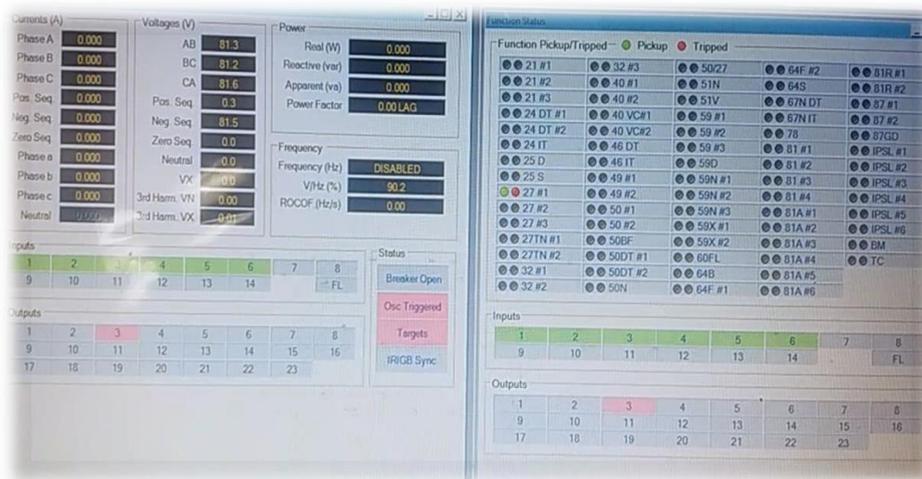


Figura 24 Baja tensión (subtensión) en software

Fuente: Elaboración propia

Al producirse la falla de subtensión, gracias al empleo del software IPSCOM se detectó la falla

prendiéndose una luz roja en el número correspondiente de la falla, correspondiente al número 27.

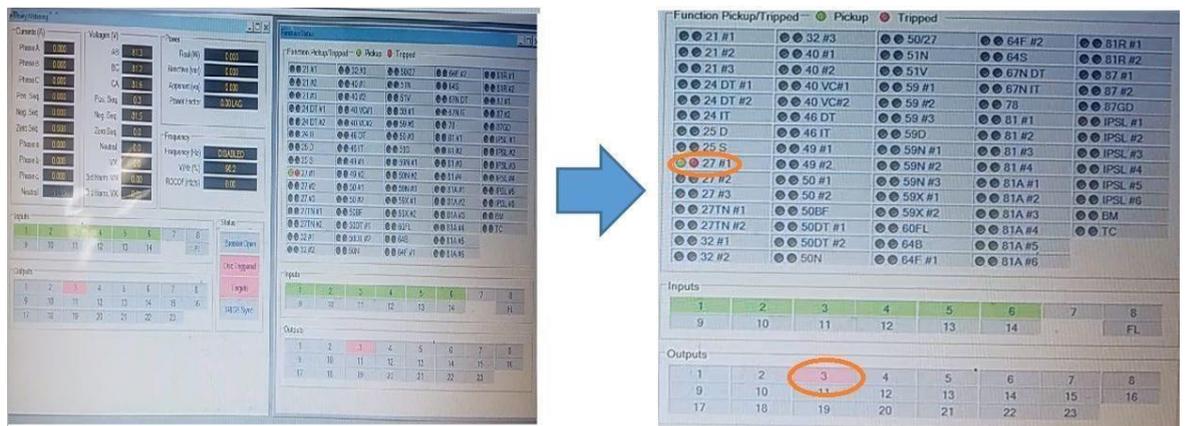


Figura 25 Subtensión leds de aviso y alarmas

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3. Simulación de falla de Sobretensión

El sistema que fue elaborado presentaba las siguientes características:

- Tensión de generación: 90V
- Frecuencia estable: 60Hz

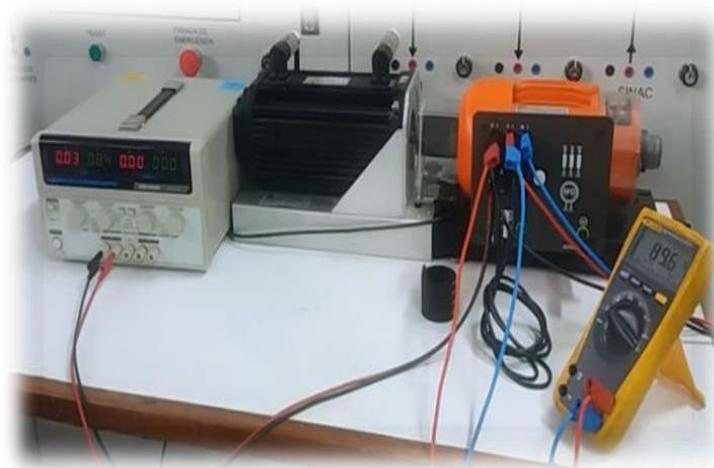


Figura 26 Conexión del sistema

Fuente: Elaboración propia

De igual forma que la anterior simulación se tuvo que variar la tensión que estaba generando el generador, por lo tanto se varió la tensión producida en el campo del generador y se procedió a simular la sobretensión produciendo una falla de

sobretensión en un sistema real.

- Para esta simulación se procedió a trabajar con una tensión $V = 100V$

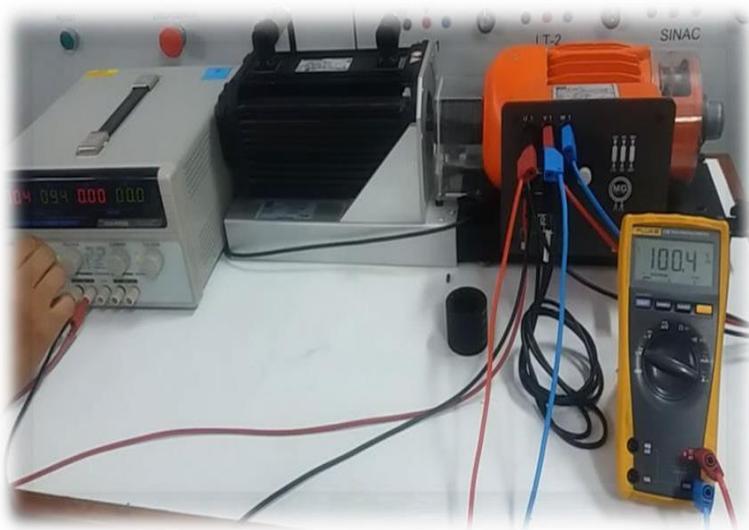


Figura 27 Conexión del sistema Simulación de Sobretensión

Fuente: Elaboración propia

Cuando el generador entregaba una tensión mayor a la que estaba programada el relé activaba la opción 59, dándose a conocer que el generador presentaba una falla de sobretensión.



Figura 28 Alta tensión (Sobretensión) señal en relé

Fuente: Elaboración propia

Cuando el generador enviaba una mayor tensión de la programada el relé activaba su función 59 de sobretensión, mismo que se apreciaba en el software IPSCOM.

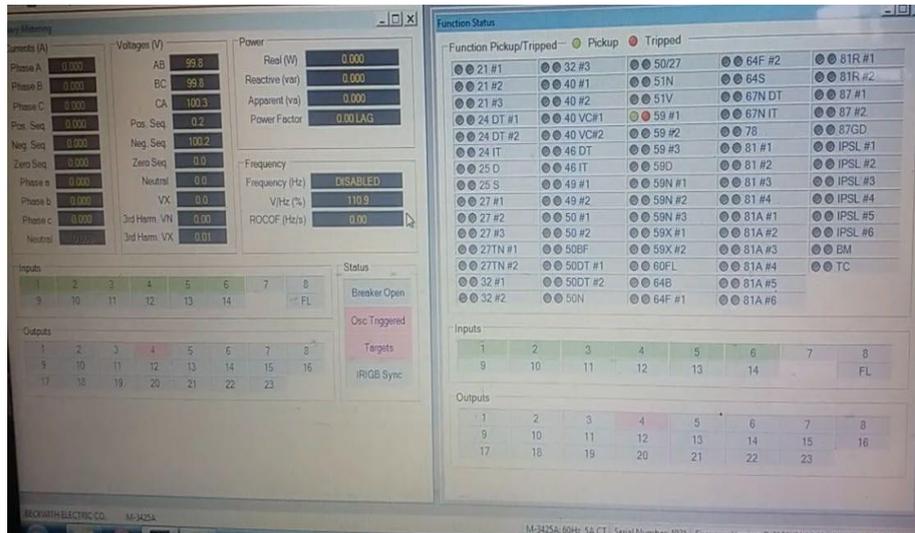


Figura 29 Alta tensión (sobretensión) en software

Fuente: Elaboración propia

Al registrarse la falla de sobretensión, el software IPSCOM detectó la falla al prenderse una luz roja en el número correspondiente a la falla número 59.

También se indicaba el número de la salida que se está deshabilitando, siendo correspondiente al número 4.

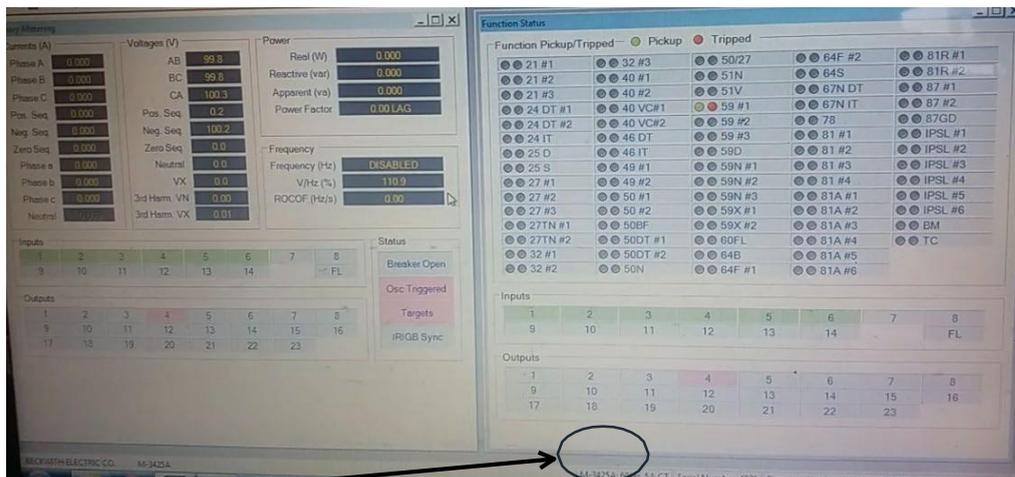


Figura 30 Alta tensión (sobretensión) software y leds

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.4. Simulación de falla de Subfrecuencia

El sistema elaborado presenta las siguientes características:

- Tensión de generación: 90V.
- Frecuencia estable: 60Hz.

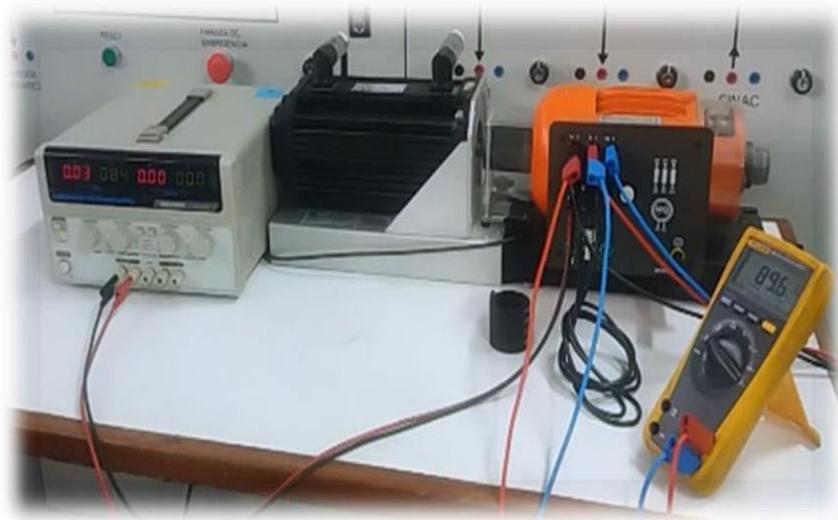


Figura 31 Conexión simulación de Subfrecuencia

Fuente: Elaboración propia



Figura 32 Frecuencia nominal

Fuente: Elaboración propia

Para realizar esta simulación se tuvo que variar la frecuencia que estaba siendo generada, por lo tanto, se procedió a variar la velocidad producida por el freno eléctrico y simulación de una baja frecuencia asemejando una falla de subfrecuencia en un sistema real.



Figura 33 Simulación Subfrecuencia

Fuente: Elaboración propia

Cuando el generador entregaba una frecuencia menor a la que estaba programada el relé activaba la opción 59 dando a conocer que el generador presentaba una falla de baja frecuencia (Subfrecuencia).



Figura 34 Baja frecuencia (Subfrecuencia) señal en relé

Fuente: Elaboración propia

Se podía observar en la tarjeta que la opción 59 Subfrecuencia quedaba activada, de esta manera en el momento de realizar una inspección de fallas, se podrá observar cual fue la última falla dentro del relé y sería más fácil de detectar.

4.2.3.5. Simulación de falla de Sobre frecuencia

El sistema elaborado tenía las siguientes características:

- Tensión de generación: 90V
- Frecuencia estable: 60Hz

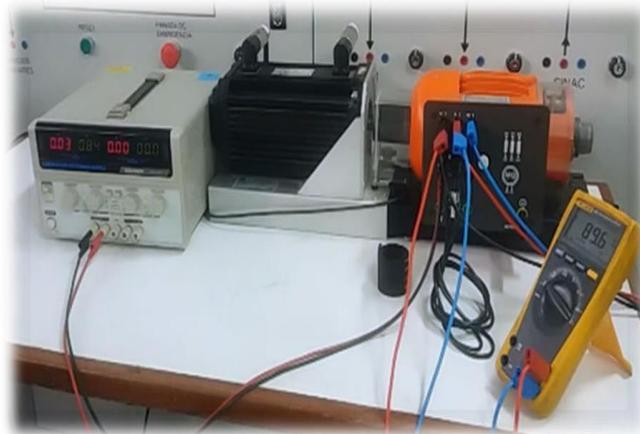


Figura 35 Conexión de funcionamiento para prueba de falla de Sobre frecuencia

Fuente: Elaboración propia

Para realizar esta simulación se tuvo que variar la frecuencia que se estaba generando, por lo tanto se procedió a variar la velocidad producida por el freno eléctrico y simularemos la sobre frecuencia produciendo una falla de Sobre frecuencia en un sistema real.



Figura 36 Sobre frecuencia

Fuente: Elaboración propia

Cuando el generador entregaba una frecuencia mayor a la que estaba programada el relé activaba la opción 81 dando a conocer que el generador presentaba una falla de Sobrefrecuencia.



Figura 37 Sobrefrecuencia

Fuente: Elaboración propia

Cuando el generador enviaba más cantidad de frecuencia de la programada el relé activaba su función 81 de Sobrefrecuencia, activando también el contacto de salida 21. Que se observaba en el Software IPSCOM.

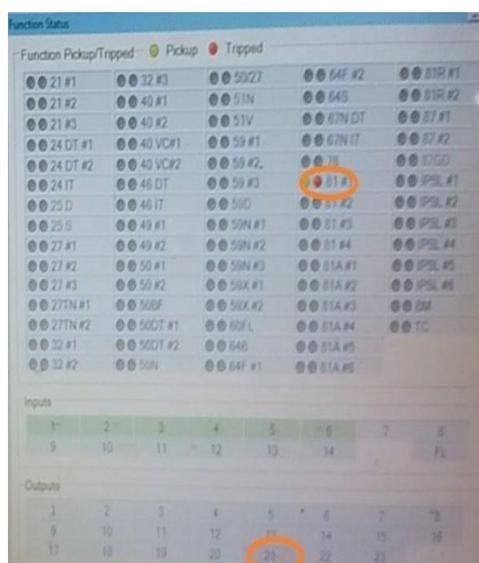


Figura 38 Sobrefrecuencia Software y Leds

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Prueba de hipótesis

Para la prueba de hipótesis utilizamos el diseño pre experimental planteado en el marco metodológico que implica la manipulación de variables controladas para observar sus efectos en el rendimiento del equipo.

Hipótesis de la investigación

La implementación del Relé de protección M-3452A tiene un impacto significativo en el OEE en generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia en empresas de generación eléctrica.

4.2.5. Resultados

Tabla 16 Resultados de las pruebas de falla

Prueba de Falla	Resultado
De Subtensión	Voltaje nominal = 90V Frecuencia nominal = 60Hz V = 85V Respuesta en relé, activación de la opción 27
De Sobretensión	Voltaje nominal = 90V Frecuencia nominal = 60Hz V = 100V Respuesta en relé, activación de la opción 59
De Subfrecuencia	Voltaje nominal = 90V Frecuencia nominal = 60Hz Frecuencia = 58Hz Respuesta en relé, activación de la opción 59
De Sobrefrecuencia	Voltaje nominal = 90V Frecuencia nominal = 60Hz Frecuencia = 65Hz Respuesta en relé, activación de la opción 81

Nota. Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 15, los valores nominales de tensión y frecuencia para las cuatro pruebas de fallo correspondían a 90V y 60Hz; siendo que, para la primera prueba de falla, Subtensión, se simuló un voltaje de 85V, siendo que el relé emitió una respuesta activándose la opción 27; por otro lado, para la prueba de sobretensión se simuló una tensión de 100V,

emitiéndose una respuesta en el relé a través de la opción 59. Por otro lado, también se procedió con la prueba de subfrecuencia simulándose una frecuencia de 58Hz, siendo que el relé emitió una activación de la opción 59; por último, para la prueba de sobrefrecuencia se simuló una frecuencia de 65Hz, siendo que el relé de protección emitió una respuesta activando la opción 81. De esta forma, se concluye que el relé M-3425A cumplía correctamente con la función de detectar condiciones anormales en un sistema eléctrico y tomar medidas de desconexión, aislamiento, reducción y activación de alarmas a fin de proteger los equipos de generación eléctrica.

Verificación de la eficiencia global de los equipos durante y posterior a la implementación del relé de protección M-3425A

Como se desarrolló previamente en el acápite correspondiente a la comprobación del funcionamiento del relé de protección M-3425^a, se llegó a la conclusión de que este dispositivo era capaz de cumplir correctamente con la función de detectar condiciones anormales en un sistema eléctrico y tomar medidas de desconexión, aislamiento, reducción y activación de alarmas a fin de proteger los equipos de generación eléctrica. En este sentido, se procedió a evaluar la eficiencia global de la línea de generación eléctrica de las empresas teniendo en cuenta la introducción de este dispositivo en la línea de generación eléctrica durante el segundo semestre del año 2023.

Tabla 17 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 7

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador A	Trifásico	45	Sobretensión durante tormenta eléctrica	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Transformador B	Trifásico	30	Subtensión debido a fluctuación en la red eléctrica	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Motor C	Trifásico	47	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento

Generador D	Trifásico	11	Sobrefrecuencia debido a falla en el regulador de voltaje	Averías	Disponibilidad
Compresor E	Trifásico	66	Baja tensión durante mantenimiento en la subestación	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Generador A	Trifásico	56	Interrupción de suministro debido a caída de postes eléctricos	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor F	Trifásico	31	Sobrecarga de corriente durante arranque	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 16 a raíz de la introducción del relé de protección se registraron una disminución sustancial en los tiempos de inactividad originados por la suscitación de fallas relacionadas con las seis grandes pérdidas; esto a su vez permitió la mejora en los índices de disponibilidad, rendimiento y calidad; lo que se traducía en una mejora de la Eficiencia Global de los Equipos.

Tabla 18 OEE de los equipos de generación eléctrica: Mes 7

Equipo	Porcentaje de Utilización	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Generador A	25%	192	0	101	0	192	91	91	100.00%	47.40%	100.00%	47.40%
Generador D	25%	192	11	0	0	181	181	181	94.27%	100.00%	100.00%	94.27%
Transformador B	25%	192	0	0	30	192	192	162	100.00%	100.00%	84.38%	84.38%
Motor C	7.5%	192	0	47	0	192	145	145	100.00%	75.52%	100.00%	75.52%
Motor F	7.5%	192	0	0	31	192	192	161	100.00%	100.00%	83.85%	83.85%
Compresor E	10%	192	0	0	66	192	192	126	100.00%	100.00%	65.63%	65.63%
Totales	100%	1152	11	148	127	1141	993	866	99.05%	87.03%	87.21%	75.17%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes siete se registraron un total de 1,152 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 11 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador D; mientras que se registraron un total de 148 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Generador A y el Motor C; por último, se registraron un total de 127 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en el Compresor E y Motor F respectivamente. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 75.17% durante el séptimo mes de análisis.

Tabla 19 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 8

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Transformador B	Trifásico	30	Sobretensión durante restablecimiento de red	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador C	Trifásico	4	Subfrecuencia debido a sobrecarga de la red eléctrica	Averías	Disponibilidad
Compresor D	Trifásico	36	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador E	Trifásico	24	Sobretensión debido a falla en el sistema de regulación	Averías	Disponibilidad
Motor F	Trifásico	42	Interrupción del suministro debido a corte de línea principal	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 18, durante el mes ocho en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes ocho.

Tabla 20 OEE de los equipos de generación eléctrica: Mes 8

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor D	192	0	36	0	192	156	156	100.00%	81.25%	100.00%	81.25%
Generador C	192	4	0	0	188	188	188	97.92%	100.00%	100.00%	97.92%
Generador E	192	24	0	0	168	168	168	87.50%	100.00%	100.00%	87.50%
Motor F	192	0	0	42	192	192	150	100.00%	100.00%	78.13%	78.13%
Transformador B	192	0	30	0	192	162	162	100.00%	84.38%	100.00%	84.38%
Totales	960	28	66	42	932	866	824	97.08%	92.92%	95.15%	85.83%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes ocho se registraron un total de 960 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 28 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador C y Generador E; mientras que se registraron un total de 66 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor D y Transformador B; por último, se registraron un total de 42 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha repetición de trabajos en el Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 85.83% durante el octavo mes de análisis.

Tabla 21 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 9

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador A	Trifásico	29	Subtensión debido a falla en el sistema de distribución	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Transformador B	Trifásico	46	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	52	Sobrecarga de corriente durante operación a plena carga	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad
Generador D	Trifásico	41	Interrupción del suministro debido a falla en el regulador	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Compresor E	Trifásico	27	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador A	Trifásico	24	Sobretensión durante restablecimiento de red	Averías	Disponibilidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 20, durante el mes nueve en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos

que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes nueve.

Tabla 22 OEE de la línea de generación eléctrica: Mes 9

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor E	192	0	27	0	192	165	165	100.00%	85.94%	100.00%	85.94%
Generador A	192	24	29	0	168	139	139	87.50%	82.74%	100.00%	72.40%
Generador D	192	0	0	41	192	192	151	100.00%	100.00%	78.65%	78.65%
Motor C	192	0	0	52	192	192	140	100.00%	100.00%	72.92%	72.92%
Transformador B	192	0	46	0	192	146	146	100.00%	76.04%	100.00%	76.04%
Totales	960	24	102	93	936	834	741	97.50%	89.10%	88.85%	77.19%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes tres se registraron un total de 960 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 24 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador A; mientras que se registraron un total de 102 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor E, Generador A y Transformador B; por último, se registraron un total de 93 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en el Generador D y en el Motor C. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 77.19% durante el noveno mes de análisis.

Tabla 23 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 10

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Transformador B	Trifásico	16	Subtensión debido a fluctuación en la red eléctrica	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	64	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador D	Trifásico	17	Sobrefrecuencia debido a falla en el regulador de voltaje	Averías	Disponibilidad
Compresor E	Trifásico	49	Baja tensión durante mantenimiento en la subestación	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Generador A	Trifásico	55	Interrupción de suministro debido a caída de postes eléctricos	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor F	Trifásico	18	Sobrecarga de corriente durante arranque	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 22, durante el mes diez en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes diez.

Tabla 24 OEE de generación eléctrica: Mes 10

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor E	192	0	0	49	192	192	143	100.00%	100.00%	74.48%	74.48%
Generador A	192	0	55	0	192	137	137	100.00%	71.35%	100.00%	71.35%
Generador D	192	17	0	0	175	175	175	91.15%	100.00%	100.00%	91.15%
Motor C	192	0	64	0	192	128	128	100.00%	66.67%	100.00%	66.67%
Motor F	192	0	0	18	192	192	174	100.00%	100.00%	90.63%	90.63%
Transformador B	192	0	16	0	192	176	176	100.00%	91.67%	100.00%	91.67%
Totales	960	17	135	67	1135	1000	933	118.23%	88.11%	93.30%	97.19%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes diez se registraron un total de 960 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 17 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador D; mientras que se registraron un total de 135 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Generador A, Motor C y Transformador B; por último, se registraron un total de 67 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en el Compresor E y Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 97.19% durante el décimo mes de análisis.

Tabla 25 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 11

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador B	Trifásico	30	Sobretensión durante restablecimiento de red	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	10	Subfrecuencia debido a sobrecarga de la red eléctrica	Averías	Disponibilidad
Compresor D	Trifásico	11	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador E	Trifásico	23	Sobretensión debido a falla en el sistema de regulación	Averías	Disponibilidad
Motor F	Trifásico	25	Interrupción del suministro debido a corte de línea principal	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 24, durante el mes 11 en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducían en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes 11.

Tabla 26 OEE de generación eléctrica: Mes 11

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor D	192	0	11	0	192	181	181	100.00%	94.27%	100.00%	94.27%
Generador B	192	0	30	0	192	162	162	100.00%	84.38%	100.00%	84.38%
Generador E	192	23	0	0	169	169	169	88.02%	100.00%	100.00%	88.02%
Motor C	192	10	0	0	182	182	182	94.79%	100.00%	100.00%	94.79%
Motor F	192	0	0	25	192	192	167	100.00%	100.00%	86.98%	86.98%
Totales	960	33	41	25	927	886	861	96.56%	95.58%	97.18%	89.69%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes seis se registraron un total de 960 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 33 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador E y Motor C; mientras que se registraron un total de 41 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor D y Generador B; por último, se registraron un total de 25 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en el Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 89.69% durante el onceavo mes de análisis.

Tabla 27 Fallas en los equipos de generación eléctrica: Mes 12

Equipo	Tipo	Tiempo de inactividad (horas)	Descripción de la falla	Tipo de Falla según las 6 grandes fallas	Indicador de OEE afectado
Generador A	Trifásico	44	Subtensión debido a falla en el sistema de distribución	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Transformador B	Trifásico	30	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Motor C	Trifásico	41	Sobrecarga de corriente durante operación a plena carga	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad
Generador D	Trifásico	53	Interrupción del suministro debido a falla en el regulador	Pérdidas de Puesta en Marcha	Calidad
Compresor E	Trifásico	62	Interrupción del suministro eléctrico por mantenimiento	Tiempo Muerto y Paradas Menores	Rendimiento
Generador A	Trifásico	12	Sobretensión durante restablecimiento de red	Averías	Disponibilidad
Motor F	Trifásico	25	Sobrecarga de corriente durante arranque	Defectos de Calidad y Repetición de Trabajos	Calidad

Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 26, durante el mes 12 en análisis se suscitaron una serie de fallas que afectaron a los índices de disponibilidad, calidad y rendimiento de la línea de generación eléctrica de las empresas; siendo que suscitaron fallas relacionadas con perturbaciones de tensión y frecuencia; lo que a su vez se traducía en la presentación de eventos que podían ser agrupados dentro de las 6 grandes pérdidas y de este modo relacionarse con el índice correspondiente. De esta forma se procedió a determinar el OEE global de la línea de generación eléctrica para el mes 12.

Tabla 28 OEE de generación eléctrica: Mes 12

Equipo	Tiempo planificado (A)	Tiempo de inactividad (1er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (2do grupo de las 6GP) en horas	Tiempo de inactividad (3er grupo de las 6GP) en horas	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
Compresor E	192	0	62	0	192	130	130	100.00%	67.71%	100.00%	67.71%
Generador A	192	12	44	0	180	136	136	93.75%	75.56%	100.00%	70.83%
Generador D	192	0	0	53	192	192	139	100.00%	100.00%	72.40%	72.40%
Motor C	192	0	0	41	192	192	151	100.00%	100.00%	78.65%	78.65%
Motor F	192	0	0	25	192	192	167	100.00%	100.00%	86.98%	86.98%
Transformador B	192	0	30	0	192	162	162	100.00%	84.38%	100.00%	84.38%
Totales	1152	12	136	119	1140	1004	885	98.96%	88.07%	88.15%	76.82%

Nota. Elaboración propia.

Durante el mes seis se registraron un total de 1,152 horas de tiempo planificado (A) correspondiente a una jornada laboral de 8 horas al día, 6 días por semana y 4 semanas por mes para cada equipo. Se registraron un total de 12 horas de inactividad relacionados con el primer grupo de las seis grandes pérdidas, producto de la suscitación de averías en el Generador A; mientras que se registraron un total de 136 horas de inactividad relacionadas con el segundo grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de tiempos muertos paradas menores, en el Compresor E, Generador A y Transformador B; por último, se registraron un total de 119 horas de inactividad relacionadas con el tercer grupo de las seis grandes pérdidas, ocasionadas por la suscitación de pérdidas de puesta en marcha y repetición de trabajos en Generador D, Motor C y Motor F. De esta forma se determinó el índice de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos y de la línea de generación eléctrica, obteniéndose una Eficiencia Global de los Equipos de 76.82% durante el onceavo mes de análisis.

Tabla 29 Resumen: Etapa previa a la instalación, etapa posterior a la instalación del relé de proyección M-3425A

Etapa	Periodo de análisis	Tiempo planificado (A)	Tiempo operativo (B)	Tiempo de funcionamiento (F)	Tiempo productivo (P)	D	R	C	OEE
PRE	Mes 1	1152	1116	938	781	96.88%	84.05%	83.26%	67.80%
	Mes 2	960	867	776	719	90.31%	89.50%	92.65%	74.90%
	Mes 3	960	916	779	661	95.42%	85.04%	84.85%	68.85%
	Mes 4	1152	1115	945	853	96.79%	84.75%	90.26%	74.05%
	Mes 5	960	867	796	756	90.31%	91.81%	94.97%	78.75%
	Mes 6	1152	1115	944	785	96.79%	84.66%	83.16%	68.14%
	Totales	6336	5996	5178	4555	94.63%	86.36%	87.97%	71.89%
POST	Mes 7	960	932	866	824	97.08%	92.92%	95.15%	85.83%
	Mes 8	960	936	834	741	97.50%	89.10%	88.85%	77.19%
	Mes 9	960	936	834	741	97.50%	89.10%	88.85%	77.19%
	Mes 10	1152	1135	1000	933	98.52%	88.11%	93.30%	80.99%
	Mes 11	960	927	886	861	96.56%	95.58%	97.18%	89.69%
	Mes 12	1152	1140	1004	885	98.96%	88.07%	88.15%	76.82%
	Totales	6144	6006	5424	4985	97.75%	90.31%	91.91%	81.14%

Nota. Elaboración propia

En la tabla 28 se muestra el resumen de los resultados de la Eficiencia Global de los Equipos (OEE) previos de la implementación del relé de protección M-3425A y posteriores a la implementación de este dispositivo. Siendo que, en una etapa pre implementación se obtuvo un índice de disponibilidad del 94.63%, un índice de rendimiento de 86.36% y un índice de calidad de 87.97%, lo que se tradujo en un OEE de 71.89% dentro de la categoría regular. Por otro lado,

en la implementación del relé de protección M-3425A durante un periodo de análisis semestral, se obtuvo un índice de disponibilidad de 97.75%; un indicador de rendimiento de 90.31% y un índice de calidad de 91.91%, traducándose en un OEE de 81.14%, representando una mejoría de 9.25% con respecto al OEE inicial sin tener en cuenta la introducción del relé de protección en la línea de generación eléctrica. Se concluye que, la introducción de este dispositivo mejoró el calificativo inicial de regular a aceptable, lo que también se traducía en una mejora en cuanto a las pérdidas económicas, pasando de una situación de pérdidas económicas a ligeras pérdidas económicas y una competitividad ligeramente baja.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El relé de protección M-3425A es un dispositivo que desempeña mucha versatilidad para la protección de equipos generadores, ya que además de enfocar su objetivo en la protección, también puede medir y controlar variables de los equipos.
- Los relés de protección son y serán considerados en una herramienta indispensable para poder analizar los actuales sistemas de potencia en las grandes industrias.
- Se logró implementar el relé de protección M-3425A para así determinar su impacto en el OEE en generadores de energía ante perturbaciones de tensión y frecuencia.
- Se logró comprobar el funcionamiento del relé M-3425A ante perturbaciones de tensión y frecuencia con el fin de asegurar la eficiencia global de los generadores de energía en empresas de generación eléctrica.
- Las pruebas de funcionamiento que se realizan al dispositivo de protección nos van a garantizar el correcto funcionamiento del mismo y serán de mucha ayuda para poder probar y proteger las principales variables de las maquinas generadoras.

5.2. Recomendaciones

- El relevador de protección para equipos generadores 3245A a pesar de ser un equipo de protección, también nos brinda funciones de medición de voltaje (cantidades de secuencia, de fase y neutro), potencia activa, reactiva, aparente, impedancia y factor de potencia.

- Para el uso correcto del relé debemos analizar sus características físicas y los parámetros de almacenamiento que será recomendable según la temperatura, humedad y ambiente que se encuentre.
- Las funciones de protección estándar que posee el relé son recomendables para el uso diario ante las desviaciones que pueden ocasionar pérdidas material y humana, considerando la exposición de riesgos que se tiene cuando se trabaja con máquinas generadoras de grandes niveles en el ámbito laboral.
- Cada función de protección del relé cuenta con un criterio de ajuste, pero debemos tomarlo como una guía porque el verdadero ajuste real para una óptima confiabilidad y seguridad de la maquina debe considerarse las condiciones en la que se encontrara una maquina generadora.

BIBLIOGRAFÍA

1. Morán, A y Valverde, J. *Modelamiento y simulación del conjunto disyuntor principal de potencia - relé de protección (CB-R) de una subestación eléctrica de distribución*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral : Tesis (Título de Ingeniero Eléctrico), 2022.
2. Becerra, L. *Estrategia de detección e identificación de fallas eléctricas para sistemas de distribución eléctrica con generación distribuida basado en redes neuronales artificiales*. Tesis (Título de Ingeniero Eléctrico) : Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2023.
3. *Detección y diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de potencia (SEP) combinando lógica difusa, métricas y una red neuronal probabilística*. Hernández, C, Nieto, J y Carrum, E. 72, s.l. : Computing Science.
4. *Análisis y simulación de las protecciones eléctricas del generador de la central hidroeléctrica 12 de septiembre*. Ciudad Universitaria (Universidad de El Salvador) : Tesis (Título de Ingeniero Electricista), 2021.
5. Bernaola, G. *Configuración y regulación de relé de protección para arrancador síncrono en planta de procesos*. Arequipa: Universidad Continental : Tesis (Título de Ingeniero Electricista), 2022.
6. Murillo, J. *Protección con ajustes de los relés para obtener alta confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia*. Callao: Universidad Nacional del Callao : Tesis (Título de Ingeniero Electricista), 2020.
7. Calderón, A. *Análisis de calibración de los relés para mejorar el sistema de protección de configuración en anillo de la mina*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú : Tesis (Título de Ingeniero Electricista), 2021.
8. Velarde, G. *Estudio de las perturbaciones armónicas en la calidad de energía eléctrica en la Universidad de Piura - campus Lima*. Piura: Universidad de Piura : Tesis (Título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico), 2022.
9. *Metodología de diagnóstico de perturbaciones en la calidad de potencia usando la Transformada S*. Ramírez-Murillo, H, y otros. 2, s.l. : Revista UIS ingenierías, 2020, Vol. 20.

2145-8456.

10. *Análisis de la trayectoria de la impedancia de falla vista por el relé de distancia en sistemas eléctricos ante oscilaciones de potencia*. Betancourt, D. Ecuador : Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Ecuador, 2023. 508-2019.

11. Encala, P y Tonato, M. *Coordinación de protecciones en sistemas eléctricos de distribución, mediante el uso de Relés SEL-751*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana : Tesis (Título de Ingeniero Eléctrico), 2023.

12. Cabrera, E. *Diseño y Actualización de los Sistemas de Protección y Medición de las Unidades de la C.H. Malpaso*. México : Instituto Tecnológico de México, 2015.

13. Beckwith Electric Co., Inc. *Manual de instrucciones M-3425A*. Largo, Florida U.S.A : s.n., 2013. 800-3425A-IB-07.

14. Rodríguez, J. *Nuevo sistema de Gestión de Eficiencia Global (OEE) en tiempo real para industria*. Valencia. Tesis (Magister en Ingeniería de Telecomunicación): Universidad Politécnica de Valencia, 2019.

15. BLAUDENERGY. BLAUDENERGY. *¿Qué es el indicador Energy OEE?* [En línea] GrowBy, 15 de Octubre de 2021. <https://www.blaudenergy.com/que-es-el-indicador-energy-oee-efectividad-total-de-los-equipos/>.

16. *Perturbaciones en el sistema eléctrico y formas de mitigarlo*. Gonzales, V. Lima : Silicon Technology, 2017.

17. Salicru. Salicru S. A. [En línea] MONTAWEB.com, 2024. <https://www.salicru.com/pe-es/principales-tipos-de-perturbaciones-electricas.html>.

18. Anónimo. *Estudio y analisis de fallas*. [En línea] 2015. [Citado el:] <https://www.yumpu.com/es/document/read/51397464/capitulo-5-estudio-y-analisis-de-fallas-51-introduccion>.

ANEXOS

ANEXO 01

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Kevin Josimar Gomez Condori identificado (a) con DNI N° 71314784 y con domicilio en Calle México 320 José Luis Bustamante y Rivero, DECLARO BAJO JURAMENTO, que he sido autorizado por TECSUP Arequipa para poder utilizar planos, fotos, imágenes, diagramas eléctricos, diagramas electrónicos, softwares, licencias y simuladores utilizados por TECSUP Arequipa en mi tesis titulada: "IMPLEMENTACIÓN DEL RELÉ DE PROTECCIÓN M-3425A Y SU IMPACTO EN EL OEE EN EQUIPOS GENERADORES DE ENERGÍA ANTE PERTURBACIONES DE TENSIÓN Y FRECUENCIA EN EMPRESAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA".

También DECLARO BAJO JURAMENTO que la información consignada en mi tesis, fue elaborada por mi persona mediante un **proyecto integral de final de carrera denominado capstone, realizado en el instituto TECSUP Arequipa**, adjunto mi certificado de egresado como evidencia de lo mencionado.

Suscribo la presente Declaración Jurada, en virtud a lo dispuesto me sujeto a las responsabilidades civiles, penales y administrativas que correspondan, en caso de que mediante cualquier acción de verificación posterior se compruebe su falsedad.

Arequipa, 19 de abril de 2024



Firma



Kevin Josimar Gomez Condori

71314784

Anexo 02

Certificado de Egresado Tecsup



R.M. 0181-93-ED
REVALIDACIÓN R.D. 146-2005-ED del 26-05-2005
Instituto de Educación Superior Tecnológico Privado TECSUP N° 2

Diploma de Egresado

N° 1889

Otorgado a:

KEVIN JOSIMAR GOMEZ CONDORI

Al haber aprobado el contenido del Plan Curricular para obtener el Título de:

Profesional Técnico en

Electrotecnia Industrial

Arequipa, 02 de febrero del 2017


DIRECCIÓN GENERAL
JUAN M. GARZA-CALDERÓN BARREDA
Director General


DIRECCIÓN DOCENTE
ANTONIO LAZO DE LA VEGA VELARDE
Director Docente