



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**PROTECCIONES ADAPTIVAS DE
SOBRECORRIENTE APLICADAS A SISTEMAS
ELÉCTRICOS INDUSTRIALES**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO**

**PRESENTA:
JORGE ARMANDO GARCIA BARRON**

**ASESOR:
Dr. Luis Cisneros Villalobos**



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Cuernavaca, Morelos 2021

Resumen

En este trabajo de tesis se propone un esquema de protección adaptivo a base de relevadores digitales de sobrecorriente a un sistema eléctrico industrial, el esquema de protección propuesto aumentará la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico, debido a que, las protecciones adaptivas tienen la posibilidad de cambiar sus parámetros de ajuste (tiempo y corriente) en tiempo real, lo cual ayuda a mejorar la coordinación de las protecciones en aquellos momentos en que el sistema eléctrico modifique su topología de red.

Los relevadores adaptivos de sobrecorriente, son dispositivos electrónicos inteligentes los cuales se asemejan a una microcomputadora, la cual posee funciones de protección que le permiten modificar sus parámetros de ajuste si así lo requiere. Este tipo de protección permite mejorar considerablemente la coordinación de protecciones, debido a que poseen algoritmos de protección que les permiten modificar sus parámetros de ajuste en tiempo real de acuerdo a la topología de red.

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones con el software ETAP del esquema de protección propuesto, son satisfactorios, debido a que, el sistema eléctrico actual puede mejorar la coordinación de las protecciones en los tableros principales al contar con este novedoso sistema, además de que, se logran adquirir protecciones dinámicas en tiempo real lo cual ayuda a deshacerse de la necesidad de realizar un cálculo y reajuste manual cada vez que hay una modificación considerable dentro del sistema eléctrico.

Abstract

In this thesis work an adaptive protection scheme is proposed based on digital overcurrent relays to an industrial electrical system, the proposed protection scheme will increase the reliability and safety of the electrical system, because adaptive protections have the possibility of change its adjustment parameters (time and current) in real time, which helps to improve the coordination of the protections in those moments in which the electrical system modifies its network topology.

Adaptive overcurrent relays are intelligent electronic devices that resemble a microcomputer, which has protection functions that allow you to modify its adjustment parameters if required. This type of protection allows to considerably improve the coordination of protections, this is due to the fact that they have protection algorithms that allow them to modify their adjustment parameters in real time according to the topology presented by the electrical system.

The results obtained by simulations with the ETAP software of the proposed protection scheme are satisfactory, since the current electrical system can improve the coordination of the protections on the main panels by having this novel system, in addition to the fact that It manages to acquire dynamic protections in real time that helps to get rid of the need to perform a calculation and manual reset every time there is a considerable modification within the electrical system.

ÍNDICE

Resumen	i
Abstract.....	ii
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Glosario.....	viii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Justificación	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Hipótesis	3
1.4 Estado del arte	3
1.5 Estructura de la tesis	6
Capítulo 2 Análisis de cortocircuito	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Fallas en los sistemas eléctricos.....	9
2.2.1 Tipos de fallas	10
2.3 Elementos que contribuyen al cortocircuito.....	12
2.4 Puntos a considerar para los estudios de cortocircuito	14
2.5 Metodologías de cálculo de cortocircuito	16
2.5.1 Método punto a punto.....	16
2.5.2 Método de las potencias	18
2.5.3 Método de la matriz de impedancias Z bus.....	20
2.5.4 Método de las componentes simétricas	20
2.6 Solución por software.....	23
Capítulo 3 Protecciones de sobrecorriente	24
3.1 Introducción.....	24

3.2	Elementos de protección de sobrecorriente en sistemas eléctricos industriales	25
3.2.1	Fusibles.....	25
3.2.2	Interruptores	26
3.2.3	Relevadores de sobrecorriente	27
Capítulo 4 Coordinación de protecciones.....		30
4.1	Introducción.....	30
4.2	Curvas características de protección	31
4.3	Funciones en las protecciones de sobrecorriente.....	33
4.4	Consideraciones técnicas para la coordinación de protecciones.....	35
Capítulo 5 Protecciones adaptivas		36
5.1	Introducción.....	36
5.2	Principio de funcionamiento	40
5.3	Relevadores de sobrecorriente y funciones adaptivas	44
Capítulo 6 Ejemplo práctico de protecciones adaptivas aplicado a un sistema eléctrico industrial		46
6.1	Introducción.....	46
6.2	Descripción del sistema eléctrico.....	47
6.3	Consideraciones para la implementación de protecciones adaptivas de sobrecorriente.....	48
6.4	Modelado del sistema eléctrico.....	49
6.5	Análisis de los resultados de las simulaciones.....	55
6.6	Esquema de protección propuesto	56
6.7	Resultados del esquema de protección propuesto	57
Capítulo 7 Conclusiones generales y trabajos futuros.....		63
7.1	Conclusiones generales	63
7.2	Trabajos futuros	63
Referencias		64

Índice de figuras

Figura 1. Relevador electromecánico de sobrecorriente GE IAC51B.....	4
Figura 2. Oscilograma de corrientes de cortocircuito.	12
Figura 3. Curvas características de la relación de las reactancias y sus respectivas corrientes en los estados subtransitorio, transitorio y de estado permanente.	13
Figura 4. Comportamiento de la corriente durante un transitorio de cortocircuito.	14
Figura 5. Conjunto de fasores de las componentes simétricas	21
Figura 6. Elementos básicos de un sistema de protección contra fallas.	24
Figura 7. Diagrama de flujo de la lógica de un sistema de protección.	25
Figura 8. Ejemplo de fusibles y curvas característica tiempo vs corriente de los fusibles.	26
Figura 9. Curvas de los relevadores de acuerdo al tiempo de operación.....	32
Figura 10. Ejemplo del tiempo de despeje de falla en sistema radiales	34
Figura 11. Ejemplo de coordinación de relevadores por discriminación de corriente.	34
Figura 12. Microrred con diferentes fuentes de generación distribuida.	36
Figura 13. Sistema eléctrico alimentado solamente por el suministrador de energía.	37
Figura 14. Sistema eléctrico con dos fuentes de alimentación.....	38
Figura 15. Sistema eléctrico alimentado solamente por el generador.....	39
Figura 16. Diagrama de bloques de una microcomputadora.....	41
Figura 17. Diagrama de bloques de un convertidor A/D.....	41
Figura 18. Esquema de transferencia de bits en paralelo y en serie.....	42
Figura 19. Coordinación de relés de sobrecorriente en un sistema radial.....	45
Figura 20. Diagrama unifilar simplificado del sistema eléctrico industrial.....	47
Figura 21. Escenario 1. Sistema eléctrico en operación normal.....	50

Figura 22. Escenario 2. Sistema eléctrico operando con la máxima capacidad....	51
Figura 23. Escenario 3. Sistema eléctrico operando sin un transformador (mantenimiento).	51
Figura 24. Escenario 4. Sistema eléctrico en operación normal sin el suministro de CFE.	52
Figura 25. Escenario 5. Sistema eléctrico operando con la máxima capacidad y sin el suministro de CFE.	52
Figura 26. Escenario 6. Sistema eléctrico operando sin un transformador (mantenimiento) y sin el suministro de CFE.	53
Figura 27. Escenario 7. Sistema eléctrico en operación normal más el generador de emergencia.	53
Figura 28. Escenario 8. Sistema eléctrico operando con la máxima capacidad más el generador de emergencia.	54
Figura 29. Escenario 9. Sistema eléctrico operando sin un transformador (mantenimiento) más el generador de emergencia.	54
Figura 30. Esquema de protección adaptivo propuesto para el sistema eléctrico.	56
Figura 31 Ajuste actuales de los interruptores en el tablero Bus-2.	58
Figura 32 Ajuste actuales de los interruptores alojados en el tablero Bus-3.	58
Figura 33. Ajustes actuales de las protecciones CB2, CB3, CB7, F1 Y F3.	59
Figura 34. Ajustes actuales de las protecciones CB1, CB3, CB9, F1 Y F2.	59
Figura 35. Ajustes actuales de las protecciones CB1, CB7, CB12.	60
Figura 36 Ajustes propuestos del relevador adaptivo Relay 1.	61
Figura 37 Ajustes propuestos de los relevadores adaptivos Relay 1,2 y 3.	62

Índice de tablas

Tabla 1. Diferencias entre los estándares IEC-60909 y ANSI/IEEE C37.010.	9
Tabla 2. Principales causas de fallas en los sistemas eléctricos.....	10
Tabla 3. Valores para la constante C	17
Tabla 4. Circuitos equivalentes de secuencia cero de acuerdo a la configuración de los devanados de un transformador.	23
Tabla 5. Relevadores de sobrecorriente de acuerdo a su aplicación	31
Tabla 6. Constantes de la ecuación del estándar IEC.....	33
Tabla 7. Constantes de la ecuación del estándar ANSI	33
Tabla 8. Resultado de las magnitudes de corriente de cortocircuito de las simulaciones.....	39
Tabla 9. Escenarios de operación considerados en la simulación de cortocircuito en ETAP	50
Tabla 10. Resultados de corrientes de cortocircuito.....	55

Glosario

Aislamiento: Material con escasa capacidad de conducción de la electricidad utilizado para separar partes portadoras de corriente eléctrica.

Algoritmo: Secuencia o conjunto de instrucciones que siguen un orden para obtener la solución de un determinado problema.

Alimentador: Conductor eléctrico encargado de suministrar toda la corriente que un grupo de cargas consume, se puede decir que es el conductor principal que viene del transformador para alimentar un edificio y llega hasta el interruptor general en el centro de cargas.

Capacidad Interruptiva: Se define como la corriente de falla máxima que el interruptor puede eliminar sin ser dañado, esta debe ser igual o mayor a la corriente de cortocircuito calculada.

Carga agrupada: Conjunto de cargas combinadas

Central de generación eléctrica: Instalación y equipo que en un sitio determinado permiten generar energía eléctrica y productos asociados

Diagrama unifilar: Representación gráfica integral y sencilla del sistema eléctrico, en la cual se indican las subestaciones, transformadores, tableros, circuitos alimentadores y derivados, así como la interconexión entre ellos.

Dispositivos electrónicos Inteligentes: Son aquellos dispositivos electrónicos que por lo general están conectados a otros dispositivos o redes a través de diferentes protocolos como Bluetooth, NFC, Wi-Fi, 3G, X10, etc., que puede funcionar hasta cierto punto de forma interactiva y autónoma.

Elementos pasivos: Los elementos pasivos son aquellos componentes de los circuitos, que disipan o almacenan energía eléctrica o magnética, entre ellos destacan las resistencias, condensadores e inductores.

Energía renovable: Son aquellas fuentes de energía basadas en la utilización de recursos naturales como: sol, viento, agua, biomasa vegetal o animal. Se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles, sino recursos naturales capaces de renovarse ilimitadamente.

Esquema de protección: Es un grupo o arreglo de dispositivos que se interconectan o interrelacionan para proteger a los equipos eléctricos primarios, detectando condiciones anormales de operación para evitar o reducir daños mayores al elemento primario.

Generación distribuida: Consiste en la generación de energía eléctrica mediante muchas pequeñas fuentes de generación que se instalan cerca de los puntos de consumo. La generación distribuida se basa en la cooperación entre esta micro generación y la generación de las centrales convencionales.

Instalación Eléctrica: Se le llama instalación eléctrica al conjunto de elementos que permiten transportar y distribuir la energía eléctrica, desde el punto de suministro hasta los equipos que la utilicen. Entre estos elementos se incluyen: tableros, interruptores, transformadores, bancos de capacitores, dispositivos, sensores, dispositivos de control local o remoto, cables, conexiones, contactos, canalizaciones y soportes.

Microprocesador: Es un circuito integrado que incorpora en su interior una unidad central de proceso y todo un conjunto de elementos lógicos que permiten enlazar otros dispositivos como memorias, puertos de entrada y salida, formando un sistema completo para cumplir con una función específica.

Protección eléctrica: Dispositivo automático diseñado para proteger a los equipos eléctricos primarios, detectando condiciones anormales de operación para evitar o reducir daños mayores al elemento primario.

Reactancia: Es la resistencia de un inductor o capacitor ideal para una corriente alterna, denominados reactancia inductiva y reactancia capacitiva, respectivamente, no es constante y es dependiente de la frecuencia.

Sistema Eléctrico Nacional: El sistema integrado por la red nacional de transmisión, las redes generales de distribución, las centrales eléctricas que entregan energía eléctrica a la red nacional de transmisión o a las redes generales de distribución, los equipos e instalaciones del CENACE utilizados para llevar a cabo el control operativo del sistema eléctrico nacional y los demás elementos que determine la secretaría de energía.

Software: Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.

Suministrador: Compañía de servicio público (CFE) o autorizada por la LSPEE, encargada del abastecimiento de energía eléctrica para su utilización.

Transformador de corriente: Es aquel que permite reducir la corriente de línea a un nivel seguro para su utilización de instrumentos o aparatos de medida.

Transformador de potencial: Es aquel que permite reducir el voltaje a un nivel seguro para su utilización de instrumentos o aparatos de medida.

Transformadores de instrumento: Son aquellos transformadores de medida y protección los cuales pueden llevar señales de tensión y corriente de un valor proporcional muy inferior al valor nominal a los dispositivos de medida y protección.

Unidad electrógena: Dispositivo eléctrico capaz de generar energía eléctrica mediante un motor accionado por combustión interna.

Capítulo 1

Introducción

La energía eléctrica es lo que mueve al mundo, gracias a la energía eléctrica podemos tener una vida cómoda, la cual era inimaginable antes del siglo XX. Los grandes avances en la tecnología han permitido desarrollar dispositivos eléctricos y electrónicos que nos ayudan a realizar nuestras actividades diarias de una manera más eficiente. Un claro ejemplo, es que gracias a la energía eléctrica tenemos bombeo de agua potable, alumbrado público, telefonía, internet, televisión, servicios médicos avanzados, etc.

Llevar la energía eléctrica a los diferentes puntos en donde se requiere conlleva un gran desafío, debido a que se necesita el proceso de generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica para que de esta forma sea posible su utilización en los hogares, industrias y servicios públicos; una vez que se logra cumplir con esto, se tiene la necesidad de que este servicio sea confiable, continuo, seguro y de bajo costo.

Para poder cumplir con la necesidad de que la energía eléctrica sea confiable, continua y segura, las grandes empresas que se encargan de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica se ven obligadas a contar con la herramienta y tecnología necesaria para poder cumplir con lo previamente mencionado. Uno de los elementos más importantes que proporcionan confiabilidad, continuidad y seguridad en los sistemas eléctricos son las protecciones eléctricas, las cuales deben ser adecuadamente seleccionadas y ajustadas por personal capacitado, debido a que, estas protegen a los dispositivos y al personal de las instalaciones frente a fallas eléctricas.

De acuerdo con la reforma energética mexicana, la cual se aprobó el 20 de diciembre del 2013 se creó un mercado eléctrico mayorista, permitiendo la libre competencia e inversión en el sector eléctrico. Debido a esto, se están instalando nuevos centros de generación de energía eléctrica a lo largo del país. Todos estos cambios están contribuyendo a que la red eléctrica cambie y pase de ser una red ramificada o radial a ser micro redes, en las cuales se tenga generación distribuida a lo largo de la red eléctrica, lo que implica que se tengan flujos eléctricos en distintas direcciones, afectando en algunas zonas la coordinación de las protecciones.

El presente trabajo de tesis tiene como principal propósito dar a conocer el principio de operación de las protecciones eléctricas adaptivas de sobrecorriente, así como proponer estas a un sistema eléctrico industrial, debido a que, en la actualidad nuestro país está teniendo cambios en el sistema eléctrico nacional, principalmente por la adición de centrales de generación por fuentes renovables (eólicas, solares, hidroeléctricas, etc.).

1.1 Justificación

En el sistema eléctrico nacional están ocurriendo cambios de regulación en materia de generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica a consecuencia de la reforma energética, por lo cual sería conveniente empezar a modernizar los sistemas de protecciones con los que se cuenta actualmente, y de esta manera evitar futuras fallas o desconexiones que pueden desencadenar problemas de operación en el sistema eléctrico nacional o bien en las instalaciones eléctricas industriales.

Teniendo en cuenta que las fallas no se pueden prever en los sistemas eléctricos, se debe tener principal atención a la hora de seleccionar los elementos que protegen a cada parte del sistema o instalación eléctrica; los transitorios o fallas eléctricas pueden provocar efectos como: esfuerzos mecánicos, térmicos o en el peor escenario, la pérdida de sincronismo de los generadores, es por eso de la importancia de establecer sistemas de protección modernos que aminoren el daño causado por las fallas eléctricas, los cuales tengan mayor rapidez y mejor selectividad que las protecciones actuales.

De manera que, en los próximos años es factible comenzar a implementar protecciones eléctricas las cuales no solamente cumplan con el objetivo de salvaguardar vidas humanas o de proteger a los equipos e instalaciones ante las fallas que se puedan presentan, sino que también sería benéfico para los sistemas eléctricos la implementación de protecciones automáticas, inteligentes y capaces de adaptarse en tiempo real a las condiciones del sistema al cual estén protegiendo, es decir, que tengan la capacidad que poder cambiar automáticamente sus valores de ajuste dependiendo la configuración y operación del sistema eléctrico.

Las protecciones adaptivas de sobrecorriente son la solución a lo planteado en el párrafo anterior, esto se debe a que las protecciones adaptivas son protecciones inteligentes que permiten tener un sistema eléctrico mejor protegido en comparación con las protecciones convencionales (mecánicas y de estado sólido), debido a que estas permiten modificar sus parámetros de ajuste dinámicamente, lo cual aporta al sistema de protección una mejor coordinación para los diferentes escenarios de operación que se presenten en el sistema eléctrico.

Al contar con este nuevo sistema de protección, se logra adquirir protecciones dinámicas en tiempo real que ayuda a deshacerse de la necesidad de realizar un cálculo y reajuste manual cada vez que hay una modificación considerable dentro del sistema eléctrico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un esquema de protección a base de relevadores adaptivos de sobrecorriente a un sistema eléctrico industrial.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información técnica sobre el uso de los relevadores de sobrecorriente adaptivos, que permita ser la base del esquema de protección propuesto.
- Localizar cuales son los puntos óptimos donde se situarán las protecciones adaptivas.
- Obtener un modelo de red en el software ETAP.
- Realizar simulaciones de cortocircuito y coordinación de protecciones con el esquema de protección actual y el esquema de protección propuesto.
- Analizar si es conveniente la implementación de protecciones adaptivas al sistema eléctrico actual.

1.3 Hipótesis

La implementación de protecciones adaptivas es una solución para la coordinación y protección de los sistemas eléctricos con topologías cambiantes.

1.4 Estado del arte

De acuerdo al *“Programa de ampliación y modernización de la red nacional de transmisión y redes generales de distribución del mercado eléctrico mayorista (PRODESEN 2019 – 2033)”* el crecimiento de la demanda de energía eléctrica aumenta anualmente y con ello el desafío de tener un sistema eléctrico que sea confiable, continuo y seguro. La necesidad de mantener un sistema eléctrico con las características antes mencionadas incita a desarrollar herramientas que ayuden a combatir las fallas que se pueden presentar en el sistema eléctrico.

Una herramienta fundamental que proporciona confiabilidad, continuidad y seguridad en los sistemas eléctricos, son las protecciones eléctricas, estas las podemos encontrar en diferentes tamaños y capacidades, según sean las necesidades del sistema que se requiera proteger.

La primera protección que se empleó en los sistemas eléctricos y que aún en la actualidad se sigue utilizando por su gran efectividad para aislar fallas eléctricas, es el fusible; este elemento de protección se ubica en serie con el circuito a proteger y consta de un material en forma de filamento o lamina, el cual posee un

punto de fusión bajo que, al ser sometido a corrientes elevadas, se funde debido al efecto Joule logrando así aislar la falla eléctrica.

A pesar de que se siguen usando los fusibles como un medio de protección, estos tienen la gran desventaja de que solo pueden utilizarse una sola vez, debido a su propiedad de destrucción, por lo que deben ser reemplazados cada vez que ocurra una falla eléctrica.

Para poder solucionar la problemática de reemplazar los fusibles cada vez que suceda una falla, se desarrollaron los primeros interruptores de potencia automáticos que se accionaban por sobrecarga o baja tensión. Tiempo después en el año 1900 [1] se empezaron a desarrollar las primeras protecciones automáticas de distancia, direccional, sobrecorriente, diferencial, etc. Las cuales incluían un relevador de protección independiente del interruptor de potencia, estas protecciones eran electromecánicas y el principio de funcionamiento se basaba en la atracción electromecánica o inducción electromecánica.

Los interruptores con relevador de inducción electromecánicos (figura 1), se basan en girar un disco por medio de la inducción que se genera al pasar una corriente por la bobina del relevador, es decir, si la corriente sobrepasaba el punto de arranque también conocido como tap o pick up, el cual es la referencia para que el relevador entre en operación, el disco comenzará a desplazarse hasta que cierre el contacto de disparo, mandando así una señal o alarma que indique que disparó la protección [2] [4].

El tiempo que tarda en disparar la protección será inversamente proporcional a la corriente que circule por la bobina del relevador; este tiempo podrá ser ajustado por el ángulo del desplazamiento del disco llamado dial.

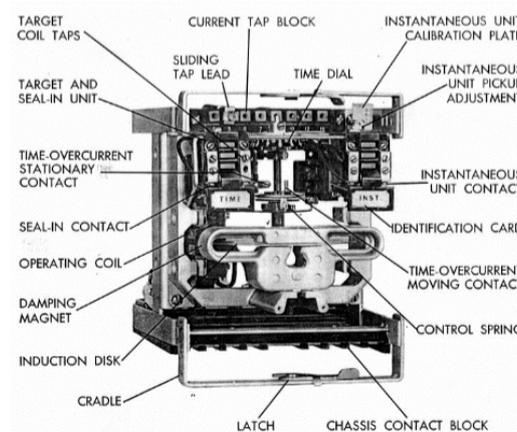


Figura 1. Relevador electromecánico de sobrecorriente GE IAC51B.

Varios años más tarde con la llegada de nuevas tecnologías como los circuitos integrados, amplificadores operacionales, transistores y entre otros dispositivos electrónicos más; dieron la oportunidad de desarrollar las protecciones de estado sólido, las cuales no contienen piezas móviles, ofreciendo así, una mayor sensibilidad, tiempo de respuesta más rápido, menor tamaño, operación silenciosa y con un mantenimiento menor en comparación con las protecciones electromecánicas [2].

Por lo antes descrito, las protecciones de estado sólido presentan mayores ventajas respecto a las protecciones electromecánicas; pero a pesar de ello, las protecciones de estado sólido en la actualidad se han estado reemplazando por las protecciones con relevadores digitales, esto debido, a que los relevadores digitales son multifunción, lo cual permite tener una mayor versatilidad a la hora de la detección de las fallas eléctricas.

Las protecciones con relevadores digitales cuentan con microprocesadores, que en conjunto con los algoritmos de protección, tienen la gran ventaja de detectar diferentes tipos de fallas (corriente, tensión, frecuencia, falla a tierra y otras dependiendo de las características del propio relevador) y mandar señales de disparo a uno o varios interruptores en forma local o remota, además de guardar información de algunos ciclos antes y durante la falla, esto último con la finalidad de detectar la posible causa.

Todo lo anterior demuestra que los relevadores digitales son dispositivos que permiten tener diferentes funciones de protección, medición, control y supervisión en un solo dispositivo [2].

La tendencia para los próximos años es la implementación de protecciones adaptativas, las cuales cuentan con microprocesadores que poseen la capacidad de alterar o cambiar sus parámetros de operación en cualquier momento, ya sea por decisión propia o por orden de un equipo externo, esto último, con el fin de adecuarse al cambio de topología que presente el sistema [1].

Esta tecnología no es nueva debido a que afines de 1960 [2] se propuso el uso de un programa para realizar las funciones de un relevador de protección en una subestación eléctrica, el cual mediante operaciones lógicas detectara la falla, la localizara e iniciara la acción adecuada en los interruptores, debido a que no existían las herramientas necesarias en esa época no se logró llevar a cabo dicha idea.

Ahora con el avance de la tecnología ya es posible crear una protección eléctrica que permita proteger al sistema con una mejor velocidad de respuesta, mayor confiabilidad y seguridad; debido a que las investigaciones han demostrado que esto es posible de realizar si se toma en consideración una operación más detallada del sistema a proteger e información de falla a través de la red de comunicación [2].

1.5 Estructura de la tesis

Capítulo 1. Se presenta una introducción de la importancia de las protecciones eléctricas, además se hace mención de cómo está cambiando el sistema eléctrico en México. Por otra parte, se menciona en el estado del arte, la cronología de cómo han evolucionado las protecciones eléctricas describiendo brevemente sus componentes y su funcionamiento con el fin de justificar la importancia del por qué se realiza este trabajo de tesis.

Capítulo 2. Se da a conocer la importancia del estudio y análisis de cortocircuito en los sistemas eléctricos, se mencionan los diferentes tipos de fallas que pueden presentarse, así como sus posibles causas, además se indican los elementos y componentes a considerar al momento de realizar el estudio de cortocircuito, así como los métodos y estándares que se pueden aplicar.

Capítulo 3 y 4. Se menciona brevemente los diferentes elementos de protección de sobrecorriente que pueden utilizarse en un sistema eléctrico, así como las curvas de operación; además se sugiere un procedimiento y consideraciones técnicas que se debe tener en cuenta al momento de realizar la coordinación de protecciones.

Capítulo 5. Se describe y explica que es una protección de sobrecorriente adaptiva, cuáles son los componentes que la conforman y como puede influir en los sistemas eléctricos actuales; se mencionan diferentes trabajos en donde se incluyen protecciones adaptivas de sobrecorriente, los cuales son las base para realizar el ejemplo práctico de protecciones adaptivas aplicado a un sistema eléctrico industrial.

Capítulo 6. En este capítulo se propone un sistema de protección adaptivo a un sistema eléctrico industrial a partir del análisis de las magnitudes de corriente de cortocircuito simuladas en el software ETAP; se realiza un ejercicio en donde se muestra el impacto que tendría el esquema de protección propuesto en el sistema eléctrico actual.

Capítulo 7. Se realizan las conclusiones generales, comentarios y sugerencias para realizar trabajos futuros de este trabajo de tesis.

Capítulo 2

Análisis de cortocircuito

2.1 Introducción

De acuerdo con la Norma internacional IEC-60909 se define un cortocircuito como: aquel camino conductor accidental o intencionado entre dos o más partes conductoras, que fuerza a que la diferencia de potencial entre ellas sea igual o próxima a cero. Conforme a la anterior definición, el cortocircuito puede ser accidental o controlado, de tal manera que, cuando este no es controlado y la resistencia del circuito es muy pequeña, la corriente que fluye por este puede ser muy alta alcanzando valores de kilo Amperes, ocasionando severos daños a la instalación, equipos y al personal cercano a la falla. A continuación, se presentan los efectos que puede sufrir un sistema o instalación eléctrica debido a un cortocircuito [10].

Corrientes elevadas que pueden producir:

- Calentamiento, el cual cuando es excesivo hace que disminuya la vida útil de los elementos del sistema, debido a que pierden su nivel de aislamiento en los devanados de los transformadores, motores, conductores, etc.
- Esfuerzos electromecánicos que pueden romper los aisladores o conductores.

Caída de tensión que puede producir:

- Desconexión de motores debido a la caída de contactores.
- Efecto de sobretensión que se presenta en ciertos tipos de falla que dependiendo del grado de aterrizaje del sistema en el punto de falla se pueden originar aumentos en la tensión de las fases sanas.

Riesgo en la estabilidad del sistema:

- El cortocircuito amenaza con romper el sincronismo de los generadores del sistema, al producir un cambio importante en las condiciones operativas; esto es ocasionado por las exigencias de energía que el cortocircuito efectúa a los generadores del sistema, estas exigencias dependen de las distancias del generador al punto del cortocircuito (falla), así que los generadores más cercanos al punto de falla contribuyen en mayor porcentaje.

El análisis de cortocircuito en los sistemas eléctricos, permite conocer las grandes magnitudes de corriente que pueden fluir a través del sistema eléctrico en el momento de ocurrencia de una falla eléctrica, el comportamiento de la corriente durante la duración de la misma y los esfuerzos a los que se enfrentan los

componentes y equipos del sistema eléctrico. Conocer las circunstancias de cómo se origina, que elementos intervienen y que factores son los que influyen durante el cortocircuito, permite que el personal capacitado pueda seleccionar adecuadamente la capacidad y ajuste necesario de las protecciones para cada equipo o elemento del sistema eléctrico, evitando de esta manera daños como incendios, explosiones, lesiones humanas, sobrecalentamiento, envejecimiento de componentes, etc.

Ante una contingencia o falla en los sistemas eléctricos, los equipos y la propia instalación son vulnerables a sufrir daños permanentes al no interrumpir la circulación de corriente a tiempo. El dimensionamiento de las capacidades de los equipos como interruptores influye de tal manera que, al no ser seleccionados y coordinados adecuadamente, una falla puede generar operación errónea en el disparo de las protecciones o en el peor de los casos la explosión de algún elemento; debido a lo anterior es necesario conocer la magnitud de corriente en los diferentes puntos de la instalación eléctrica, tomando en consideración la operación más crítica de la instalación y transitorios que pueden estar fuera del control humano.

De manera muy general el análisis de cortocircuito nos permite [7]:

- Determinar las capacidades interruptivas de los elementos de protección como son interruptores, fusibles, equipos, entre otros.
- Realizar la coordinación de los dispositivos de protección contra las corrientes de cortocircuito.
- Realizar estudios térmicos y dinámicos que consideren los efectos de las corrientes de cortocircuito en algunos elementos de las instalaciones como son: sistemas de barras, tableros, cables, etc.
- Obtener los equivalentes de Thevenin y su utilización con otros estudios del sistema, como son los de estabilidad angular en los sistemas de potencia y ubicación de compensación reactiva en derivación, entre otros.
- Calcular las mallas de puesta a tierra y seleccionar conductores alimentadores.

Actualmente existen dos estándares internacionales que permiten realizar el análisis de cortocircuito, uno es el IEC-60909 y el otro es el ANSI/IEEE STD C37.010. Ambos estándares fueron diseñados para determinar las magnitudes de corriente de cortocircuito que se pueden presentar ante las diferentes condiciones de falla. Aunque estos estándares están diseñados para calcular magnitudes de corriente de cortocircuito, existen algunas diferencias entre estos, las cuales se muestran en la siguiente tabla [6].

Tabla 1. Diferencias entre los estándares IEC-60909 y ANSI/IEEE C37.010.

IEC-60909	ANSI/IEEE STD C37.010
<ul style="list-style-type: none"> • Las corrientes serán en función del tipo de configuración de la red: radial, mallada o no mallada. • El cálculo de las corrientes puede ser más complicado debido a que son en función del tipo de configuración de la red, la clasificación de cada fuente de corriente, del tiempo de liberación de falla, etc. • Utiliza generalmente varias relaciones de X/R. • Es más exacto que el ANSI/IEEE debido a que utiliza un procedimiento más apegado a la realidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • No considera la configuración de la red, lo cual simplifica el procedimiento del cálculo. • Se utiliza una sola relación de X/R. • Se puede pensar que es un procedimiento que está basado en las impedancias de los elementos de la red. • Su modelado es más sencillo debido a que requiere menos datos.

Independientemente de cual estándar se utilice para realizar el estudio de cortocircuito, este ayuda a tener una visión de las dimensiones de los componentes y equipos que se deben seleccionar para la instalación eléctrica o cuáles son los que se necesitan cambiar para que el personal y el sistema eléctrico cuente con la confiabilidad y seguridad necesaria.

2.2 Fallas en los sistemas eléctricos

La presencia de fallas en los sistemas eléctricos es indeseable y aun en las mejores instalaciones con la más moderna tecnología, estas están presentes en algún momento u otro, esto se debe a que no se pueden prever. En los sistemas eléctricos se pueden presentar fallas de naturaleza transitoria y permanente. Las fallas transitorias son aquellas en donde se presenta un cambio repentino en las condiciones del circuito momentáneamente, en otras palabras, una falla de naturaleza transitoria es aquella falla donde la pérdida de aislamiento de los elementos es momentánea y a su vez este mismo aislamiento es auto recuperable, esta puede ser ocasionada por una descarga atmosférica, contacto momentáneo en las líneas por ramas u objetos ajenos a la instalación, maniobras o cambios en la red.

Las fallas de tipo permanente son aquellas donde el aislamiento de los componentes no se recupera, este tipo de falla permanecerá hasta que se repare o se sustituya el componente dañado.

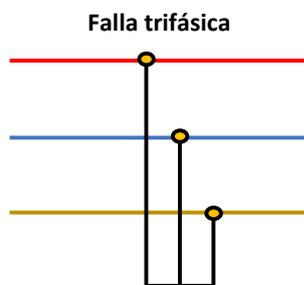
Para tener y asegurar una adecuada protección en las instalaciones, es importante considerar las posibles causas que ocasionan las fallas y conocer bajo qué condiciones el sistema entra en escenarios anormales. En la siguiente tabla se muestran algunas causas posibles por el cual el sistema eléctrico puede estar expuesto a condiciones de falla [9].

Tabla 2. Principales causas de fallas en los sistemas eléctricos.

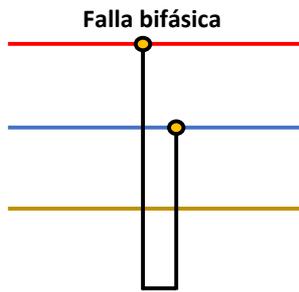
Falla	Causa
Aislamiento	Defecto o errores de diseño, instalación inadecuada, aislamiento envejecido o altos índices de contaminación.
Eléctrica	Descargas atmosféricas, sobretensiones transitorias ocasionadas por maniobra o sobretensiones dinámicas.
Mecánica	Esfuerzos por sobrecorriente, sismos, impacto por objetos ajenos, nieve o viento.
Térmica	Fallas de enfriamiento, sobrecorrientes, sobretensiones o altas temperaturas del ambiente

2.2.1 Tipos de fallas

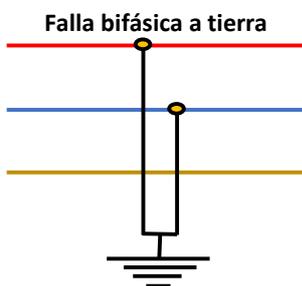
Existen diferentes tipos de fallas que ponen en riesgo al sistema eléctrico, las fallas asimétricas las cuales se presentan en condiciones desbalanceadas y las simétricas que ocurren en las tres fases del sistema. Las fallas asimétricas son las que tienen mayor presencia, se pueden presentar como falla bifásica, bifásica a tierra y fase a tierra [8]. A continuación, se muestran los diferentes tipos de fallas que se pueden presentar en el sistema eléctrico, así como sus características [16].



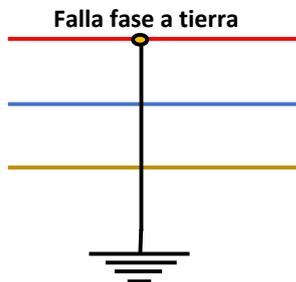
Falla trifásica: El cortocircuito trifásico puede llegar a ser el más violento, es el único que se comporta como un sistema equilibrado debido a que todas las fases quedan afectadas por igual al momento de la falla. Las tensiones en el punto de la falla son nulas, presentando intensidades de igual módulo. Al ser un sistema equilibrado su cálculo se vuelve más sencillo debido a que solo será necesario utilizar la red de secuencia positiva.



Falla bifásica: Generalmente las corrientes iniciales asimétricas de cortocircuito son menores que las de falla trifásica, aunque si el cortocircuito se produce cerca de máquinas síncronas o asíncronas de cierta potencia, la corriente que puede presentar esta falla puede llegar a superar la magnitud de la corriente que se produce en una falla trifásica. Al ser un cortocircuito no equilibrado es necesario utilizar la secuencia positiva y negativa para su cálculo.



Falla bifásica a tierra: Se asemeja al cortocircuito bifásico debido a que posee las mismas características, pero en este caso hay una pérdida de energía a tierra por el contacto de la misma. Para este tipo de falla es necesario considerar además de las redes de secuencia directa e inversa, la red de secuencia cero.



Falla fase a tierra: Este cortocircuito es muy frecuente y violento, produciéndose con mayor frecuencia en redes que cuentan con puestas sólidas a tierra o impedancia de bajo valor. Su cálculo es vital debido a que nos permite conocer la elevada magnitud de corriente, calcular fugas a tierra, tensiones de contacto o de paso. Para su cálculo es necesario tener presente las tres redes de secuencia.

Las fallas que originan un desbalance en las fases y tienen una mayor ocurrencia entre un 70 y 80% en el sistema eléctrico, son fallas monofásicas de fase a tierra (asimétricas), luego se encuentran las fallas trifásicas (simétricas) las cuales cuentan con un 5% de probabilidad de ocurrir [9].

Las magnitudes de corriente que se presentan antes, durante y después de la falla, son diferentes en cada tipo de falla, es por esto de la importancia de realizar el análisis de cortocircuito para cualquier tipo de falla que pueda presentar en el sistema eléctrico.

2.3 Elementos que contribuyen al cortocircuito

Existen diferentes elementos en el sistema eléctrico que aportan a la corriente de cortocircuito, aquellos elementos que más contribuyen y siempre hay que tenerlos presentes al momento de realizar el análisis de cortocircuito son: las compañías suministradoras de energía y las máquinas eléctricas rotativas como generadores, motores, máquinas de inducción y condensadores síncronos [6].

Cada uno de los elementos mencionados anteriormente tienen la siguiente similitud al momento de ocurrir un cortocircuito; cuando ocurre un cortocircuito trifásico en bornes de una máquina síncrona estarán presentes dos componentes en la corriente de cortocircuito: una componente de corriente directa (la cual decae de acuerdo a la relación X/R) y la componente de corriente alterna (es de estado estable con amplitud constante que varía sinusoidalmente), debido a la presencia de la componente de corriente directa en las corrientes de fase de la máquina, se tendrá una desviación o asimetría al momento de graficar la onda de corriente en función del tiempo [12]. En la siguiente figura se muestra el oscilograma de la contribución de las diferentes fuentes de cortocircuito, la gráfica total es la combinación de todas las corrientes mostradas.

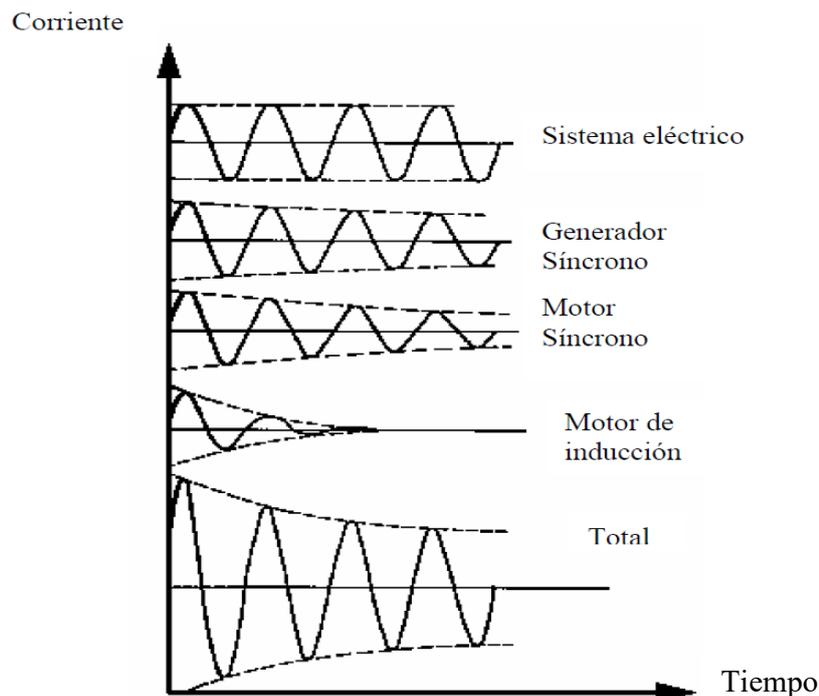


Figura 2. Oscilograma de corrientes de cortocircuito.

Dependiendo del tamaño de la máquina que suministra energía eléctrica al sistema, será la magnitud de corriente de cortocircuito que aporte, esto se debe a que durante un cortocircuito el flujo de corriente está limitado por la impedancia del generador y del circuito que hay entre el generador y el punto de falla.

Cuando hay un cortocircuito en el sistema eléctrico tanto el motor síncrono como el de inducción funcionan como generador, es decir, en lugar de extraer corriente la aportan; de tal manera que, la inercia de la carga y el rotor del motor tienden a evitar que el motor se desacelere; dicho en otras palabras, la energía giratoria de la carga y el rotor accionan al motor; tal como un motor principal acciona a un generador, con esta acción el motor síncrono o de inducción empiezan a entregar corriente de cortocircuito a la falla.

Al momento de ocurrir un transitorio de cortocircuito en el sistema eléctrico, se presentan tres periodos: subtransitorio, transitorio y de estado permanente, los cuales se caracterizan por tener una reactancia subtransitoria x''_d , reactancia transitoria x'_d y la reactancia de estado permanente x_d respectivamente, las cuales son el resultado del modelar la máquina síncrona para estos tres estados [10].

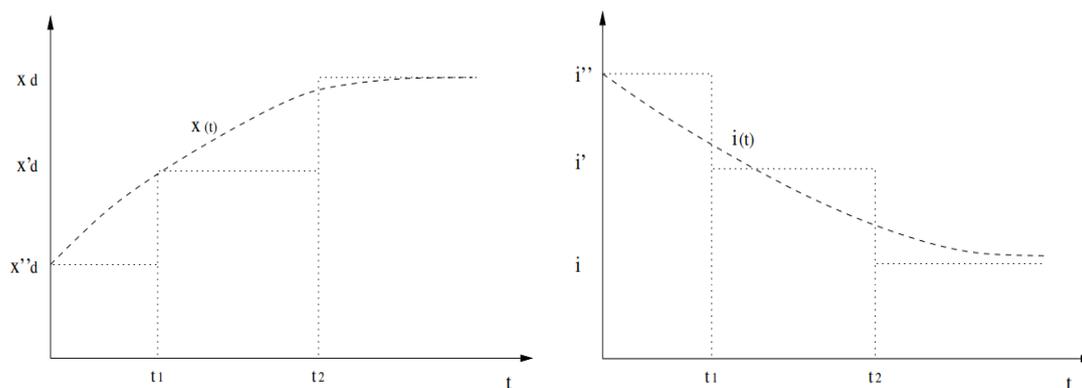


Figura 3. Curvas características de la relación de las reactancias y sus respectivas corrientes en los estados subtransitorio, transitorio y de estado permanente.

Como se puede apreciar en las gráficas anteriores (sin tomar en cuenta la componente de corriente directa) la corriente en los diferentes estados durante el transitorio tiende a tomar magnitudes decrecientes, a medida que pasa el tiempo, estas magnitudes de corrientes cumplen lo siguiente relación $i'' > i' > i$ esto es debido a que las reactancias toman valores crecientes $x''_d < x'_d < x_d$.

En la siguiente figura se muestra la forma de onda de un transitorio de un cortocircuito, en esta se puede apreciar el comportamiento de la corriente conforme evoluciona dicho transitorio.

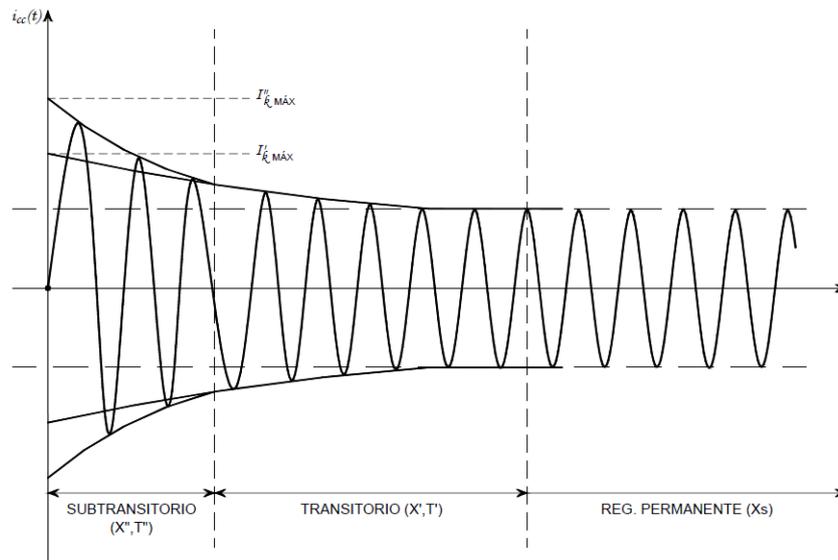


Figura 4. Comportamiento de la corriente durante un transitorio de cortocircuito.

2.4 Puntos a considerar para los estudios de cortocircuito

La magnitud de la corriente de cortocircuito es diferente en cada punto del sistema o instalación eléctrica, por ello, es imprescindible tener en consideración las diferentes fuentes de aportación y las impedancias limitadoras de la corriente de cortocircuito que se pueden encontrar a lo largo del sistema eléctrico.

Como se mencionó anteriormente, la probabilidad de que ocurra una falla trifásica en el sistema eléctrico es baja, a pesar de ello la magnitud de corriente de cortocircuito que se obtienen en la mayor parte de los sistemas industriales es elevada, la cual algunas veces sobrepasa la corriente de cortocircuito de fase a tierra o bifásica; por otro lado, en los sistemas eléctricos muy grandes de alta tensión se obtiene una magnitud de corriente de cortocircuito mayor cuando la falla es de tipo fase a tierra, a causa de la configuración de los transformadores o generadores que alimentan al sistema.

La configuración de los transformadores conectados delta-estrella sólidamente aterrizados (sin impedancia en el neutro) en lado de baja tensión o bien los generadores que cuentan con una conexión del neutro directo a tierra, tienden a tener una aportación de corriente de cortocircuito mayor al ocurrir una falla de fase a neutro, debido a que no tienen algún elemento que pueda limitar la corriente al momento de ocurrir la falla.

En el análisis de cortocircuito convencional se tienen que tener en consideración los siguientes puntos [6] [14] [15] [17]:

- Se debe realizar un estudio de cortocircuito cuando se diseña por primera vez un sistema eléctrico y luego actualizarlo cuando se realizan

modificaciones o renovaciones importantes o por lo menos cada cinco años. Algunas de las modificaciones importantes serían: cambio en la alimentación de la compañía suministradora, en la configuración del sistema eléctrico, de un transformador, en las longitudes o tamaños de los conductores o un cambio en la potencia de los motores que son energizados por el sistema.

- Durante la ocurrencia de cortocircuito no existirá un cambio en el tipo de falla, es decir que, si ocurriese una falla del tipo bifásico el cortocircuito se mantendrá así durante todo el tiempo que perdure la falla.
- Durante el tiempo que perdure una falla no existirán cambios en la topología del sistema.
- En la topología del sistema se debe considerar la configuración que presente mayor contribución, de modo que, se consideren tener todos los generadores, transformadores y líneas conectadas con el fin de tener la mayor red posible del sistema.
- Las máquinas rotatorias son las que aportan corriente al punto de la falla.
- Las máquinas eléctricas síncronas se modelan como una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia interna correspondiente al periodo que se quiera estudiar.
- Deben ser conocidos los valores tanto de la resistencia como la reactancia de los elementos involucrados en el estudio de cortocircuito.
- Las impedancias de los elementos que se encuentran entre las fuentes de cortocircuito y el punto de la falla son quienes limitan la corriente de cortocircuito.
- Las impedancias de los equipos que alimentan a la falla, limitan la corriente de cortocircuito.
- Las reactancias de los elementos pasivos serán igual en los estados subtransitorio, transitorio y permanente; solo cambiara para las máquinas rotativas.
- Si se utiliza el estándar ANSI/IEEE se debe tener en consideración los factores de corrección para las reactancias de las máquinas rotativas en los estados subtransitorio, transitorio y de estado permanente.
- No se consideran las corrientes de carga existentes antes de que se presente la falla.

2.5 Metodologías de cálculo de cortocircuito

Una de las mayores problemáticas al realizar el análisis de cortocircuito, es la determinación de las corrientes que pueden fluir a través de los diferentes puntos del sistema eléctrico; a lo largo de los años se han desarrollado diferentes metodologías y estándares para el cálculo de las magnitudes de corriente de cortocircuito, unos más complejos que otros pero con la misma finalidad, la cual es, evaluar los parámetros del sistema para dar una aproximación de la magnitud de corriente que puede presentarse ante una falla eléctrica.

A continuación, se presentan algunos métodos para realizar el cálculo de las magnitudes de las corrientes de cortocircuito en los sistemas eléctricos.

2.5.1 Método punto a punto

Este método puede ser utilizado en sistemas eléctricos con topología de simple complejidad, permitiendo calcular las magnitudes de corriente de cortocircuito con un grado razonable de precisión de una manera simple, efectiva y rápida. El método punto a punto se basa en 6 simples pasos, de los cuales se debe tener las siguientes consideraciones: la corriente va disminuyendo gradualmente a medida que se va alejando de la fuente, al aplicar este método se considera que el sistema se encuentra conectado a un bus en el cual no hay variaciones de tensión y frecuencia (barra infinita) [18].

Los pasos para aplicar este método son los siguientes:

1. Determinar la carga nominal del transformador a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\text{Para transformadores trifásicos} \quad I_{f.I} = \frac{KVA \times 1000}{E_{LL} \times 1.732} \quad (2.1)$$

$$\text{Para transformadores monofásicos} \quad I_{f.I} = \frac{KVA \times 1000}{E_{LL}} \quad (2.2)$$

2. Calcular el factor multiplicador M donde $\%Z_{Trans}$ es la impedancia del transformador.

$$M = \frac{100}{\%Z_{Trans}} \quad (2.3)$$

3. Determinar la corriente de cortocircuito que el transformador deja pasar.

$$I_{S.C.} = I_{f.I} \times M \quad (2.4)$$

Cuando existan motores que tengan contribuciones significantes, se sugiere que: La corriente del motor sea multiplicada por cuatro y a su vez añadida a la corriente de cortocircuito del transformador.

4. Calcular el factor f .

Para fallas trifásicas
$$f = \frac{\sqrt{3} \times L \times I}{C \times E_{LL}} \quad (2.5)$$

Para fallas de fase a fase
$$f = \frac{2 \times L \times I}{C \times E_{LL}} \quad (2.6)$$

Para fallas de línea a neutro
$$f = \frac{2 \times L \times I}{C \times E_{LN}} \quad (2.7)$$

Donde:

L = la longitud en pies del circuito a la falla.

C = Constante que se obtiene de la tabla 3. Para trayectorias paralelas multiplicar la constante C por el número de conductores por fase.

I = la corriente de cortocircuito en amperes al inicio del circuito.

E_{LL} = tensión entre fases.

E_{LN} = tensión entre línea y neutro.

Nota: La corriente de falla de $L - N$ tienen una magnitud mayor que la corriente de $L - L$ en los terminales secundarios de transformador de derivación central monofásico. La corriente de cortocircuito debe ser reajustada en los terminales del transformador con la siguiente ecuación.

$$I = 1.5 \times \text{corriente de corto circuito en terminales del transformador} \quad (2.8)$$

Tabla 3. Valores para la constante C

AWG o MCM	Cobre											
	Tres conductores monopolares						Cable de tres conductores					
	en conduit de						en conduit de					
	acero		No magnético				acero		No magnético			
600 V	5 kV	15 kV	600 V	5 kV	15 kV	600 V	5 kV	15 kV	600 V	5 kV	15 kV	
14	389	389	389	389	389	389	389	389	389	389	389	389
12	617	617	617	617	617	617	617	617	617	617	617	617
10	981	981	981	981	981	981	981	981	981	981	981	981
8	1557	1551	1557	1558	1555	1558	1559	1557	1559	1559	1558	1559
6	2425	2406	2389	2430	2417	2406	2431	2424	2414	2433	2428	2420
4	3806	3750	3695	3825	3789	3752	3830	3811	3778	3837	3823	3798
3	4760	4760	4760	4802	4802	4802	4760	4790	4760	4802	4802	4802
2	5906	5736	5574	6044	5926	5809	5989	5929	5827	6087	6022	5957
1	7292	7029	6758	7493	7306	7108	7454	7364	7188	7579	7507	7364
1/0	8924	8543	7973	9317	9033	8590	9209	9086	8707	9472	9372	9052
2/0	10755	10061	9389	11423	10877	10318	11244	11045	10500	11703	11528	11052
3/0	12843	11804	11021	13923	13048	12360	13656	13333	12613	14410	14118	13461
4/0	15082	13605	12542	16673	15351	14347	16391	15890	14813	17482	17019	16012
250	16483	14924	13643	18593	17120	15865	18310	17850	16465	19779	19352	18001
300	18176	16292	14768	20867	18975	17408	20617	20051	18318	22524	21938	20163
350	19703	17385	15678	22736	20526	18672	19557	21914	19821	22736	24126	21962
400	20565	18235	16365	24296	21786	19731	24253	23371	21042	26915	26044	23517
500	22185	19172	17492	26706	23277	21329	26980	25449	23125	30028	28712	25916
600	22965	20567	17962	28033	25203	22097	28752	27974	24896	32236	31258	27766
750	24136	21386	18888	28303	25430	22690	31050	30024	26932	32404	31338	28303
1000	25278	22539	19923	31490	28083	24887	33864	32688	29320	37197	35748	31959

5. Calcular el multiplicador m .

$$m = \frac{1}{1+f} \quad (2.9)$$

6. Calcular la corriente de cortocircuito RMS en el punto de la falla

$$I_{S.C. \text{ sym } RMS} = I_{S.C.} \times m \quad (2.10)$$

En caso de existir otro transformador en el sistema se debe tomar el dato de la corriente de cortocircuito en el primario del nuevo transformador y seguir los tres pasos siguientes.

1. Calcular el factor f conociendo la corriente de cortocircuito del primario.

Para transformadores trifásicos
$$f = \frac{I_{S.C. \text{ primario}} \times V_{\text{primario}} \times \sqrt{3} \times \%Z}{100,000 \times KVA_{\text{transformador}}} \quad (2.11)$$

Para transformadores monofásicos
$$f = \frac{I_{S.C. \text{ primario}} \times V_{\text{primario}} \times \%Z}{100,000 \times KVA_{\text{transformador}}} \quad (2.12)$$

2. Calcular el multiplicador m conforme a la fórmula 2.9
3. Calcular la nueva corriente de cortocircuito en el secundario del nuevo transformador.

$$I_{S.C. \text{ secundario}} = \frac{V_{\text{primario}}}{V_{\text{secundario}}} \times m \times I_{S.C. \text{ primario}} \quad (2.13)$$

2.5.2 Método de las potencias

De acuerdo al libro *Short Circuit Calculations "The Easy Way"*, EC&M Books 1999 el método de las potencias tiene una exactitud del 95% y posee la ventaja que al resolver este una sola vez permite encontrar las magnitudes de cortocircuito en cada punto del sistema. Dicho método está basado en calcular la potencia de cortocircuito en kVA desde la red hasta el último elemento, considerando las potencias de cortocircuito de las diferentes fuentes.

El método de las potencias tiene las siguientes consideraciones.

- Las fuentes que aportan a la corriente de cortocircuito son: compañías suministradoras, motores (síncronos y asíncronos) y generadores internos.
- Se tomarán en cuenta solamente las resistencias considerables que puedan contribuir a la falla como transformadores y conductores.
- La impedancia que se utilizará en los motores y generadores será la subtransitoria X''_d , debido a que esta aporta la mayor magnitud de corriente de cortocircuito.

- Se puede utilizar la siguiente igualdad $1 HP = 1 kVA$
- Este método funciona para calcular las corrientes simétricas que se presentarán en el circuito, las corrientes asimétricas poseen valores pico de corrientes más altos y por tanto más destructivos que las simétricas, el cálculo de estas suele ser bastante complejo, sin embargo, si es posible de realizar una estimación rápida de su valor [19].
- Para las corrientes asimétricas se hace las siguientes estimaciones: para circuito mayores de 600 V se multiplicará la corriente simétrica por un factor de 1.6, para sistemas con voltajes menores a 600 V por un factor de 1.25.
- Si en un mismo ramal se tienen varios motores, estos pueden agruparse.

A continuación, se presenta las diferentes ecuaciones para el cálculo de las potencias de los diferentes elementos de la red.

$$Generador = \frac{kVA}{x_d''} \quad (2.14)$$

$$Transformador = \frac{kVA}{Z_{pu}} \quad (2.15)$$

$$Reactor = \frac{1000 kV^2}{Z_{ohm}} \quad (2.16)$$

$$Conductores = \frac{1000 kV^2}{Z_{ohm}} \quad (2.17)$$

$$Motores = \frac{kVA}{x_d''} \quad (2.18)$$

Para conocer la potencia de cortocircuito que deja pasar el transformador se utiliza la siguiente ecuación.

$$PT = \frac{1}{\frac{1}{PA} + \frac{1}{P_c}} \quad (2.19)$$

Donde: PT es la potencia que deja pasar el transformador, PA es la potencia del punto anterior conocida y P_c es la potencia calculada con la ecuación 2.15.

Una vez calculado la potencia de cada elemento del sistema, se reduce el diagrama unifilar hasta encontrar un valor equivalente en el punto de falla, considerando que, los valores en serie se combinan como si fueran resistencias en paralelo y los valores que están en paralelo se suman directamente [7].

Para conocer el valor de la corriente de cortocircuito en el punto a analizar se utiliza la siguiente ecuación.

$$I_{CC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} V_{LL}} \quad (2.20)$$

2.5.3 Método de la matriz de impedancias Z bus

El método de la matriz de impedancias Z_{bus} es un método complejo y extenso que permite calcular la corriente de cortocircuito de un sistema eléctrico basándose en las impedancias del sistema, es un método nodal en el cual se construye la matriz de impedancias a partir de la inversión de la matriz de admitancias o bien elemento por elemento mediante algoritmos simples para incorporar un elemento a la vez dentro de la representación del sistema.

A continuación se presenta de manera simplificada el cálculo de la corriente de cortocircuito utilizando el método de la matriz de impedancias Z_{bus} .

Por definición se entiende que:

$$[Y_{bus}]^{-1} = Z_{bus} \quad (2.21)$$

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Donde: n es el número de buses.

La matriz Z_{bus} es una matriz simétrica, sus elementos de la diagonal principal son las impedancias de punto de operación de las barras y los elementos fuera de la diagonal se les llama impedancias de transferencia de las barras.

Una vez teniendo la matriz de impedancias se procede a calcular la corriente de cortocircuito trifásica en el bus teniendo en consideración:

$$I_{cc} = \frac{V_f}{Z_{nn}} \quad (2.23)$$

Donde: V_f es el voltaje pre-falla en el bus y I_{cc} es a la corriente de cortocircuito.

Este método se explica con mayor detalle en el libro *"Análisis de sistemas de potencia de Grainger, J. J. Y Stevenson, W. D. 1996"*.

2.5.4 Método de las componentes simétricas

El método de las componentes simétricas es una poderosa herramienta que realiza el cálculo de las fallas asimétricas de una manera sencilla como el caso de las fallas trifásicas [12], fue desarrollado por el señor Charles Legeyt Fortescue; es un método muy utilizado debido a que permite analizar las fallas simétricas y asimétricas que se presentan en los sistemas eléctricos. Este método permite desarrollar circuitos equivalentes llamados circuitos de secuencia, con el fin de tomar en cuenta la respuesta de corriente de los elementos del sistema por separado; de manera que, estarán presente tres circuitos equivalentes para cada

elemento de un sistema trifásico, permitiendo así obtener tres redes de secuencia (positiva, negativa y cero).

El método de las componentes simétricas permite aplicar el principio de superposición a cualquier sistema asimétrico, debido a que el teorema de Fortescue indica que tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de fasores; considerando que cada uno de los fasores desbalanceados originales es la suma de sus componentes, los fasores de voltaje originales expresados en términos de sus componentes quedan de la siguiente manera:

$$V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 \quad (2.24)$$

$$V_b = V_b^0 + V_b^1 + V_b^2 \quad (2.25)$$

$$V_c = V_c^0 + V_c^1 + V_c^2 \quad (2.26)$$

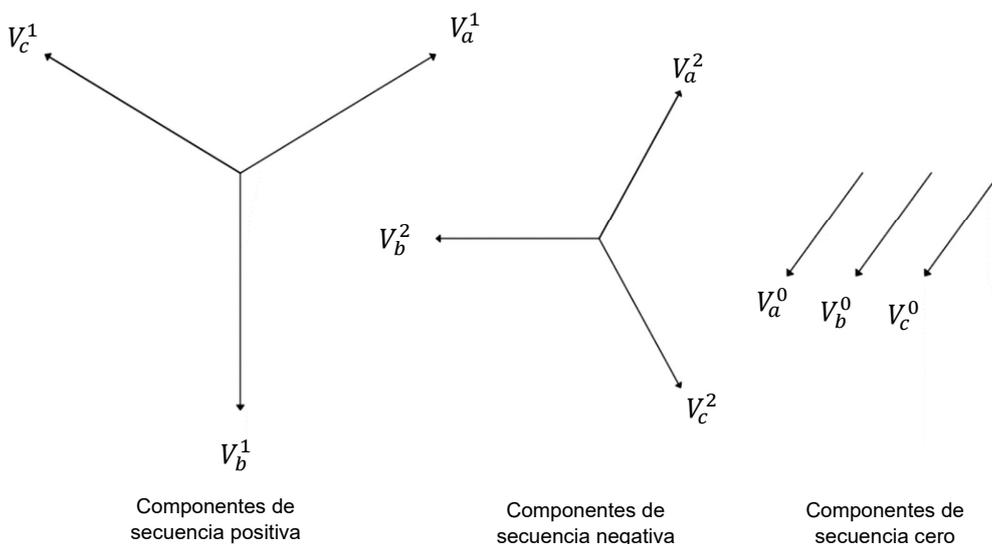


Figura 5. Conjunto de fasores de las componentes simétricas

En la imagen anterior se aprecia que los fasores de la secuencia positiva tienen sentido a-b-c, los fasores de secuencia negativa a-c-b y los fasores de secuencia cero no tienen desfase, es decir, rotan todos juntos. Si asignamos un operador “a” que originan la rotación de 120° en dirección contraria a las manecillas del reloj y dicho operador es un número complejo de magnitud unitaria.

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (2.27)$$

Si se aplica dos veces sucesivas al operador “a” a un fasor el fasor rotará 240°

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ \quad (2.28)$$

Si tenemos en cuenta lo anterior podemos obtener que:

$$V_b = aV_a \quad (2.29)$$

$$V_c = a^2V_a \quad (2.30)$$

Al introducir el operador “a” en las ecuaciones 2.24 ,2.25 y 2.26.

$$V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 \quad (2.31)$$

$$V_b = V_a^0 + a^2V_a^1 + aV_a^2 \quad (2.32)$$

$$V_c = V_a^0 + aV_a^1 + a^2V_a^2 \quad (2.33)$$

La relación entre el sistema trifásico desbalanceado y el sistema trifásico balanceado (componentes de secuencia) esta dado por:

$$V_a^0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.34)$$

$$V_a^1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.35)$$

$$V_a^2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.36)$$

Las ecuaciones anteriores podrían haberse escrito para cualquier conjunto de fasores relacionados y para las corrientes en lugar de los voltajes. De manera que las ecuaciones anteriores con respecto a la corriente quedan de la siguiente manera [12].

$$I_a^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2.37)$$

$$I_a^1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (2.38)$$

$$I_a^2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (2.39)$$

Como se mencionó anteriormente, este método se basa en la relación de los circuitos de secuencia del sistema, así que, el procedimiento para obtener los valores de la corriente de cortocircuito es el siguiente.

- Dibujar un diagrama unifilar correspondiente a la falla considerando los diferentes elementos que aportan a la misma.
- Dibujar las redes de secuencia, tomando en consideración la conexión de las máquinas eléctricas para el diagrama de secuencia cero.
- Reducir la redes de secuencia a un equivalente de Thevenin en el punto de la falla.
- Aplicar la ecuación correspondiente para obtener la corriente de falla.

Es preciso mencionar que, para dibujar las redes de secuencia cero en los transformadores es necesario tener las consideraciones de la siguiente tabla.

Tabla 4. Circuitos equivalentes de secuencia cero de acuerdo a la configuración de los devanados de un transformador.

CASO	CONEXIÓN	CIRCUITO EQUIVALENTE DE SECUENCIA CERO
1		
2		
3		
4		
5		

2.6 Solución por software

En la actualidad existen varios softwares comerciales que permiten realizar el análisis de cortocircuito de una manera sencilla, permitiendo al usuario ahorrarse tiempo en cálculos y reportes que anteriormente se realizaban de manera manual, gracias a estos softwares se logra simular cualquier tipo de falla ya sea asimétrica o simétrica, es decir, estos logran simular diferentes tipos fallas a la vez en los diferentes buses o nodos del sistema, permitiendo así conocer las diferentes magnitudes de cortocircuito en cada uno de los puntos del sistema eléctrico.

El desarrollo de estos softwares a avanzado tanto que permite a cualquier usuario utilizarlos, gracias a su interfaz amigable se logra crear diagramas unifilares de una manera sencilla e intuitiva, además de poder generar reportes automáticos de las condiciones del sistema e informar si algún elemento está configurado de manera errónea. Las funcionalidades dependerá de cada software, permitiendo tener diferentes ventajas y desventajas uno sobre otro.

A continuación se nombran algunos softwares utilizados para el cálculo de cortocircuito.

- ETAP Powering success.
- CAPE Computer – Aided Protection Engineering.
- DIgSILENT Power System Software & Engineering.
- CYME.

Capítulo 3

Protecciones de sobrecorriente

3.1 Introducción

La correcta selección del sistema de protección dentro de una instalación eléctrica es un tema en el cual se debe garantizar la seguridad del personal y de la propia instalación, es un deber de las protecciones el detectar y discriminar correctamente las fallas para que de esta manera se logren limitar los daños a los componentes y equipos de la instalación.

La protección en los sistemas eléctricos se obtiene implementando elementos de protección que permitan evitar la destrucción de los equipos, dichos elementos deben contar con características que sean capaces de detectar y liberar los diferentes tipos de fallas; de manera que, se diseñan sistemas de protección que están basados en esquemas generales (ver figura 6), los cuales se basan en detectar señales básicas como tensión, corriente y frecuencia; estas señales permiten detectar diferentes tipos de fallas y actuar sobre los actuadores los cuales esencialmente son interruptores.

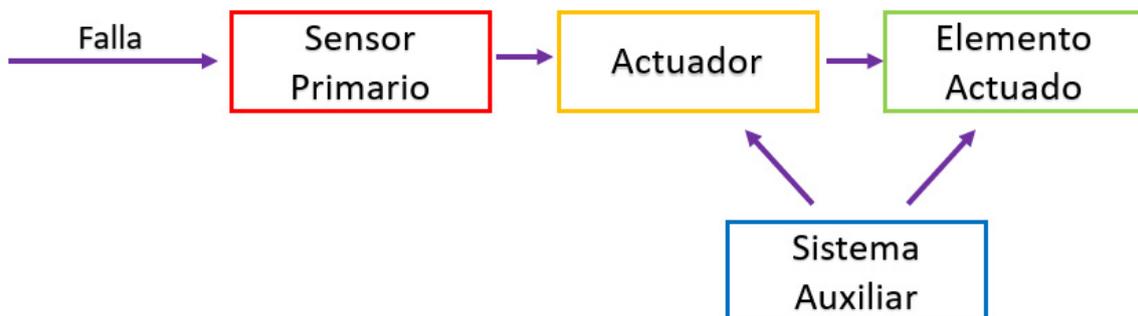


Figura 6. Elementos básicos de un sistema de protección contra fallas.

Los transformadores de potencial y de corriente son elementos muy importantes al momento de diseñar los sistemas de protección, debido a que estos son los encargados de sensar las señales en tiempo real y mandar estas a los diferentes relevadores, los cuales de acuerdo a sus valores de ajuste mandarán una señal o no a los interruptores.

Para diseñar un sistema de protección se deben tomar varias consideraciones entre las cuales están, establecer los tipos de falla contra las que se deben proteger el equipo, el grado de protección deseado y la lógica que debe tener el esquema de protección.

A continuación se presenta la imagen de un diagrama de flujo que muestra la lógica que debe tener un sistema de protección.

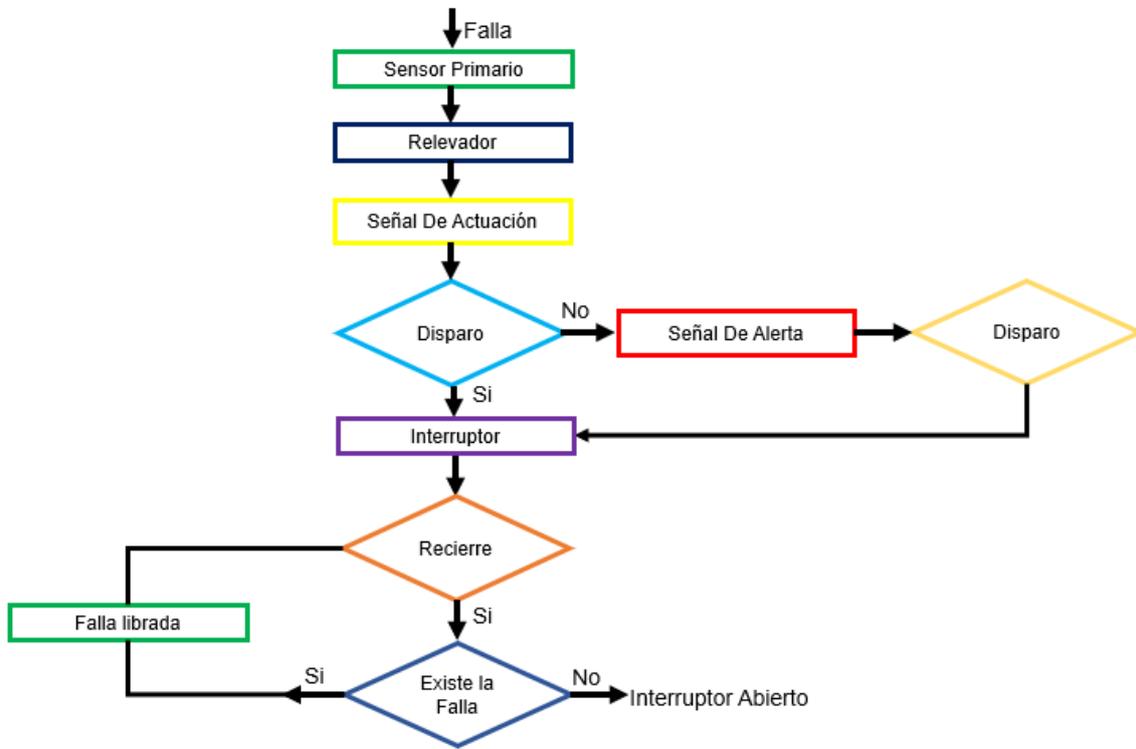


Figura 7. Diagrama de flujo de la lógica de un sistema de protección.

3.2 Elementos de protección de sobrecorriente en sistemas eléctricos industriales

En la actualidad existen diferentes elementos de protección los cuales tienen la función principal de proteger a los componentes del sistema eléctrico ante las posibles fallas eléctricas que se puedan presentar; los principales elementos de protección de sobrecorriente que podemos encontrar instalados en los sistemas eléctricos industriales son los siguientes:

3.2.1 Fusibles

Es el medio de protección más antiguo usado para proteger a los sistemas eléctricos de sobrecorrientes, consisten en una lámina cuyo material se funde al momento en el que se presenta una corriente que sobrepasa la capacidad por la cual este fue diseñado. Cada fusible cuenta con una curva característica de tiempo vs corriente la cual nos indica que a mayor corriente el tiempo en el que el fusible se fundirá será menor, este lapso se conoce comúnmente como tiempo de interrupción.

Es importante señalar que al momento de seleccionar un fusible para alguna instalación eléctrica se debe tener a consideración los siguientes puntos.

- Voltaje de operación
- Corriente nominal
- Capacidad interruptiva
- Tipo de fusible: de acción retardada o acción rápida



Figura 8. Ejemplo de fusibles y curvas característica tiempo vs corriente de los fusibles.

3.2.2 Interruptores

Son aquellos elementos que fueron diseñados para establecer o cortar la continuidad de un circuito eléctrico, ya sea en condiciones normales o anormales de operación de dicho circuito. Estos elementos de protección deben de asegurar que cuando ocurra alguna falla, el elemento fallado en el circuito quede aislado del resto del sistema [9].

Existe una gran variedad de interruptores en el mercado, estos se pueden clasificar ya sea por, su nivel de voltaje de operación, construcción, su potencia de operación, etc. Principalmente en las instalaciones industriales se encuentran instalados interruptores de potencia de baja tensión, interruptores termomagnéticos, interruptores de caja moldeada e interruptores con unidad de disparo integrada.

La mayoría de los interruptores mencionados anteriormente pueden contar o no con las siguientes características:

- Tensión de operación.
- Corriente nominal de operación.
- Capacidad interruptiva.
- Curva característica de disparo corriente vs tiempo.
- Ajuste para las diferentes curvas con la que cuente el interruptor.
- De 1, 2 o 3 polos.

3.2.3 Relevadores de sobrecorriente

Los relevadores de sobrecorriente son aquellos que actúan por la acción de la corriente que atraviesa al relevador, estos pueden ser accionados por una corriente máxima, que hace que el relevador entre en operación cuando la corriente sobrepasa un cierto valor o bien estos pueden ser accionados con una corriente mínima, la cual hace que relevador entre en operación cuando la corriente que lo atraviesa está por debajo de un valor previamente fijado.

Los relevadores trabajan en conjunto con los transformadores de instrumento e interruptores para liberar fallas eléctricas, permitiendo así disminuir los efectos destructivos a los elementos y equipos instalados del sistema eléctrico. Existen diferentes tipos de relevadores en los sistemas eléctricos, los cuales deben diseñarse de tal manera que puedan soportar las corrientes que se presentan durante condiciones normales de operación, conexión y desconexión de cargas y ante las fallas que puedan presentarse. Estos además tienen que poseer las siguientes características.

- **Confiabilidad:** debido a que los relevadores protegen máquinas y equipos costosos, estos deben tener una alta capacidad de seguridad de funcionamiento, es decir, que el relevador debe desempeñar su función de protección en las condiciones establecidas durante un periodo de tiempo determinado.
- **Selectividad:** por lo general la mayoría de los relevadores suelen estar en grandes sistemas eléctricos, en donde la continuidad del servicio eléctrico debe ser continuo el mayor tiempo posible. La característica de selectividad en los relevadores, nos permite tener ajustes los cuales deben elegirse de tal forma que aun en las condiciones más desfavorables, solamente quede desconectada la parte del sistema que este afectada por la falla. De manera que, la selectividad es, “mantener la continuidad del suministro eléctrico desconectando solamente una sección mínima del circuito para aislar la falla”.

- **Sensibilidad:** los relevadores de protección deben ser sensibles, su funcionamiento debe ser correcto para el valor mínimo de perturbaciones, de manera que el sistema de protección con relevadores debe de detectar las fallas temporales y permanentes aún si estas están muy alejadas.
- **Rapidez:** la elevación de la magnitud de la corriente al ocurrir una falla es relativamente corta, esta puede tener valores que pueden llegar a dañar o destruir los conductores, equipos u otros elementos que conforman al sistema eléctrico. Con el fin de despejar las fallas en el menor tiempo posible, los relevadores deben tener una alta capacidad de reacción para despejar las fallas a fin de evitar daños a los elementos del sistema eléctrico.

Los tipos de relevadores de sobrecorriente que podemos encontrar son los siguientes [20]:

- **Relevadores direccionales:** este tipo de relevador verifica el sentido en que circula la corriente en su zona de protección, el relevador opera si la corriente que circula por este sobrepasa el valor de arranque y la dirección de la corriente coincide con la correspondiente a un cortocircuito en la zona protegida.
- **Relevadores no direccionales:** este tipo de relevadores son accionados cuando hay sobrecorrientes que circulan en ambos lados de su ubicación. Ejecuta su función sin importar el sentido en que circula la corriente.
- **Relevadores instantáneos:** el relevador instantáneo es aquel que entra en acción en un tiempo menor o igual a 50 ms. Presentan un disparo inmediato, cuando la corriente observada alcanza el valor de ajuste.
- **Relevadores temporizados:** el relevador temporizador opera en un tiempo después de la detección de la falla.
- **Relevadores de corriente definida:** este tipo de relevadores operan cuando la corriente que pasa a través de él alcanza un valor prefijo. Este tipo de protección tiene la desventaja de ser poco selectiva para altos valores de cortocircuito, es por eso que este tipo de relevadores no son muy utilizados como única protección de sobrecorriente. Su uso es común como unidad instantánea cuando hay otro tipo de protección.

- **Relevadores de corriente y tiempo definido:** este tipo de relevadores permiten al usuario ajustar los niveles de corriente y el tiempo en el cual estos pueden operar. Como en este relevador el tiempo de operación puede ser ajustado en valores definidos, no presenta los inconvenientes del relevador de corriente definida, es por eso que esta protección es más selectiva.

El ajuste de este tipo de relevadores se hace mediante el dial, el cual determina el tiempo exacto de operación y con un selector de corriente para escoger a partir de que valor debe empezar a trabajar el temporizador [20].

- **Relevadores de tiempo inverso:** estos relevadores pueden operar en un tiempo inversamente proporcional a la corriente que se presenta en la falla, es decir, estos operan de acuerdo a su curva características. Los relevadores de tiempo inverso presentan una ventaja sobre los anteriores, debido a que, ante elevadas corrientes estos pueden tener tiempos de disparo muy cortos lo cual es beneficioso para la selectividad. Los relevadores de tiempo inverso se clasifican de acuerdo a la curva característica que determina la rapidez de operación en: inverso, muy inverso, extremadamente inverso y tiempo definido [20].

Capítulo 4

Coordinación de protecciones

4.1 Introducción

El objetivo principal de la coordinación de protecciones es la eliminación rápida de las fallas manteniendo la mayor continuidad posible en el servicio, de esta manera se logra prevenir y minimizar el daño a los equipos y al personal de la instalación eléctrica. Un sistema de protección bien diseñado y apropiadamente coordinado, puede brindar que un sistema eléctrico opere de manera segura, confiable y con los requerimientos exigibles por las normas o estándares que así lo requieran. De manera que, al tener los dispositivos de protección adecuados y apropiadamente coordinados, se brinda confiabilidad y seguridad a la instalación, así como se protege la inversión del capital de la propia instalación.

La acción rápida y selectiva de las protecciones ayudan a prevenir y disminuir los daños a los equipos que se ven involucrados, además de eso consiguen despejar las fallas en el menor tiempo, lo cual ayuda a prevenir accidentes, aislando la falla solo de la sección afectada, esto último es beneficioso debido a que al aislar solo la parte afectada permite restablecer el servicio eléctrico en un menor tiempo.

Las características de un sistema de protección son los siguientes [21]:

- **Selectividad:** Es la característica que debe poseer una protección la cual le permita operar solamente cuando sea necesario evitando así disparos innecesarios o erróneos.
- **Rapidez:** Operación en el tiempo mínimo posible luego de la ocurrencia de una falla o condición anormal de operación. El tiempo de operación es ajustable y depende de la selectividad (temporización de las protecciones).
- **Sensibilidad:** El Sistema de protección debe operar frente a una falla por mínima que esta sea. Una desviación de las condiciones de operación de un sistema de energía eléctrica, respecto de las condiciones normales, implica que el sistema de protección debe operar.
- **Seguridad:** El sistema de protección debe garantizar la operación en todos los casos que sea requerido.
- **Respaldo:** Es la condición de un sistema de protección que permite la operación de una protección secundaria, si la que debió operar por condición de selectividad, no lo hizo.

- **Coordinación:** Es la selección y/o ajuste de los dispositivos de protección para despejar una falla y/o aislar la parte afectada del sistema. Es la característica de los equipos de protección de modo que operen selectivamente y otorguen respaldo.

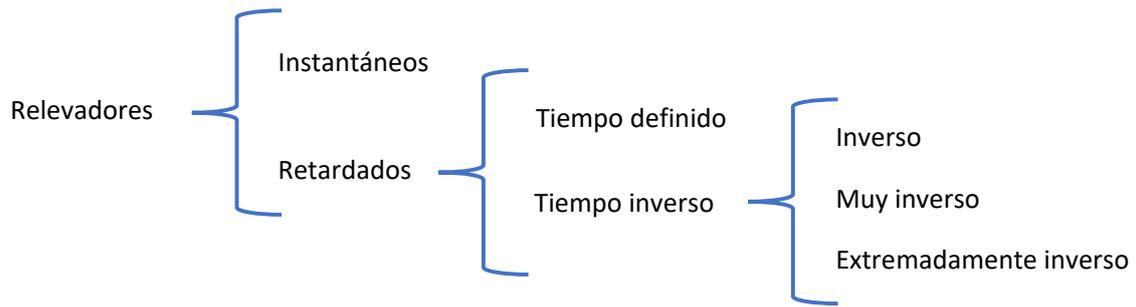
El uso de relevadores en sistemas de protección es muy utilizado, debido a que, en conjunto con los transformadores de instrumento e interruptores forman un sistema de protección confiable. Los relevadores de protección pueden clasificarse de acuerdo con la función que realicen, su construcción, el tipo de señal de entrada, su sensibilidad, etc. A continuación, en la tabla 5 se muestra la aplicación de los diferentes tipos de relevadores de sobrecorriente.

Tabla 5. Relevadores de sobrecorriente de acuerdo a su aplicación

Aplicación	Tipo de relé recomendado
Protección principal	Instantáneos y temporizados de tiempo inverso
Protección de respaldo	Temporizados
Protección de equipos individuales	Temporizados de tiempo definido
Protección de extremos del sistema radial	Temporizados de tiempo definido
Protección de sistemas en anillo	Temporizados de tiempo inverso, muy inverso y extremadamente inverso
Combinación de relés y fusibles	Temporizados de tiempo inverso, muy inverso y extremadamente inverso
Protección de líneas largas	Temporizados de tiempo inverso
Protección de líneas cortas	Temporizados de tiempo inverso
Sistemas con variaciones apreciables en la generación (cortocircuito)	Temporizados de tiempo inverso y muy inverso
Sistemas con poca variación en el nivel de corto local y remoto	Temporizados de tiempo definido

4.2 Curvas características de protección

Como se mencionó anteriormente existen diferentes tipos de relevadores los cuales pueden ser usados para diferentes aplicaciones, las características de operación dependerán de su tipo de curva de ajuste (tiempo vs corriente). De acuerdo a la característica de tiempo de operación, los relevadores se pueden clasificar como se indican a continuación.



La siguiente imagen muestra los diferentes tipos de curvas de operación de los relevadores de acuerdo al tiempo de operación.

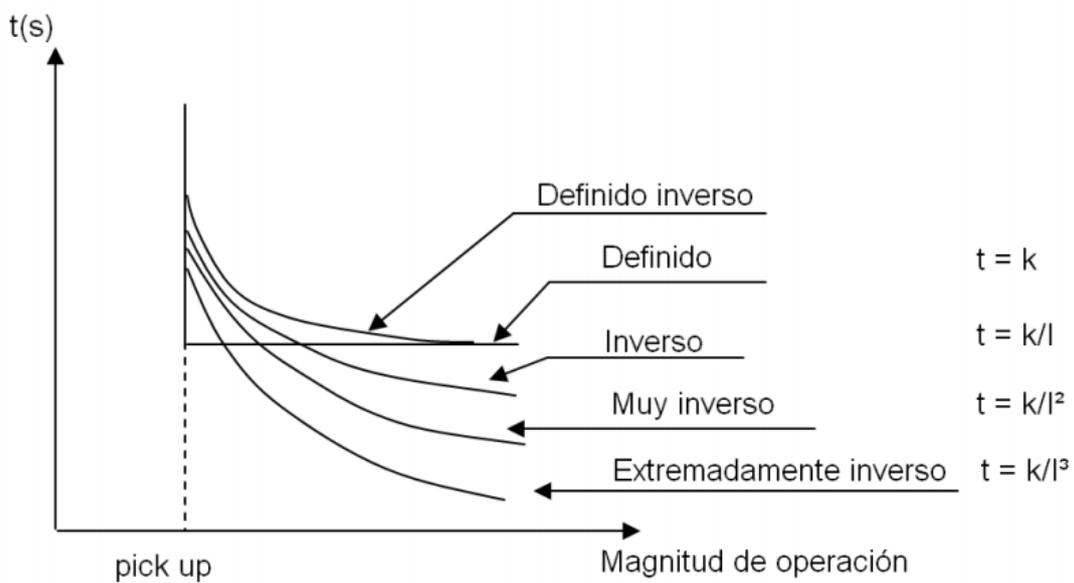


Figura 9. Curvas de los relevadores de acuerdo al tiempo de operación.

En la parte derecha de la figura 9 se muestra una serie de ecuaciones, las cuales nos indican que el tiempo de operación estará dado por la relación de la constante k (la cual comúnmente esta entre $1.0 \leq k \leq 2.0$) y la corriente. Por otro lado, de acuerdo a la curva característica que posea cada tipo de relevador, esta se puede modelar mediante las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{a * Dial}{M^{n-1}} \quad \rightarrow \quad \text{Estándar IEC} \quad (4.1)$$

$$t = a * \frac{Dial}{M^{n-1}} + b * Dial \quad \rightarrow \quad \text{Estándar ANSI} \quad (4.2)$$

Donde:

a , b , y n : son constantes.

M o $Mult$: es la relación entre la corriente de operación del relevador (I_{cc}) y su corriente de ajuste (I_a o TAP).

$Dial$: es el factor para un tipo de curva dado, el cual permite obtener diferentes tiempos de operación para un mismo tipo de curva de operación.

t : es el tiempo de operación del relevador en segundos.

Las constantes de las ecuaciones normalizadas anteriormente mostradas presentan los siguientes valores.

Tabla 6. Constantes de la ecuación del estándar IEC

Tipo de curva	a	n
Tiempo inverso estándar	0.14	0.02
Muy inversa	13.50	1.00
Extremadamente inversa	80.00	2.00
Moderadamente inversa	120.00	1.00

Tabla 7. Constantes de la ecuación del estándar ANSI

Tipo de curva	a	n	b
Tiempo inverso estándar	59.50	2.00	1.80
Muy inversa	39.22	2.00	0.98
Extremadamente inversa	56.40	2.00	0.24
Moderadamente inversa	0.10	0.02	0.22

4.3 Funciones en las protecciones de sobrecorriente

Tradicionalmente la coordinación de protecciones en sistemas eléctricos ha consistido en la aplicación de procedimientos o algoritmos mediante los cuales se busca empíricamente la optimización, estos algoritmos se ejecutan en forma manual o con software comercial que asiste en forma gráfica el proceso manual. Por lo anterior se puede decir que aún no existe algún conjunto de ecuaciones el cual ayude a solucionar el problema de coordinación de protecciones, además de lo anterior tampoco se conoce si la solución obtenida mediante los procedimientos tradicionales es óptima, puesto que no se analiza todo el espacio de solución posible del problema [22].

Existen varios métodos usados para realizar una correcta coordinación de protecciones en los sistemas eléctricos, los cuales involucran tiempo, corriente o ambas, tiempo y corriente. El método para despejar fallas por tiempo es aquel en el que a cada relevador se le da un ajuste de tiempo apropiado para asegurar que el relevador más cercano al punto de falla opere primero.

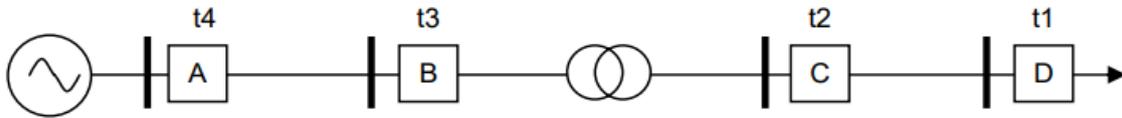


Figura 10. Ejemplo del tiempo de despeje de falla en sistema radiales

Este método no hace distinción por la magnitud de corriente que atraviesa al relevador, es decir que, para este caso se dice que el relevador es un “relevador de retardo de tiempo definido independiente” debido a que su tiempo de operación es para propósitos prácticos independiente del nivel de corriente. El medio de discriminación lo provee el elemento de retardo de tiempo.

De manera que los tiempos de despeje de la falla quedarían de la siguiente manera $t1 < t2 < t3 < t4$, esto es porque se le debe dar tiempo suficiente al relevador de aguas arriba para que no opere antes que el relevador donde se encuentra la falla. La principal desventaja de este método de discriminación, es que el tiempo de disparo más largo ocurre para fallas cercanas a la fuente donde el nivel de corto es más alto [23].

Para ajustar las protecciones por corriente se debe tener presente que, a lo largo del sistema eléctrico se tienen diferentes magnitudes de corriente las cuales irán en aumento conforme la falla sea más próxima a la fuente, teniendo eso en cuenta se presenta el siguiente ejemplo [23].

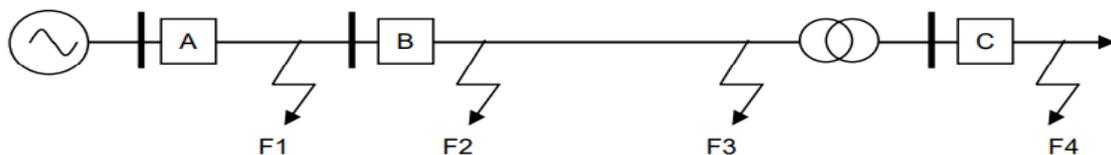


Figura 11. Ejemplo de coordinación de relevadores por discriminación de corriente.

Suponiendo que el nivel de corto para una falla en F1 es de 8800 Amperes, el relevador A estaría ajustado para una corriente de 8800 amperes en teoría protegería la sección de línea entre A y B.

Sin embargo, hay dos puntos prácticos importantes que afectan este método de coordinación:

- No se puede distinguir entre una falla en F1 y una falla en F2 debido a que la distancia entre un punto y otro puede ser muy corta, de tan solo algunos metros, lo que corresponde a un cambio en la corriente de falla de aproximadamente 0.1%.
- En la práctica puede haber variaciones en la fuente (condiciones de generación) donde la corriente de falla podría bajar hasta los 6800 Amperes incluso para una falla cerca de A. En este caso, el relevador en A ajustado en 8800 amperes no protegería casi nada de la sección de línea entre A y B.

Esta situación cambia cuando hay una impedancia significativa entre los puntos A y C. Por ejemplo, supongamos que para una falla en F4, el nivel de corto es de 2200 amperes, entonces el relevador en B estaría ajustado para operar con una corriente de 2200 amperes más un margen de seguridad. Con este ajuste el relevador en B no operaría para una falla en F4, permitiendo que el relevador en C realice su función de despeje de falla correctamente.

Asumiendo ese margen de seguridad en un 20% para permitir errores en el relevador y otro 10% adicional para variaciones en la impedancia del sistema de potencia, sería razonable escoger un ajuste para el relevador B en $1.3 \times 2200 = 2860$ amperes. Si para una falla en F3 los niveles de corto máximo y mínimo son de 8300 y 5200 amperes respectivamente, entonces el relevador en B protegería completamente la línea antes del transformador en cualquier tipo de falla.

Entonces la discriminación por corriente no presenta inconvenientes cuando hay valores considerables de impedancia entre la ubicación de un relevador y otro.

4.4 Consideraciones técnicas para la coordinación de protecciones

Con la finalidad de tener un sistema eléctrico protegido adecuadamente y con los ajustes correctos para cada protección del sistema, se debe tener consideraciones al momento de realizar el estudio de coordinación de protecciones, dichas consideraciones se mencionan a continuación.

1. Realizar un diagrama unifilar en el cual se muestren las características de los elementos dentro del sistema (distancias, nivel de tensión, potencia de los elementos, protecciones, etc.).
2. Realizar el estudio de cortocircuito, teniendo actualizado el dato de contribución de cortocircuito del suministrador de energía eléctrica.
3. Tener en cuenta las magnitudes máximas y mínimas de la corriente de falla en cada punto donde está situada cada protección.
4. Tomar en cuenta las curvas de daño de los conductores, transformadores y motores que hay dentro del sistema eléctrico.
5. Conocer la curva de arranque de los diferentes motores que hay dentro del sistema eléctrico.
6. Tener la corriente de carga máxima que fluirá en cada protección.
7. Tener la curva o curvas características de los elementos de protección.
8. De manera que en la mayoría de los sistemas la coordinación de las protecciones es en cascada, se debe evitar que se traslapen las curvas de ajuste.
9. Dado que los sistemas eléctricos tienden a cambiar con el tiempo es recomendable realizar el estudio de coordinación de protecciones cada 5 años.

Capítulo 5

Protecciones adaptativas

5.1 Introducción

En los sistemas eléctricos el suministro de energía no siempre es constante, algunas veces este se ve suspendido por fallas en la red de transmisión o distribución, esta suspensión del servicio eléctrico suele ser por cortos periodos de tiempo, lo cual conlleva a que las industrias tengan unidades electrógenas que les permita abastecer el suministro propio de energía por este periodo de tiempo.

Además, si a lo anterior le sumamos la tendencia de que algunas industrias optan por tener sistemas de generación renovables que les permitan reducir los costos de la energía facturada, se obtiene un gran reto al momento de elegir y coordinar el sistema de protecciones, esto se debe a que, se deben analizar todas las configuraciones posibles de la instalación eléctrica debido a que las magnitudes de corriente de cortocircuito dependerán directamente de la topología de la red.

Al tener diferentes fuentes de generación ya sea, propia de la red eléctrica, unidades electrógenas o bien de sistemas de generación de energía renovable, se puede tener diferentes topologías de red en modo aislado o interconectado, lo cual implica tener flujos bidireccionales tanto de la red eléctrica hacia el consumidor o bien del consumidor hacia la red, debido a estos cambios nace un nuevo desafío para los sistemas de protección y coordinación de las protecciones eléctricas.

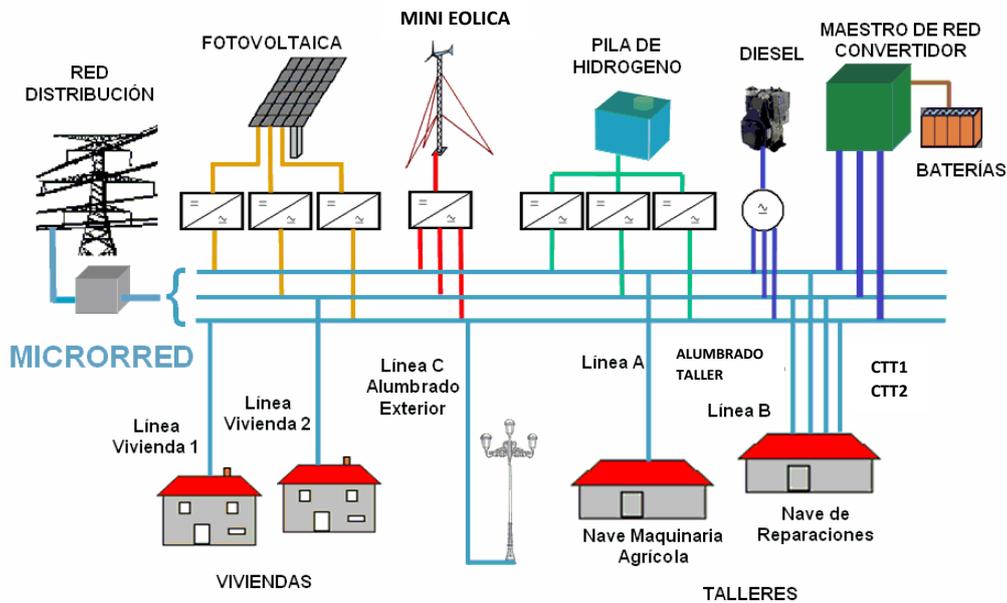


Figura 12. Microrred con diferentes fuentes de generación distribuida.

Como se puede apreciar en la imagen anterior al tener diferentes fuentes que alimenten al sistema eléctrico, se pueden introducir flujos de energía a la red de distribución, además de esto, se cuenta con la capacidad de autoabastecerse y operar de forma aislada cuando falte el suministro de energía por parte de la red lo cual ayuda a mantener la continuidad del servicio eléctrico.

Un sistema eléctrico el cual tienen diferentes fuentes de energía tiene mayor confiabilidad en la continuidad del servicio, sin embargo, se tiene un gran reto al coordinar las protecciones del sistema, debido a que al tener diferentes fuentes que aportan al cortocircuito se tendría que tener diferentes ajustes, uno para cada combinación de la topología del sistema, debido a que de no ser así se corre el riesgo de que las protecciones no operen de manera adecuada al momento de ocurrencia de una falla en el sistema.

A continuación, se presenta una serie de simulaciones de un sistema eléctrico industrial común, el cual cuenta con diferentes tipos de cargas, transformadores conductores, etc. Se utilizo ETAP el cual es un software especializado para el análisis de sistemas eléctricos.

En estas simulaciones se intenta mostrar que dependiendo de la configuración que tenga sistema eléctrico, varían las magnitudes de cortocircuito, de tal manera que estas aumenten o disminuyan.

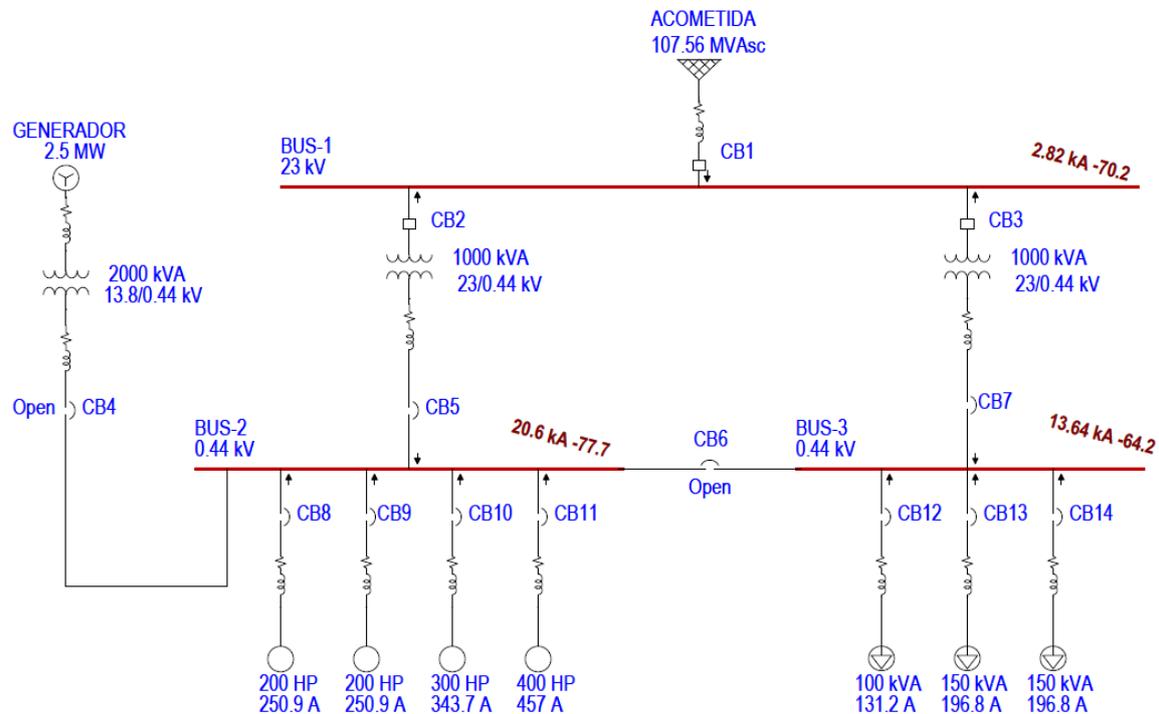


Figura 13. Sistema eléctrico alimentado solamente por el suministrador de energía.

La imagen anterior muestra que el sistema eléctrico solamente cuenta con la alimentación del suministrador (los flujos son únicamente unidireccionales hacia las cargas). Los valores de corriente de cortocircuito que se muestran son los que se presentan durante el primer 1/2 ciclo (primera red) de una falla trifásica.

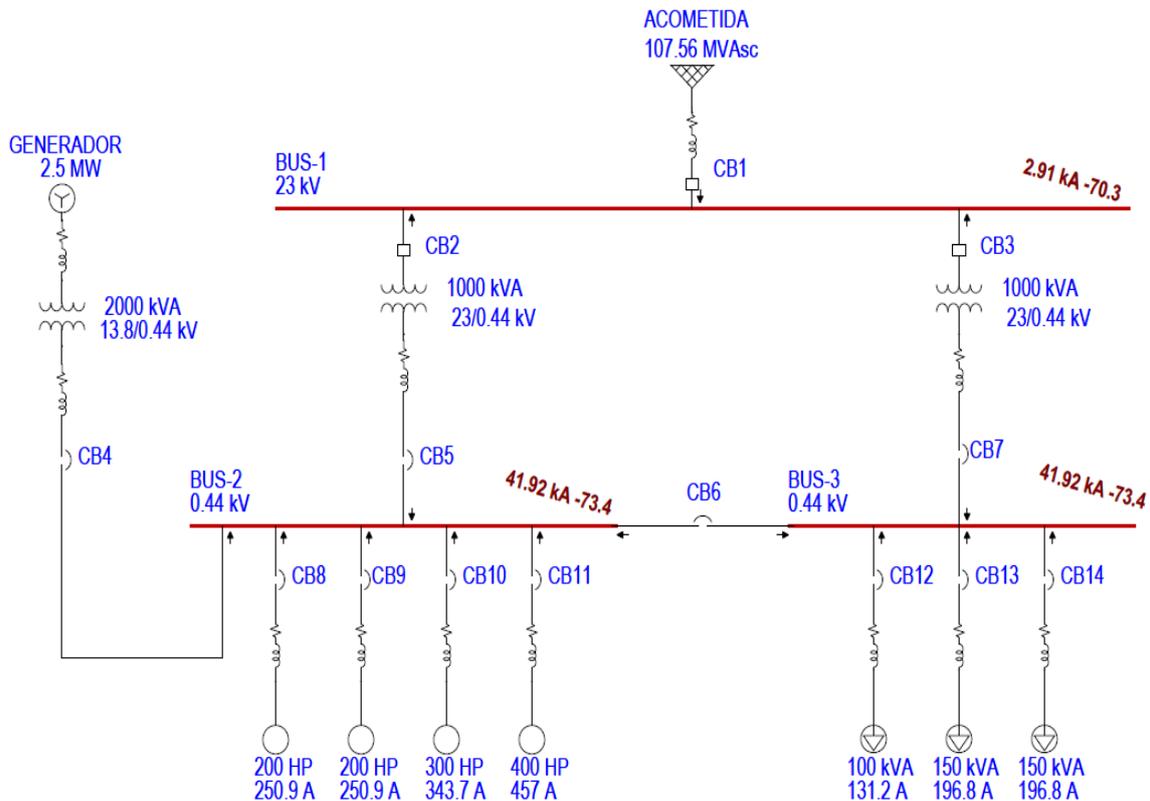


Figura 14. Sistema eléctrico con dos fuentes de alimentación.

Para el caso de la figura anterior se simula de tal manera que el sistema eléctrico tenga aportación tanto del suministrador como del generador, es decir, se cierra el interruptor que está debajo del generador (interruptor CB4) y el interruptor de enlace que conecta los buses 2 y 3 (interruptor CB6). Para esta simulación se fallaron todos los buses y se simuló una falla trifásica en cada uno de ellos. Las magnitudes que se presentan son equivalentes a una falla trifásica durante el primer 1/2 ciclo.

con respecto a la figura 13, se puede apreciar que hay un aumento en las magnitudes de cortocircuito en todos los buses.

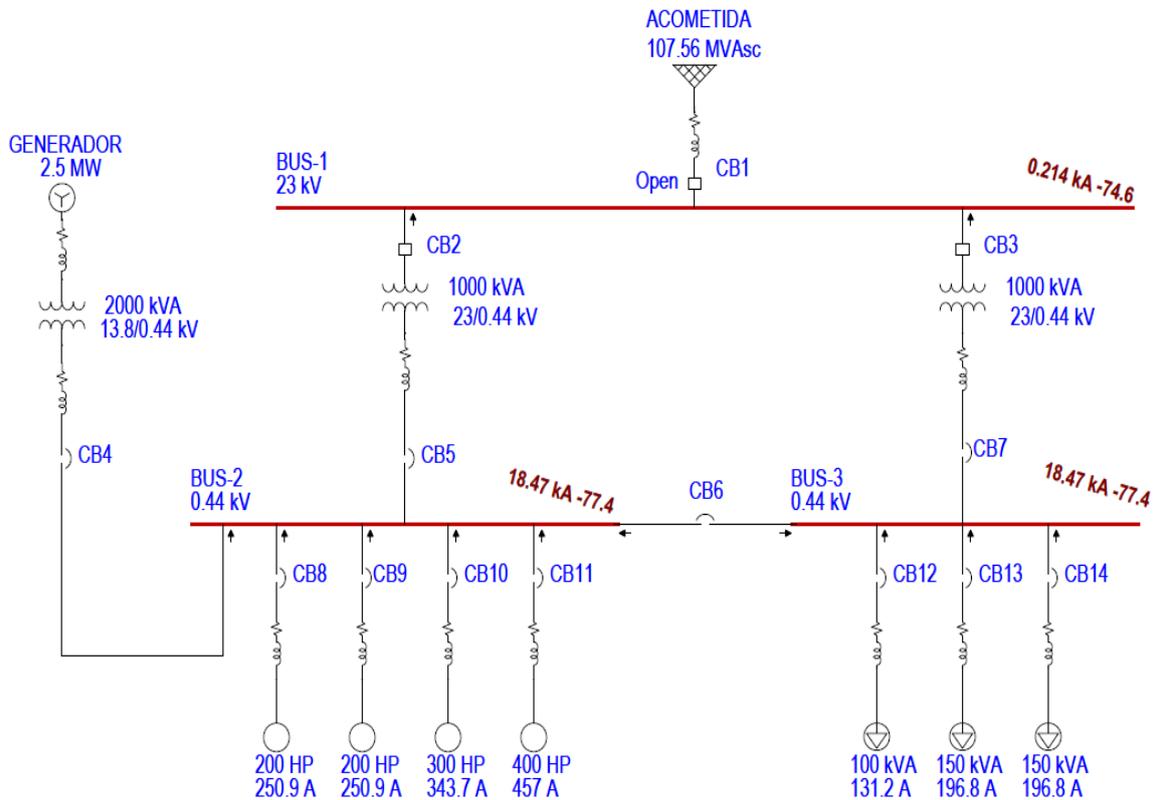


Figura 15. Sistema eléctrico alimentado solamente por el generador

Ya por último se toma el caso en el cual se simula el sistema eléctrico donde solamente es alimentado con el generador, se toman las mismas características de las simulaciones anteriores y se tiene que, las magnitudes de corriente de cortocircuito para la primera red bajan considerablemente en cada uno de los buses del sistema, esto traería un problema significativo si hubiese una falla, debido a que las protecciones no estarían ajustadas y coordinadas adecuadamente para estas magnitudes de corriente.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las magnitudes de corriente de cortocircuito para cada caso simulado.

Tabla 8. Resultado de las magnitudes de corriente de cortocircuito de las simulaciones

Simulando falla trifásica en:	Sistema alimentado solo por el suministrador de energía	Sistema alimentado por el suministrador de energía y el generador	Sistema alimentado solo por el generador.
Bus 1	2.82 kA	2.91 kA	0.21 kA
Bus 2	20.60 kA	41.92 kA	18.47 kA
Bus 3	13.64 kA	41.92 kA	18.47 kA

Como se logra observar en los datos de la tabla anterior, la topología de la red es importante al momento de seleccionar y coordinar las protecciones dentro de un sistema eléctrico, debido a que, al añadir o quitar fuentes de generación y cargas significativas, se produce un cambio en las magnitudes de la corriente de cortocircuito, este cambio de las magnitudes de corriente puede verse reflejado en el funcionamiento de las protecciones la cuales pueden presentar:

Operación innecesaria: cuando la protección sin haber una falla en el sistema es accionada, realizando una apertura innecesaria del interruptor [26].

Fallos de operación: se presenta en el momento que la protección debe despejar una falla y no lo hace o lo realiza demasiado tarde. Puede ser ocasionado por ajustes incorrectos o porqué la protección no está bien dimensionada [26].

Debido a los problemas que pueden presentar los sistemas eléctricos que tengan diferentes fuentes de energía o bien que su topología cambie constantemente, nace un nuevo concepto de protección nombrado “Protección Adaptiva” la cual es, aquella protección inteligente que le permite cambiar sus ajustes conforme a la topología de la red.

La protección adaptiva posee diferentes funciones, debido a que se utilizan relevadores digitales con microprocesadores que permiten que sean estos multifunción, los cuales tienen la capacidad de realizar funciones de medición protección, control, comunicación y supervisión; dando así la posibilidad de adaptarse a las condiciones del sistema eléctrico en tiempo real.

5.2 Principio de funcionamiento

Para implementar protecciones adaptivas a un sistema eléctrico es necesario contar con protecciones que sean digitales las cuales permitan enviar y recibir información de los parámetros de tiempo real del sistema eléctrico. Los avances en la tecnología de hoy en día permiten tener unidades de protección digitales que cuentan con microprocesadores los cuales se encargan de procesar las señales binarias que reciben de los convertidores analógicos digital y detectar si hay alguna anomalía o falla en el sistema.

Se puede hacer la relación de que un relevador digital es como una microcomputadora, debido a que esta posee las mismas características en el procesamiento de datos, pero con la diferencia de que el relevador digital se dedica a realizar funciones de protección [2].

En la siguiente figura se presenta el diagrama de bloques de una microcomputadora.

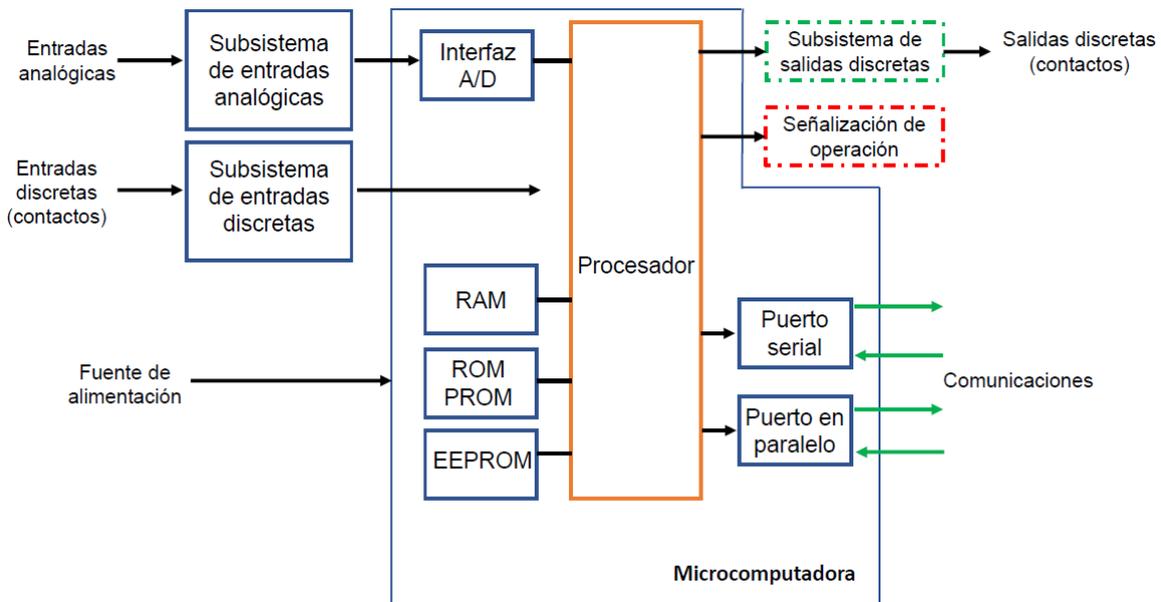


Figura 16. Diagrama de bloques de una microcomputadora.

A continuación, se describen los componentes del diagrama de bloques anterior

Entradas analógicas: son aquellas entradas las cuales presentan una variación continua con del tiempo tales como la tensión y la corriente.

Entrada y salidas discretas: son todas aquellas señales que solo pueden tener dos valores lógicos los cuales son encendió y apagado (1 y 0).

Interfaz A/D: un convertidor analógico digital (interfaz A/D) es aquel dispositivo electrónico que permite transformar una señal analógica (tensión o corriente) en una señal digital.

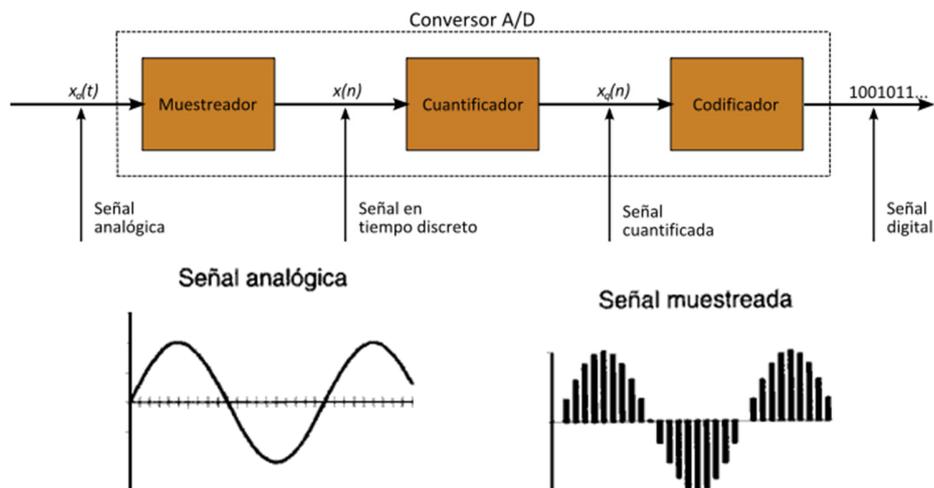


Figura 17. Diagrama de bloques de un convertidor A/D.

Memoria RAM: Las memorias de acceso aleatorio (RAM) son memorias de lectura y escritura, las cuales almacenan o escriben los datos en una posición de memoria con un tiempo de espera igual para cualquier posición, no siendo necesario seguir un orden para acceder a la información.

Memoria ROM: Memorias de solo lectura o también por sus siglas en inglés ROM (Read Only Memory), son memorias que contienen celdas de memoria no volátiles las cuales no se borran al momento de que se desenergizan. Este tipo de memorias almacenan la información de forma permanente.

Memoria EEPROM: Es un tipo de memoria ROM la cual puede ser programada y borrada eléctricamente.

Procesador: dispositivo electrónico capaz de realizar las instrucciones de un programa mediante operaciones lógicas y aritméticas.

Puerto Serial: Interfaz que permite enviar y recibir datos digitales bit a bit.

Puerto Paralelo: Interfaz que permite enviar y recibir datos digitales varios bits a la vez.

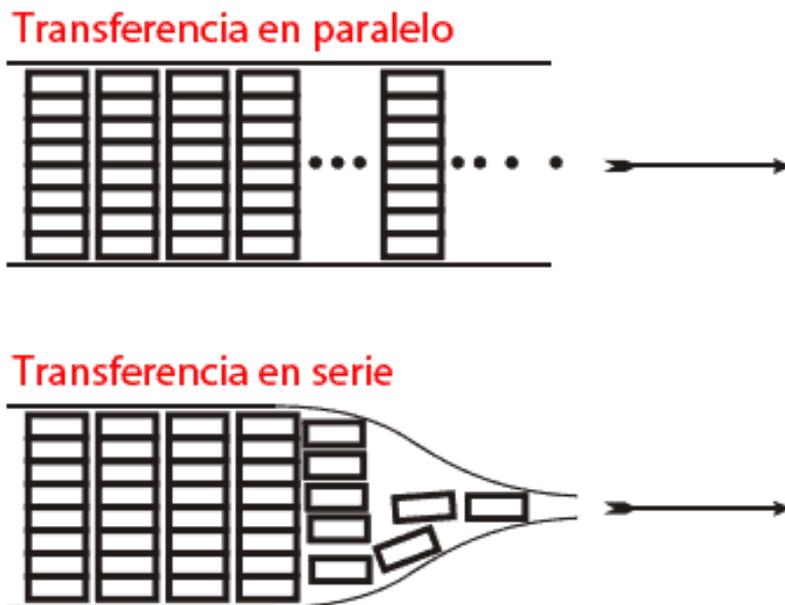


Figura 18. Esquema de transferencia de bits en paralelo y en serie.

Conociendo las definiciones de los componentes que conforman a una microcomputadora, el funcionamiento de un relevador digital basado en el diagrama de bloques de la figura 16 sería el siguiente [24] [25].

Inicialmente al relevador estará conectado a transformadores de instrumento TP's (transformadores de potencial) y TC's (transformadores de corriente), los cuales se encargan de censar, medir, reducir y mandar la corriente y voltaje de los conductores con el fin de que puedan ser leídas y procesadas por la unidad principal del relevador (procesador). La corriente y voltaje que es medida por los TP's y TC's es enviada y acondicionada por el subsistema de entradas analógicas, el cual tienen como función aislar eléctricamente los circuitos electrónicos del relevador de los circuitos de entrada y proteger al relevador de sobrevoltajes transitorios.

Las entradas discretas del relevador digital son utilizadas para acondicionar las señales provenientes de los interruptores, cuchillas u otros relevadores y así conocer el estado de estos.

Ya acondicionadas las señales de tensión y corriente, estas son enviadas al convertidor analógico digital el cual se encarga de muestrear las señales analógicas de voltaje y corriente y codificarlas a lenguaje binario, para que de esta manera puedan ser utilizadas por el procesador.

Una vez que las señales de voltaje y corriente han pasado por todo el proceso anterior, el procesador se encarga de realizar tareas lógicas y aritméticas de la información recibida con ayuda de sus diferentes tipos de memoria. La memoria RAM es utilizada para almacenar temporalmente los valores y acumular los resultados del programa de protección que estará almacenado en una memoria tipo no programable ROM o programable PROM, el programa de protección se ejecuta directamente desde ahí o bien se puede cargar inicialmente a la memoria RAM para su posterior ejecución. Los parámetros necesarios para ajustes del relevador y otros datos importantes que no varían con frecuencia se almacenan en la memoria EEPROM.

Las señales discretas del relevador reciben el apropiado procesamiento en el subsistema de salidas discretas, las cuales generalmente incluyen relevadores electromecánicos auxiliares para proveerlo de salidas discretas de tipo contacto. La parte de señalización de operación es la encargada de señalar la operación actual del relevador mediante señales lumínicas de diferentes colores (señales con luces led).

Los puertos serie y paralelo se utilizan para comunicación y son utilizados para el intercambio de información, para asignar valores de parámetros de ajuste, leer el registro de fallas o datos ajustables etc.

5.3 Relevadores de sobrecorriente y funciones adaptivas

El nuevo concepto de función adaptiva en los relevadores de sobrecorriente permite mejorar la funcionalidad de los relevadores convencionales de sobrecorriente, debido a que estos poseen nuevas mejoras en la sensibilidad y tiempo de respuesta ante fallas y escenarios de operación poco frecuentes, como pueden ser: aumento o disminución de carga considerable, operación de transferencia de potencia, etc.

Los relevadores adaptivos prometen una solución óptima para los centros de carga que tengan la modalidad de interconexión y conexión a la red general de distribución, es decir que cuenten flujos bidireccionales.

Considerando las características principales de un relevador de sobrecorriente tradicional, el relevador adaptivo permite no solamente tener ajustes fijos de corriente y tiempo, sino que además cuentan con la funcionalidad de poder ajustarse a los diferentes tipos de topología de la red.

De acuerdo a los estudios presentados en [27] se proponen un relevador adaptivo el cual puede aplicarse tanto a sistemas de potencia como en sistemas industriales, este tipo de relevador propuesto no requiere información de la red eléctrica adicional al de un relevador convencional, es decir, la rutina adaptativa se ejecuta únicamente con los fasores de corriente, esto exime de un incremento en la capacidad de hardware del relevador permitiendo así obtener la funcionalidad adaptativa del relevador a partir de un ligero cambio del firmware del relevador.

Por otro lado, de acuerdo a [29] se presentan una metodología de ajuste adaptivo mediante la programación lineal, la cual permite ajustar de forma automática la corriente de arranque y el dial de los relevadores, de modo que, su método se basa en la suma de los tiempos de operación de los relevadores para fallas en su zona. Puesto que en una red radial la corriente de cortocircuito disminuye conforme la falla se aleja de la fuente, y al utilizar la curva de tiempo inverso que ofrecen los relevadores, se puede tener operación rápida ante fallas en la zona propia del relevador y respaldo a los relevadores ubicados en la zona aguas abajo, como se muestra en la siguiente figura.

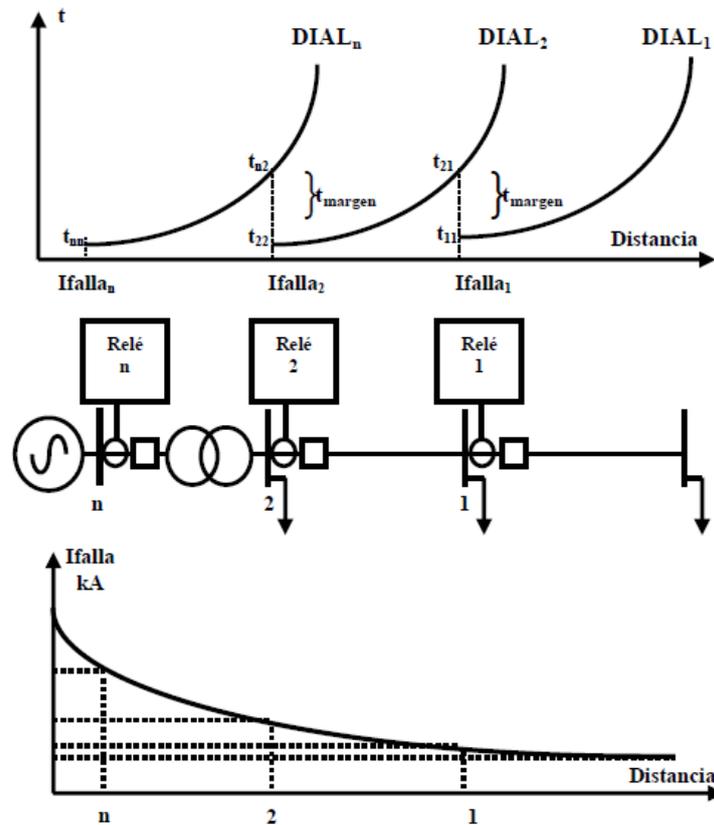


Figura 19. Coordinación de relés de sobrecorriente en un sistema radial.

Como se mencionó anteriormente se puede aplicar la función adaptiva al relevador mediante la lógica adaptable a nivel de relé, de modo que el relé modifique sus parámetros en función de las señales de entrada: voltaje, corriente y binarias [4].

Otra alternativa es mediante un enlace de comunicación para alterar en forma remota los parámetros de ajuste, en esta alternativa se pueden incluir varios relevadores en el esquema adaptable, y la función adaptable podrá ser establecida a nivel de subestación o a nivel de sistema, tal y como se menciona en [29].

Los anteriores trabajos mencionados demuestran que, en la actualidad existen ya diferentes estudios sobre la aplicación de la función adaptiva en los relevadores de sobrecorriente, eso se debe a que permiten resolver el problema de la coordinación ante las diferentes topologías de red, permitiendo tener una mayor confiabilidad, continuidad, seguridad y selectividad en el servicio eléctrico.

Capítulo 6

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

6.1 Introducción

Actualmente los sistemas eléctricos industriales cuentan con protecciones de sobrecorriente que permiten protegerlos ante la presencia de fallas eléctricas, varias de estas protecciones son fabricadas a base de equipo electrónicos con microprocesadores, los cuales tienen la posibilidad de programar diferentes ajustes de las protecciones; sin embargo, en México no se ha explotado las ventajas que presentan estos equipos de protección, en donde se pueden programar 3 o 4 ajustes de protección en un mismo equipo dependiendo de la topología que presente el sistema eléctrico.

En el 2013, la constitución política de México sufrió cambios y se creó la reforma energética, de la cual se desprendieron una serie de documentos como, leyes secundarias, disposiciones generales, reglamentos, manuales operativos, entre otros, los cuales establecen requerimientos que deben cumplir los sistemas eléctricos de generación, transmisión, distribución y centros de carga, con la finalidad de asegurar la eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema eléctrico Nacional.

Uno de los documentos importantes es el Código de Red, el cual establece 8 requerimientos para los centros de carga, entre los que se encuentran las protecciones, estableciendo que los centros de carga serán responsables de implementar, coordinar y mantener sus sistemas de protección, incluyendo los canales de comunicación necesarios, ante esta exigencia la implementación de sistemas de protección adaptativas, se observa como una oportunidad para poder mantener los sistemas eléctricos coordinados ante diferentes topologías de operación.

En este capítulo se estudiará un modelo de red tomado de un sistema eléctrico industrial, con la finalidad de analizar el esquema de protección actual ante las diferentes topologías y/o escenarios de operación que pueda presentar el sistema. Una vez realizado el análisis se propondrá un nuevo esquema de protección adaptivo basado en relevadores de sobrecorriente, el cual permita mejorar la confiabilidad, continuidad y seguridad del sistema eléctrico ante las diferentes topologías y/o escenarios de operación en los que generalmente opera el sistema.

6.3 Consideraciones para la implementación de protecciones adaptivas de sobrecorriente

La eficiente y oportuna localización de fallas en los sistemas eléctricos es un problema complejo, debido a que algunos sistemas presentan un gran número de ramificaciones y topologías a lo largo de su red. Lograr reducir los niveles de falla, requiere de la implementación de dispositivos los cuales permitan ofrecer una adecuada protección sobre cada equipo ante cualquier evento o cambio en la topología del sistema eléctrico.

Una solución confiable en la protección y coordinación de los sistemas eléctricos ante los eventuales cambios de la topología, es la implementación de protecciones adaptivas, las cuales son Dispositivos Electrónicos Inteligentes (DEI) basados en microprocesadores que ayudan a mejorar el tiempo de respuesta, con capacidades multifunción y además poseen la capacidad de auto-diagnosticarse.

En los últimos años se han realizado en diferentes países estudios y pruebas sobre el comportamiento de las protecciones adaptivas en los sistemas eléctricos. Estos estudios han tenido resultados satisfactorios, debido a que indican que las protecciones adaptivas sobrepasan las limitaciones de los relevadores convencionales (mecánicos y de estado sólido).

Para lograr la implementación satisfactoria de protecciones adaptivas a cualquier sistema eléctrico, es necesario conocer los siguientes puntos:

- El diagrama unifilar de la instalación.
- Los diferentes elementos del sistema a proteger como conductores, cargas, transformadores, generadores, etc.
- El tipo de las protecciones existentes, así como sus características de operación.
- Los diferentes procesos que se realizan dentro de la instalación, debido a que en estos puede cambiar la cargabilidad o topología del sistema eléctrico.
- Definir los distintos escenarios de operación en conjunto con personal de operación encargado de los diferentes procesos del sistema.
- Contar con el estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones actualizados.
- Realizar un levantamiento de la instalación eléctrica, para conocer los posibles puntos de ubicación donde se instalarán las protecciones adaptivas.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

En cuanto a los sistemas de emergencia, es necesario considerar cuales son las cargas que necesitan ser alimentadas en caso de que llegue a faltar la energía eléctrica por parte del suministrador, así como tener en cuenta la cargabilidad del generador o generadores para cada escenario analizado.

Por otra parte, se debe contar con un esquema de comunicación confiable, el cual se encuentre en comunicación constante con los relevadores adaptivos, para que el esquema de protecciones opere correctamente y si es necesario contar con un esquema de protección de respaldo que no dependa de la comunicación y que bien sea por medición de caídas de tensión o sobrecorriente de forma tradicional [24].

6.4 Modelado del sistema eléctrico

El modelado de sistemas eléctricos permite conocer el comportamiento de las variables eléctricas e identificar los posibles fenómenos que ocurren ante las diferentes condiciones operativas y/o de falla; gracias a los múltiples softwares que hay en el mercado, es posible determinar el impacto en cada punto de la red y con ello poder realizar mejoras al sistema eléctrico.

En relación al análisis de las corrientes de cortocircuito del sistema eléctrico presentado en la figura 20, se utilizó el software especializado ETAP, este software es utilizado para el modelado de sistemas eléctricos de potencia en baja, media y alta tensión. Se optó por utilizarlo debido a la confiabilidad que presenta, debido a que es un software especializado en el análisis, simulación, monitoreo, control, optimización y automatización de sistemas de energía eléctrica.

El sistema eléctrico que se muestra en este trabajo de tesis, presenta 3 diferentes estados de operación; la mayor parte del año, la planta tiene una capacidad normal en la producción, lo cual hace que se tenga una Cargabilidad del 75% (escenario 1), de 1 a 3 meses dependiendo de la necesidad que requiera la planta, se presenta una operación a su máxima capacidad, es decir, tienen una Cargabilidad del 100% (escenario 2), para fin de año, se realiza los mantenimientos preventivos y correctivos a los transformadores, motores, generadores etc. con una Cargabilidad de 75%. (escenario 3).

Por lo mencionado anteriormente, en la siguiente tabla se presentan los escenarios a simular, de los cuales se consideran los 3 principales escenarios de operación explicados en el párrafo anterior, al mismo tiempo a estos 3 escenarios principales se le añaden otras condiciones que se pueden presentar al momento en que están operando, como la interrupción en el suministro de energía por parte de CFE o bien que el suministro de energía no sea el adecuado (se tenga una baja tensión) y sea necesario arrancar el generador para compensar este problema; debido a esto último, se considera en este trabajo de tesis un total de 9 escenarios a simular, como se muestra en la tabla 9.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

Tabla 9. Escenarios de operación considerados en la simulación de cortocircuito en ETAP

Escenario	Suministrador	Generador	Operación del Sistema Eléctrico
1	✓	✗	Normal
2	✓	✗	Máxima capacidad
3	✓	✗	Mantenimiento
4	✗	✓	Normal
5	✗	✓	Máxima capacidad
6	✗	✓	Mantenimiento
7	✓	✓	Normal
8	✓	✓	Máxima capacidad
9	✓	✓	Mantenimiento

En las figuras 21 a 29, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de fallas trifásicas, debido a que son generalmente las que presentan mayor magnitud de corriente de cortocircuito al momento de ocurrir una falla en los sistemas eléctricos.

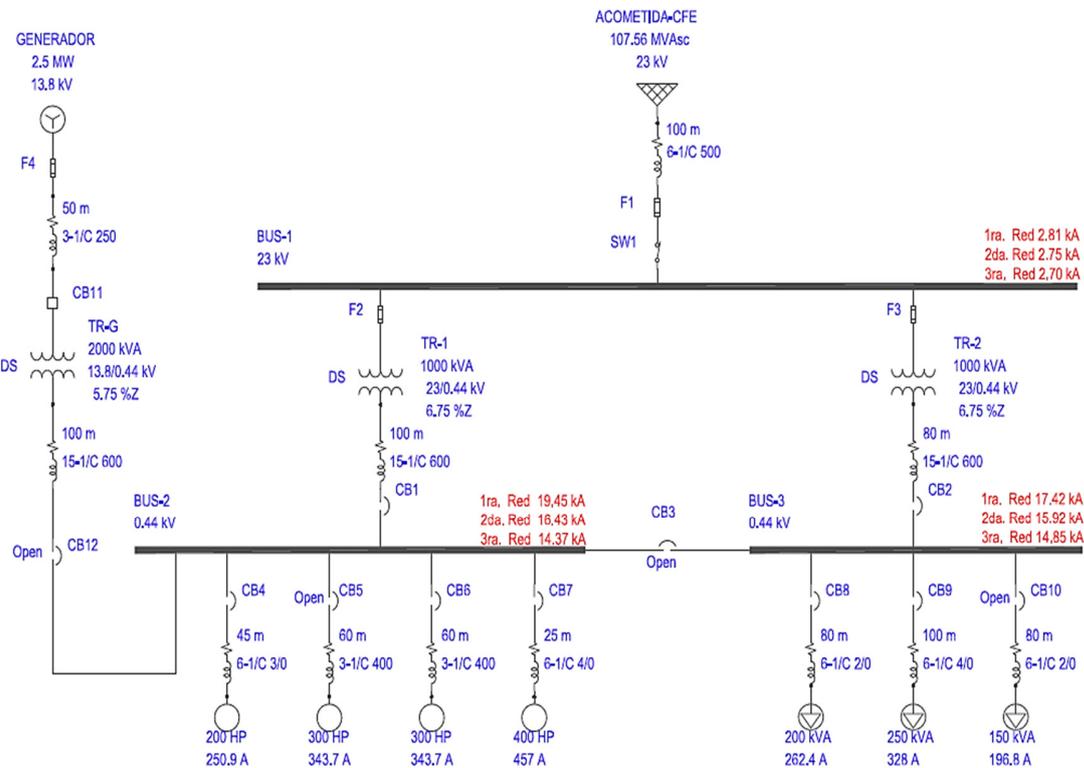


Figura 21. Escenario 1. Sistema eléctrico en operación normal.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

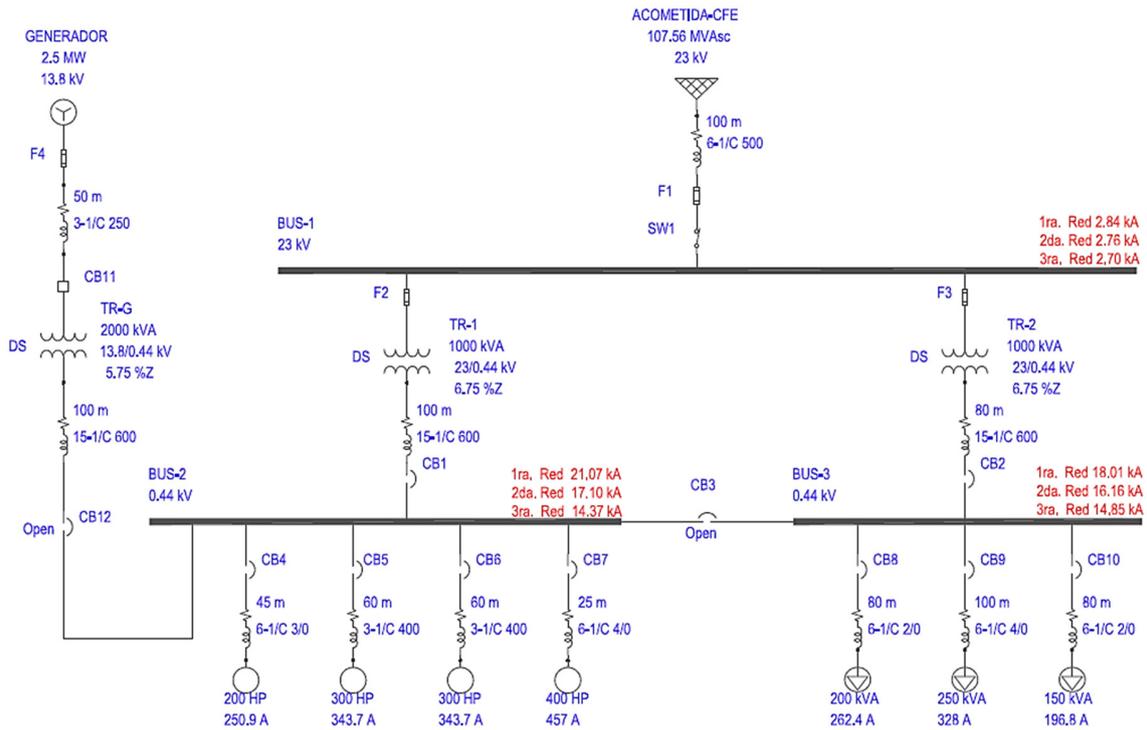


Figura 22. Escenario 2. Sistema eléctrico operando con la máxima capacidad.

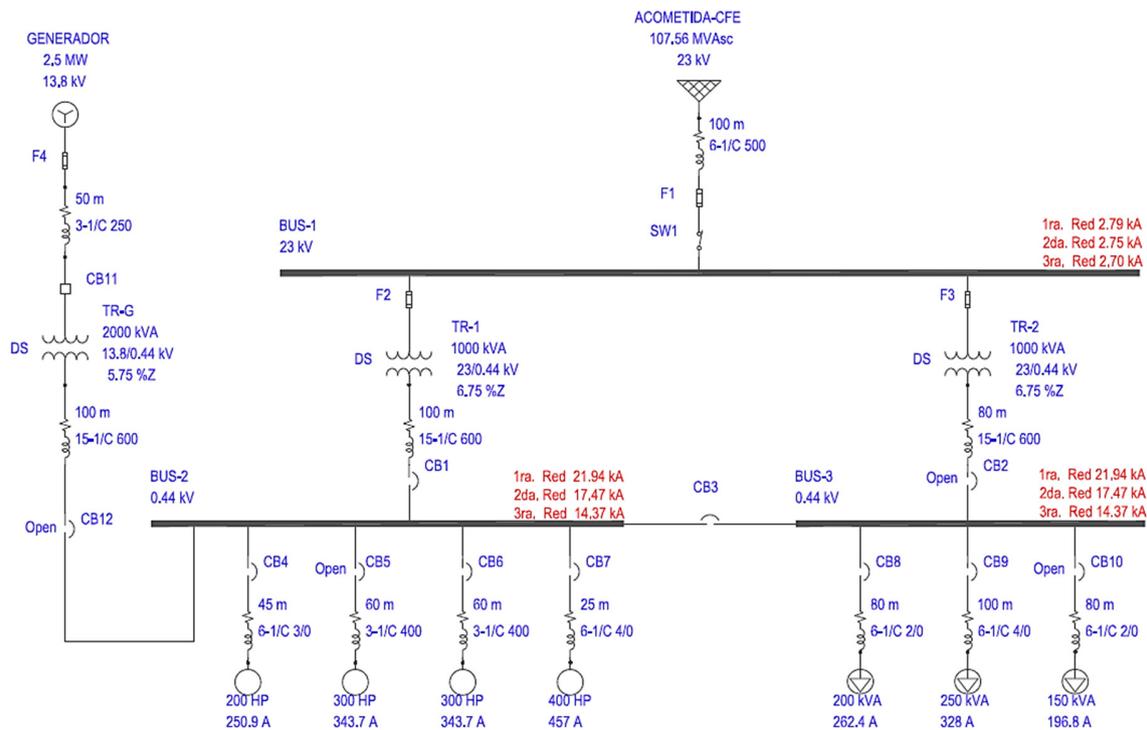


Figura 23. Escenario 3. Sistema eléctrico operando sin un transformador (mantenimiento).

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

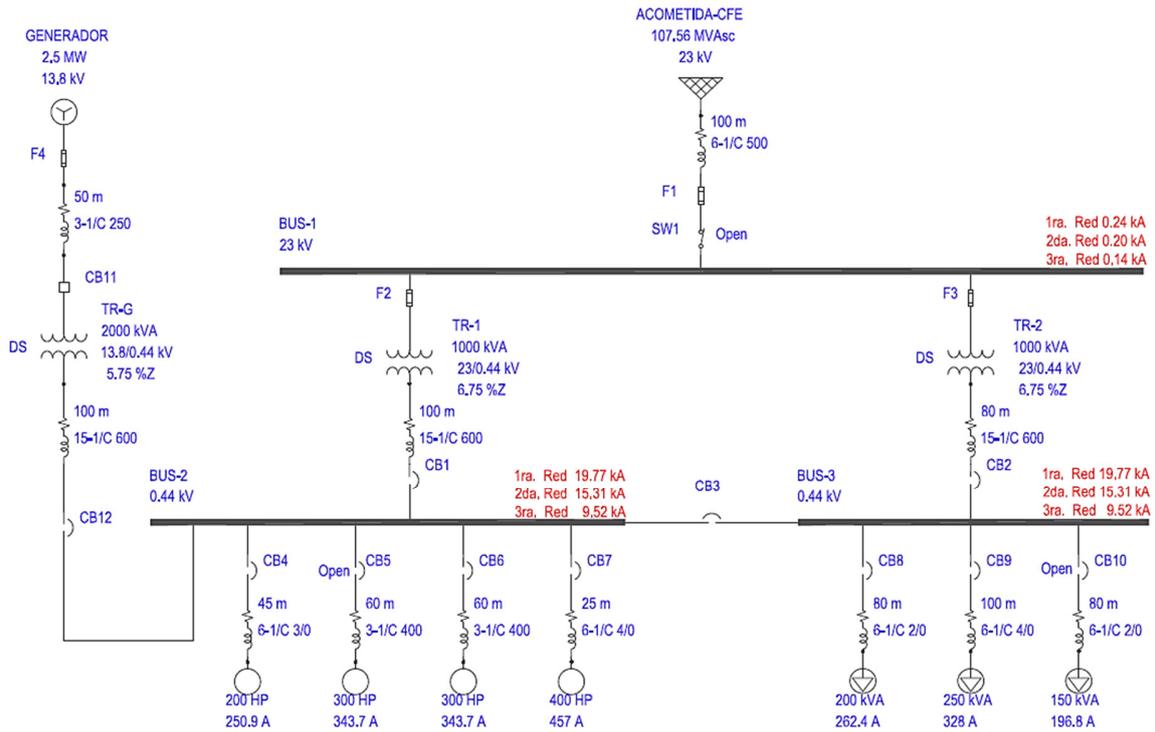


Figura 24. Escenario 4. Sistema eléctrico en operación normal sin el suministro de CFE.

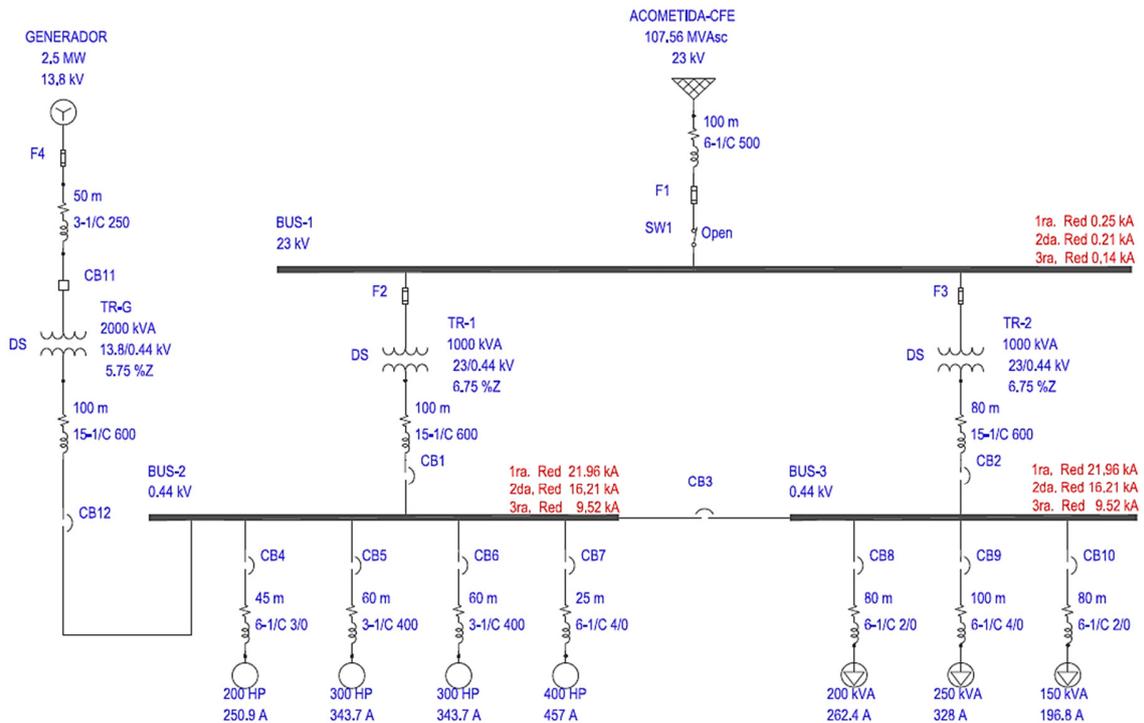


Figura 25. Escenario 5. Sistema eléctrico operando con la máxima capacidad y sin el suministro de CFE.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

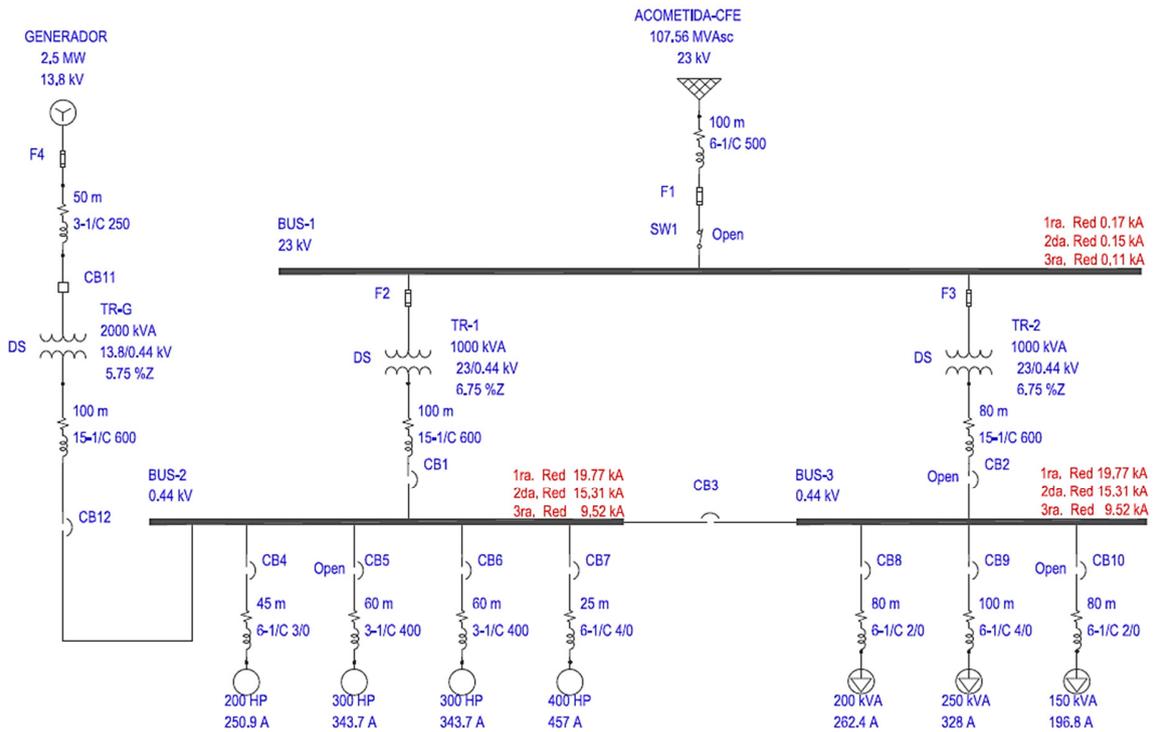


Figura 26. Escenario 6. Sistema eléctrico operando sin un transformador (mantenimiento) y sin el suministro de CFE.

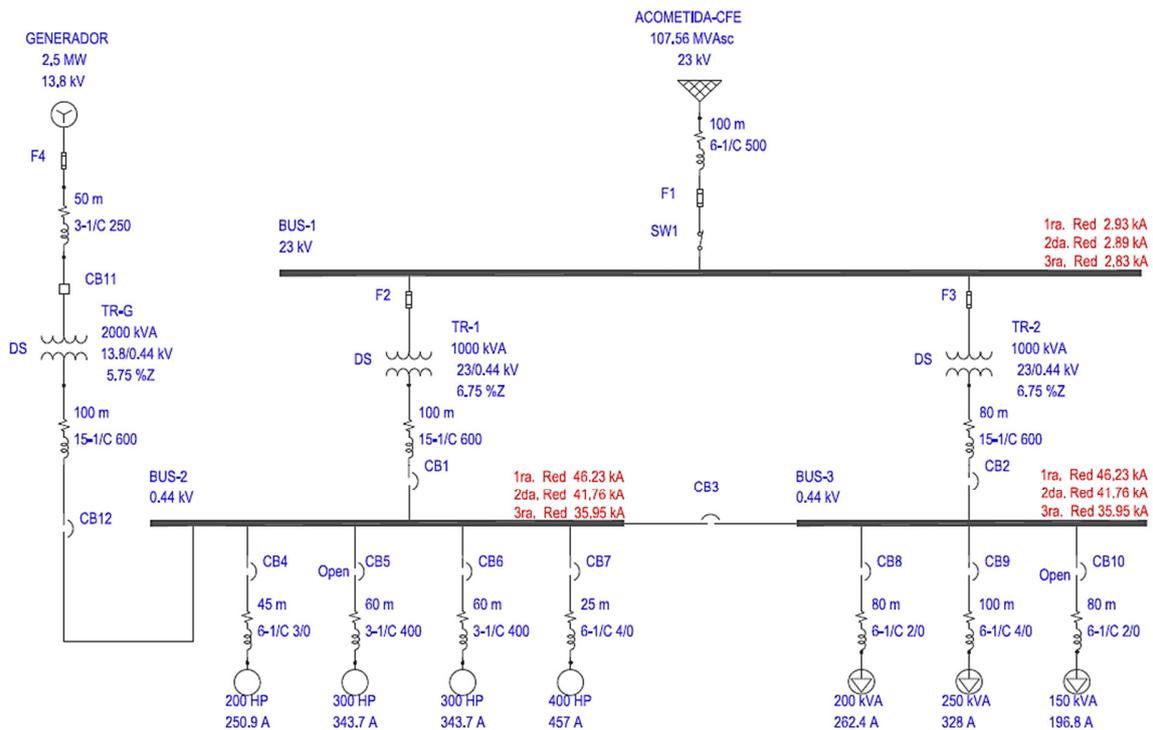


Figura 27. Escenario 7. Sistema eléctrico en operación normal más el generador de emergencia.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

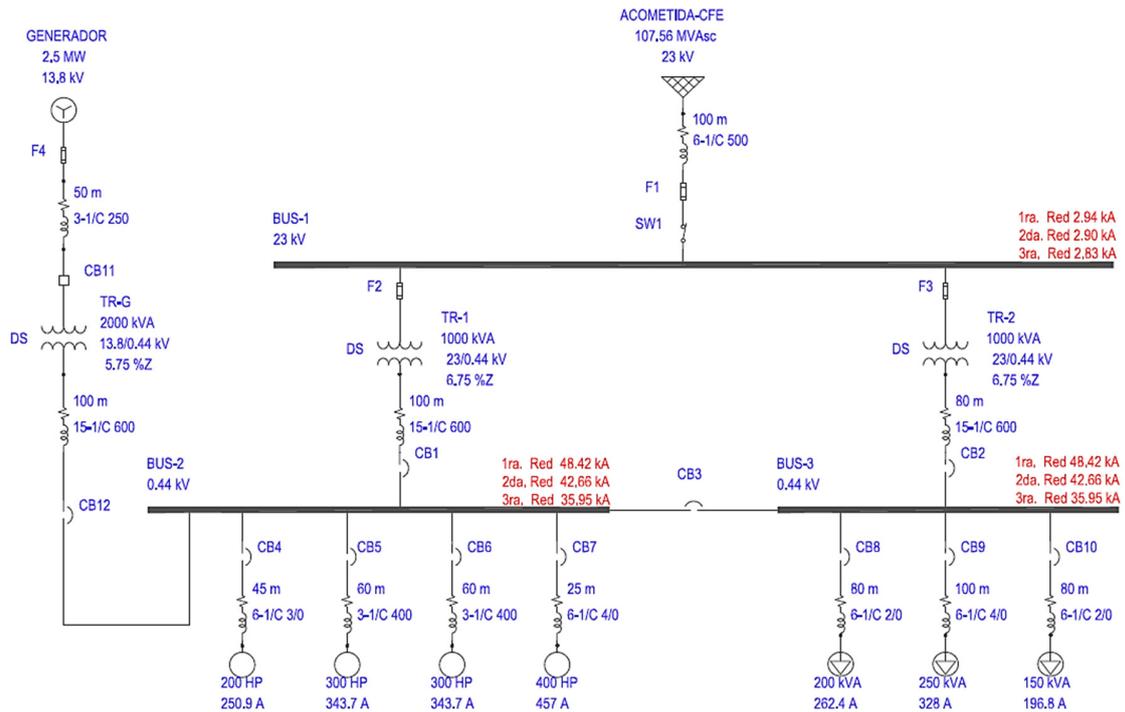


Figura 28. Escenario 8. Sistema eléctrico operando con la máxima capacidad más el generador de emergencia.

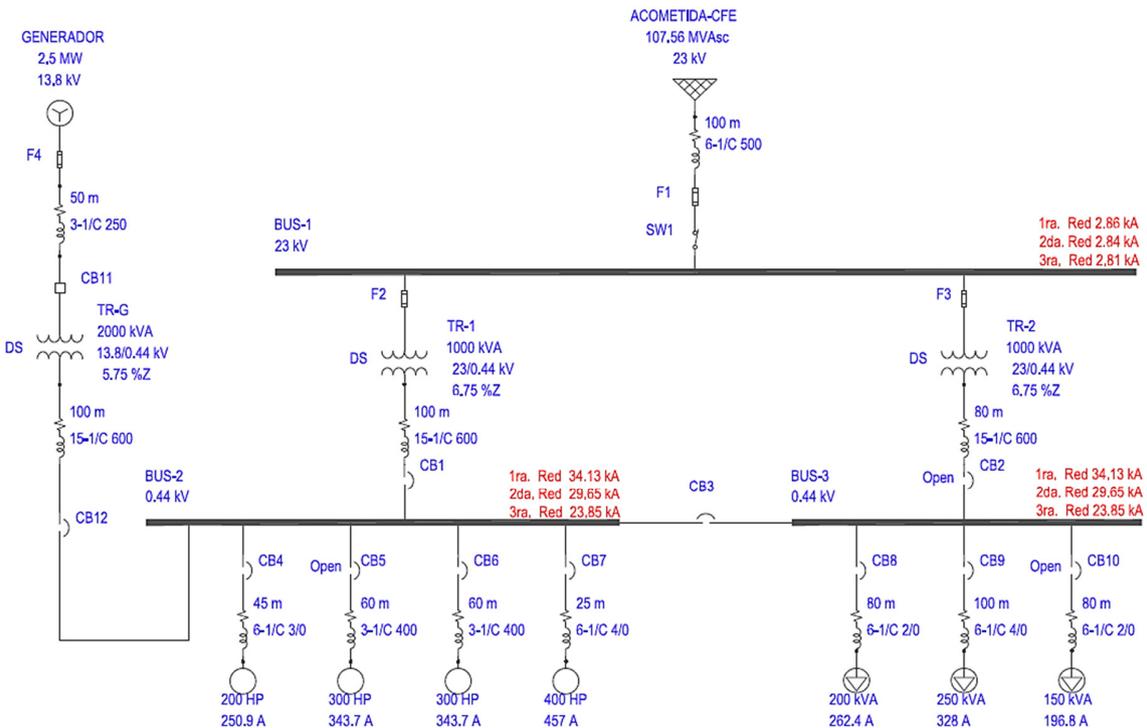


Figura 29. Escenario 9. Sistema eléctrico operando sin un transformador (mantenimiento) más el generador de emergencia.

6.5 Análisis de los resultados de las simulaciones

De acuerdo con las figuras mostradas anteriormente y con la siguiente tabla 10, en la cual se muestra un resumen de los resultados de las corrientes de cortocircuito obtenidas en los diferentes escenarios de operación; se demuestra que, el cambio en la topología de este sistema eléctrico influye directamente en las magnitudes de corriente de cortocircuito.

Tabla 10. Resultados de corrientes de cortocircuito.

Simulando falla trifásica	Bus 1			Bus 2			Bus 3		
	1 ^{ra} red	2 ^{da} red	3 ^{ra} red	1 ^{ra} red	2 ^{da} red	3 ^{ra} red	1 ^{ra} red	2 ^{da} red	3 ^{ra} red
Escenario 1	2.81	2.75	2.70	19.45	16.43	14.37	17.42	15.92	14.85
Escenario 2	2.84	2.76	2.70	21.07	17.10	14.37	18.01	16.16	14.85
Escenario 3	2.79	2.75	2.70	21.94	17.47	14.37	21.94	17.47	14.37
Escenario 4	0.24	0.20	0.14	19.77	15.31	9.52	19.77	15.31	9.52
Escenario 5	0.25	0.21	0.14	21.96	16.21	9.52	21.96	16.21	9.52
Escenario 6	0.17	0.15	0.11	19.77	15.31	9.52	19.77	15.31	9.52
Escenario 7	2.93	2.89	2.83	46.23	41.76	35.95	46.23	41.76	35.95
Escenario 8	2.94	2.90	2.83	48.42	42.66	35.95	48.42	42.66	35.95
Escenario 9	2.86	2.84	2.81	34.13	29.65	23.85	34.13	29.65	23.85

Nota: Todas las magnitudes corrientes de falla son en kA.

Realizando el análisis de las corrientes de cortocircuito presentadas en la tabla anterior, se observar lo siguiente: teniendo los ajustes de las protecciones de acuerdo con el escenario 1 (cuando la planta opera normalmente) y posteriormente aumentando la producción de acuerdo con el escenario 7, donde se observa un aumento de carga debido al arranque de los motores y de la carga que se encuentran en reserva; esto ocasiona un cambio en la topología y aumento de las corrientes de cortocircuito; lo cual afecta directamente en la coordinación de las protecciones, debido a que, ante las condiciones anteriormente descritas, el sistema de protección actual no está coordinado adecuadamente, presentando tiempos de operación menores a los iniciales “operación normal”, así como disparos innecesarios debido al aumento de la carga en los tableros Bus-2 y Bus-3, en otras palabras las protecciones no operan de manera correcta ante la presencia de una falla en los tableros Bus-2 y Bus-3, debido a que en estos existe una gran diferencia entre las magnitudes de corriente de cortocircuito de acuerdo a los escenarios 1 y 7.

Este tipo de situaciones se observa a menudo en las industrias y su principal causa se debe a que normalmente cuando hay un cambio en la topología del sistema eléctrico, el personal de mantenimiento encargado no realiza los nuevos cambios (ajustes) a las protecciones correspondientes para que estas operen de manera efectiva ante una falla en el sistema.

Si se realiza el análisis detallado de las magnitudes de corriente de cortocircuito del sistema eléctrico operando normalmente y comparando los resultados de las magnitudes de corriente con los demás escenarios de operación, se obtiene que

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

en la mayoría de los casos existe una diferencia entre las magnitudes de corriente, lo cual provoca que, ante los cambios en la topología del sistema eléctrico, las protecciones no protejan de manera coordinada y selectiva.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado y en base a los resultados obtenidos y mostrados, es conveniente que al sistema eléctrico se le instalen protecciones adaptativas basadas en relevadores a base de microprocesadores con capacidades para implementar 3 o 4 curvas de ajuste, con la finalidad de mejorar la confiabilidad, seguridad y continuidad del suministro eléctrico a las cargas.

6.6 Esquema de protección propuesto

Actualmente las protecciones con las que cuenta esta planta no tienen la capacidad de modificar sus parámetros de ajuste, lo cual es un inconveniente de acuerdo a lo explicado anteriormente.

Una solución a las limitaciones de la coordinación y protección actuales de este sistema industrial, es utilizar relevadores de sobrecorriente adaptivos, los cuales permitan modificar sus ajustes de magnitud, de corriente y tiempo. Al implementar un esquema de protecciones adaptivo, se consigue tener un sistema eléctrico más confiable y seguro, debido a que las protecciones pueden modificar sus ajustes ante las diferentes topologías, obteniendo una mayor sensibilidad en la detección y liberación de fallas. Considerando el análisis y los resultados presentados en el punto 6.5, se propone el nuevo esquema de protección que se presenta en la figura 30.

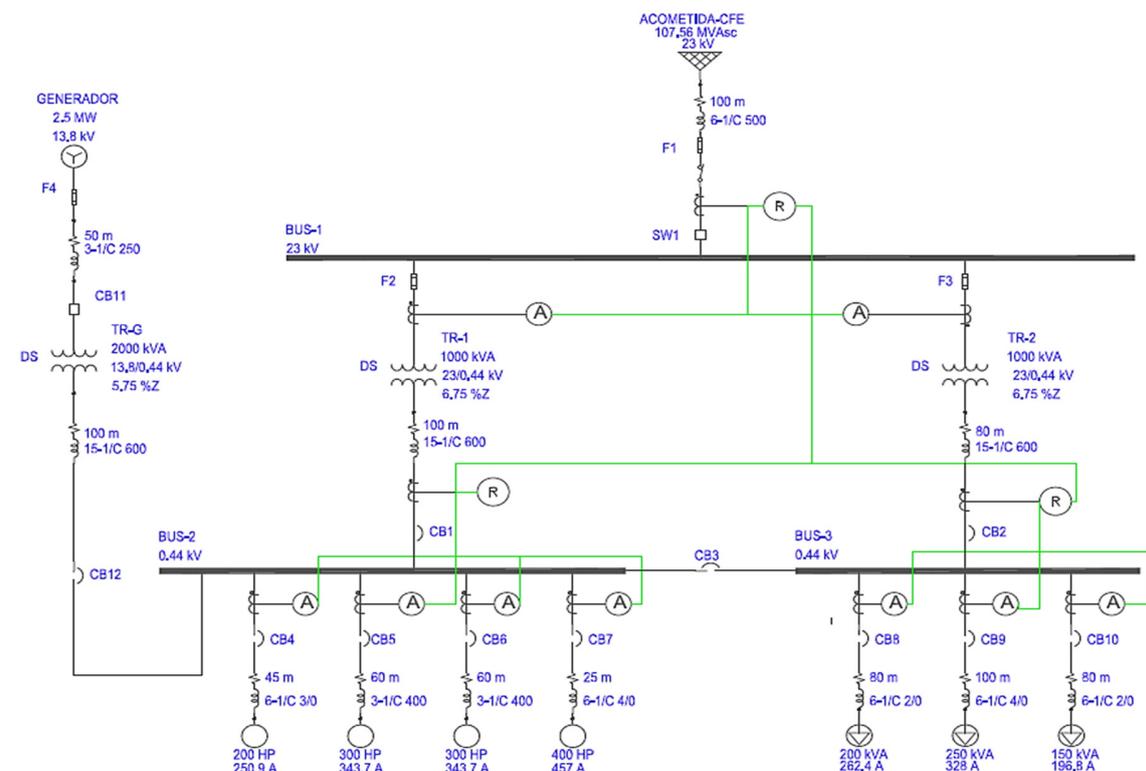


Figura 30. Esquema de protección adaptivo propuesto para el sistema eléctrico.

El nuevo esquema de protección no excluye a las protecciones existentes (siempre y cuando estas cuenten con entradas digitales) más bien, añade nuevos elementos como medidores de corriente, los cuales se posicionan en cada ramal de la red, permitiendo tener una comunicación constante con los nuevos relevadores de sobrecorriente SIEMENS-7SJ802. Al adquirir estos elementos al sistema, se logra el monitoreo de las corrientes a lo largo de la red, lo cual permite conocer en tiempo real si hay algún cambio en la topología del sistema.

En el caso de que alguna carga saliera de operación por falla o mantenimiento, automáticamente los medidores de corriente detectarán este cambio en la topología y enviarán las nuevas magnitudes de corriente a los relevadores adaptivos para que estos automáticamente realicen los cálculos correspondientes y se ajusten a los nuevos parámetros de protección calculados.

Para la programación de los relevadores de protección adaptivos, es posible utilizar el método basado en la estimación del equivalente de Thévenin en tiempo real tal como se menciona en [29] o bien crear una rutina en el relevador que se ejecute con los fasores de corriente tal y como se explica en [27], debido a que este método permite calcular el tiempo y las magnitudes de corriente en caso de un cambio en la topología, sin embargo; para este trabajo de tesis no se profundiza en el método de programación a los relevadores SIEMENS-7SJ802.

6.7 Resultados del esquema de protección propuesto

El esquema de la figura 20 muestra que el sistema eléctrico actual cuenta con interruptores termomagnéticos, lo cual implica tener ajuste de tiempo corto (protección contra cortocircuito) y tiempo largo (protección contra sobre carga); al incluir los relevadores SIEMENS-7SJ802 como protecciones principales tal y como se muestra en el esquema de protección de la figura 30, se logra obtener las mismas funciones de protección que se tienen actualmente, sin embargo, al ser estos programados con algoritmos dinámicos (funciones adaptivas) se añade una mayor sensibilidad en la detección y mitigación de las fallas, debido a que estos nuevos relevadores cuentan con escalones de ajuste que van desde 0.01 Amperes (0.10A hasta 35A) y 0.01 segundos (0.00s hasta 60.00s) en las funciones de sobrecorriente e instantáneo.

En las siguientes figuras se muestran los ajustes de las protecciones actuales del sistema eléctrico.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

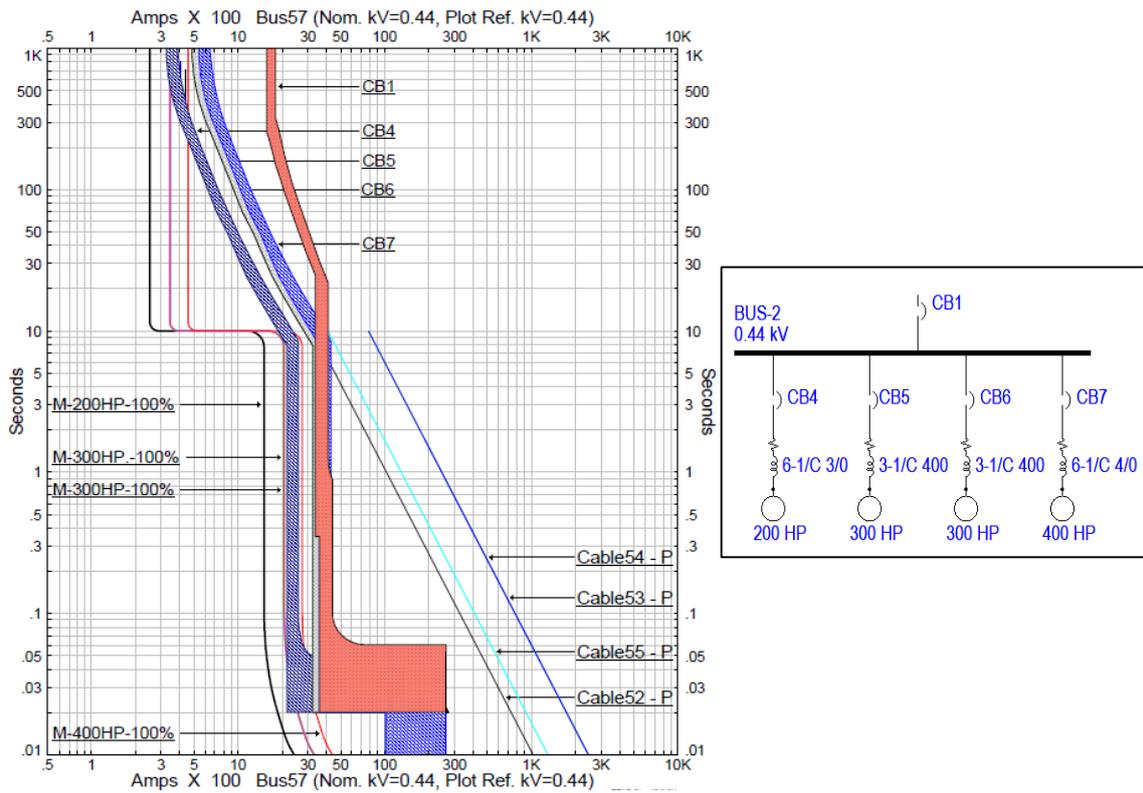


Figura 31 Ajuste actuales de los interruptores en el tablero Bus-2.

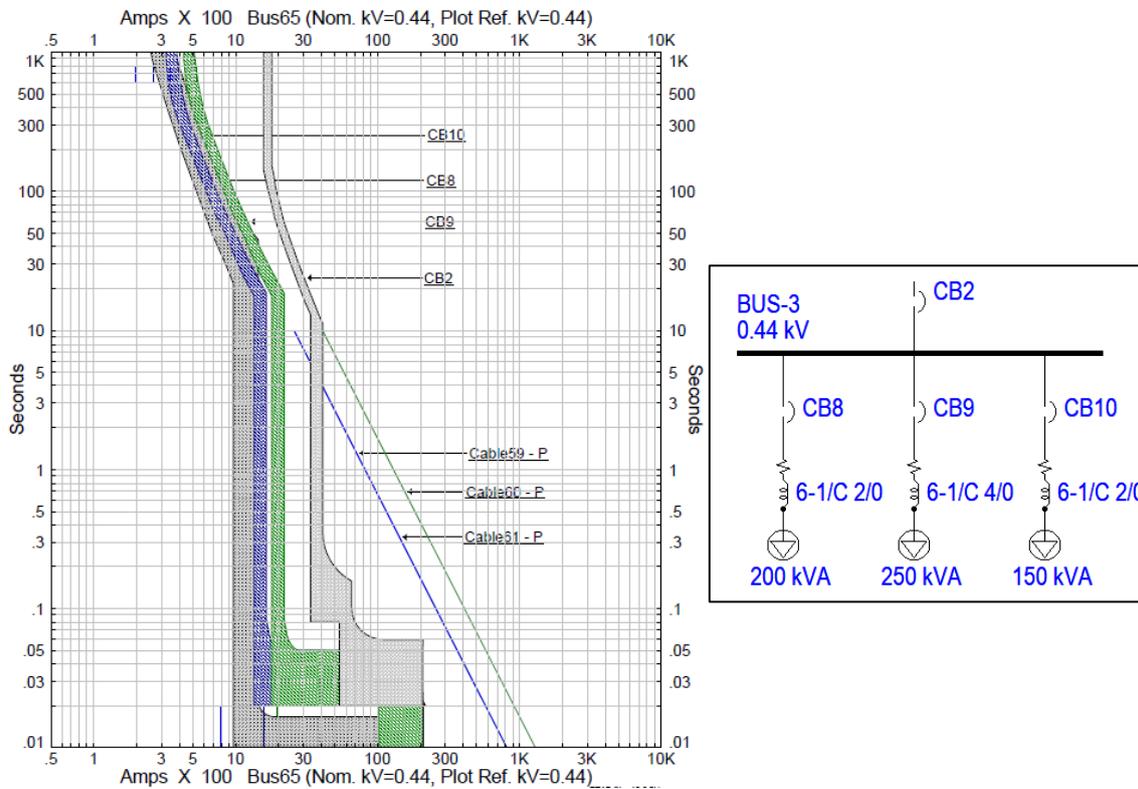


Figura 32 Ajuste actuales de los interruptores alojados en el tablero Bus-3.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

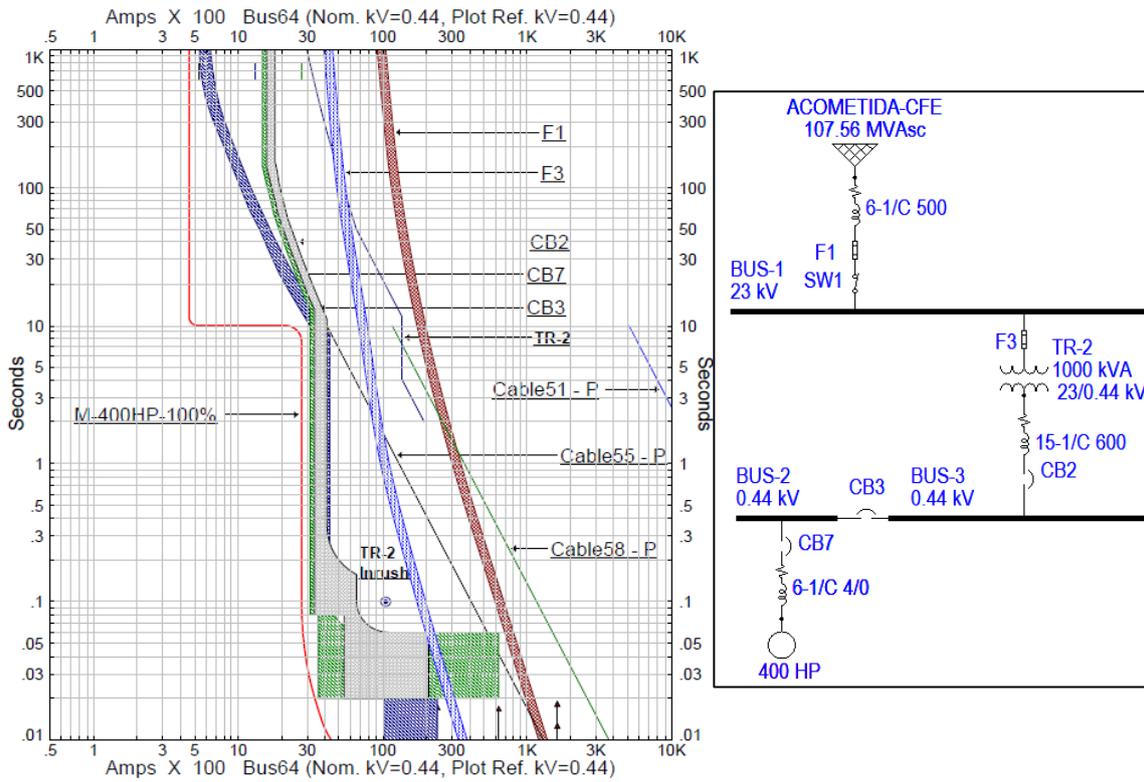


Figura 33. Ajustes actuales de las protecciones CB2, CB3, CB7, F1 Y F3.

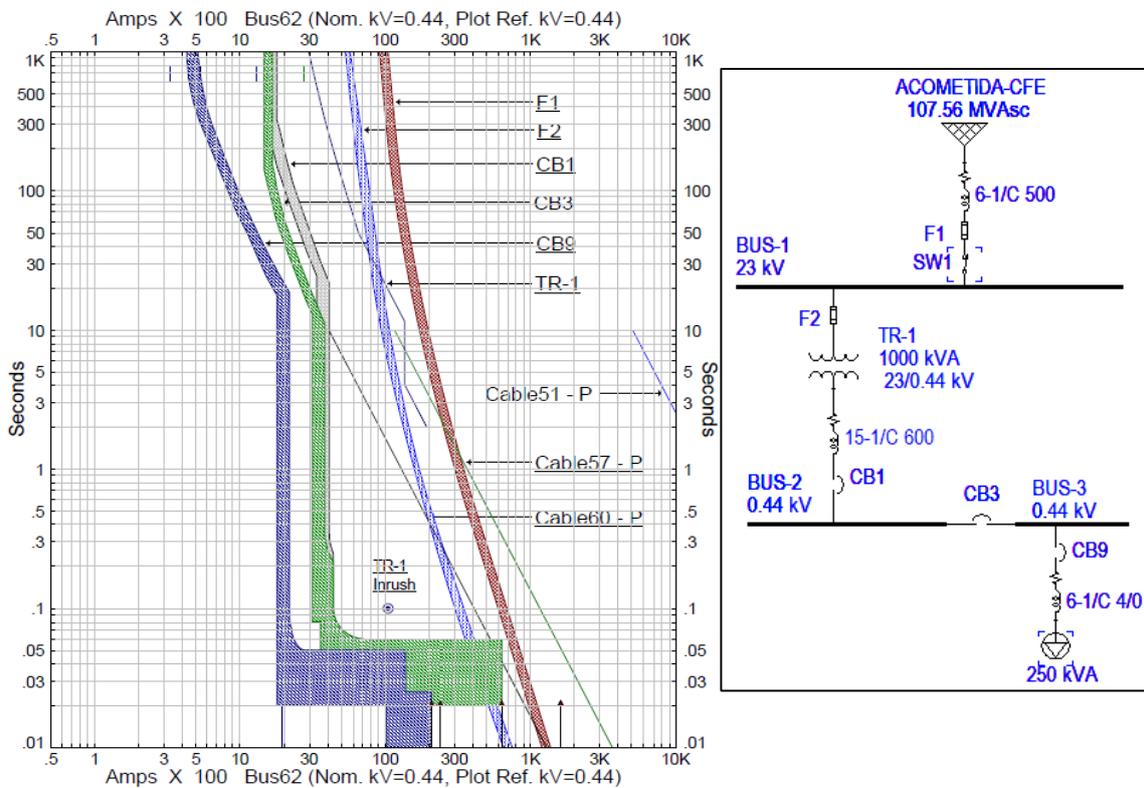


Figura 34. Ajustes actuales de las protecciones CB1, CB3, CB9, F1 Y F2.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

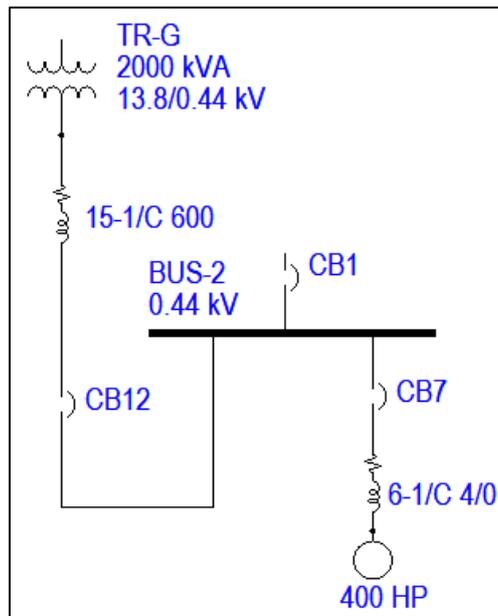
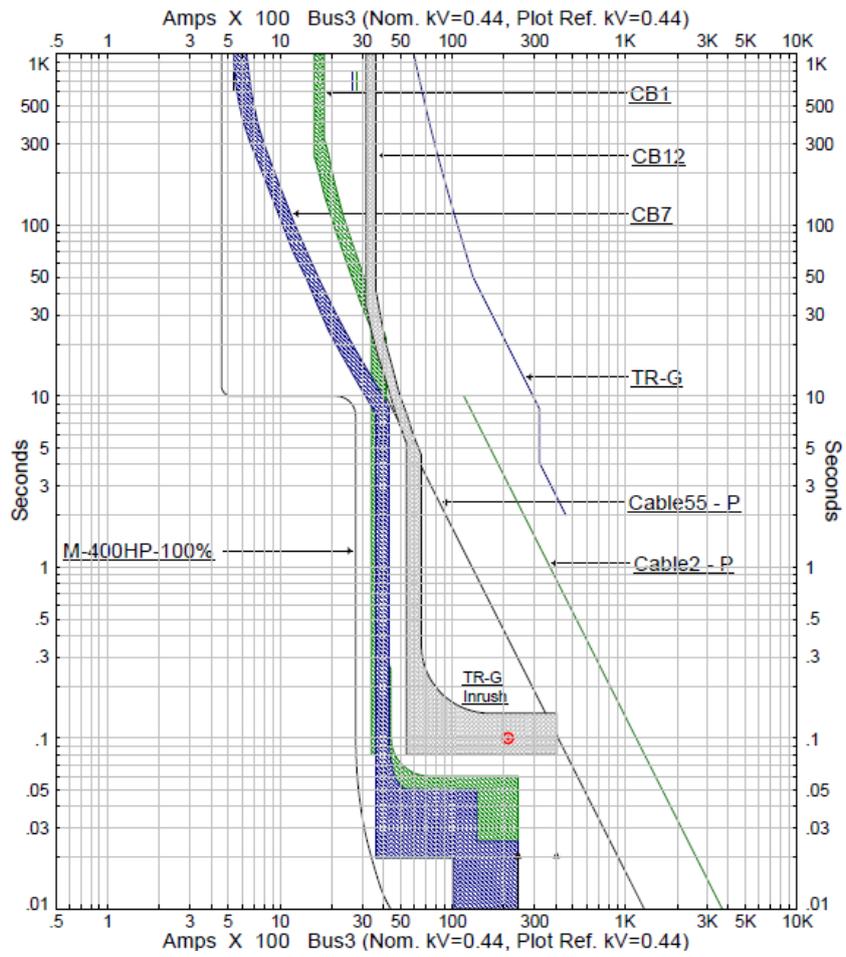


Figura 35. Ajustes actuales de las protecciones CB1, CB7, CB12.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

De acuerdo con los ajustes mostrados en las figuras anteriores y suponiendo que salgan de operación por mantenimiento los motores de 400 y 300Hp, la protección principal del tablero Bus-2 (CB1) presentar los mismos ajustes actuales (figura 31), lo cual no es recomendable debido a que la corriente de cortocircuito disminuye para este caso. Con el nuevo esquema de protección basado en relevadores adaptivos, el relevador (Relay 1) tendrá la posibilidad de adquirir los siguientes parámetros de ajuste para el caso mencionado anteriormente.

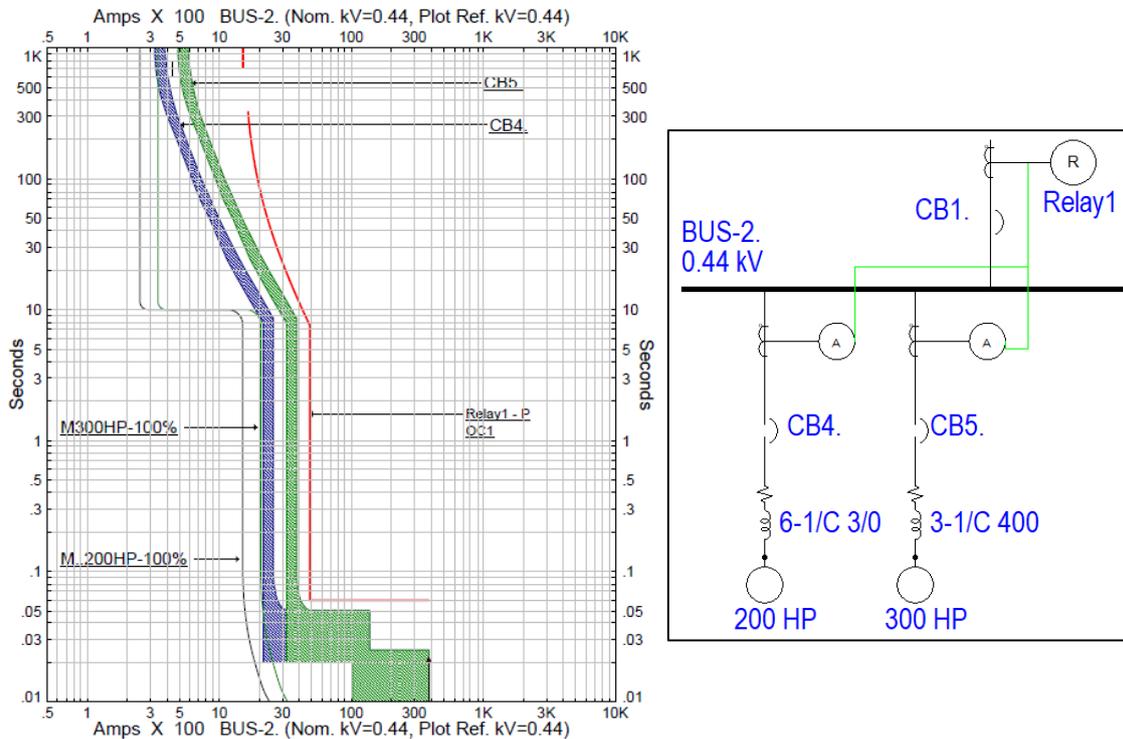


Figura 36 Ajustes propuestos del relevador adaptivo Relay 1

Además si al caso anterior se le añade que el TR-1 falla y deja de suministrar energía, se cerrará el interruptor de enlace CB3 para entregar energía al tablero Bus-2 a partir del transformador TR-2, esto último implica tener otros parámetros de ajuste en las protecciones de los tableros Bus-1, Bus-2 y Bus-3 debido al cambio de topología. A partir de este cambio los relevadores adaptivos volverían a realizar los nuevos ajustes, lo cual se puede observar en la figura 37 con los ajustes propuestos que pueden adquirir los relevadores adaptivos Relay 1, Relay 2 y Relay 3.

Ejemplo práctico de protecciones adaptativas aplicado a un sistema eléctrico industrial

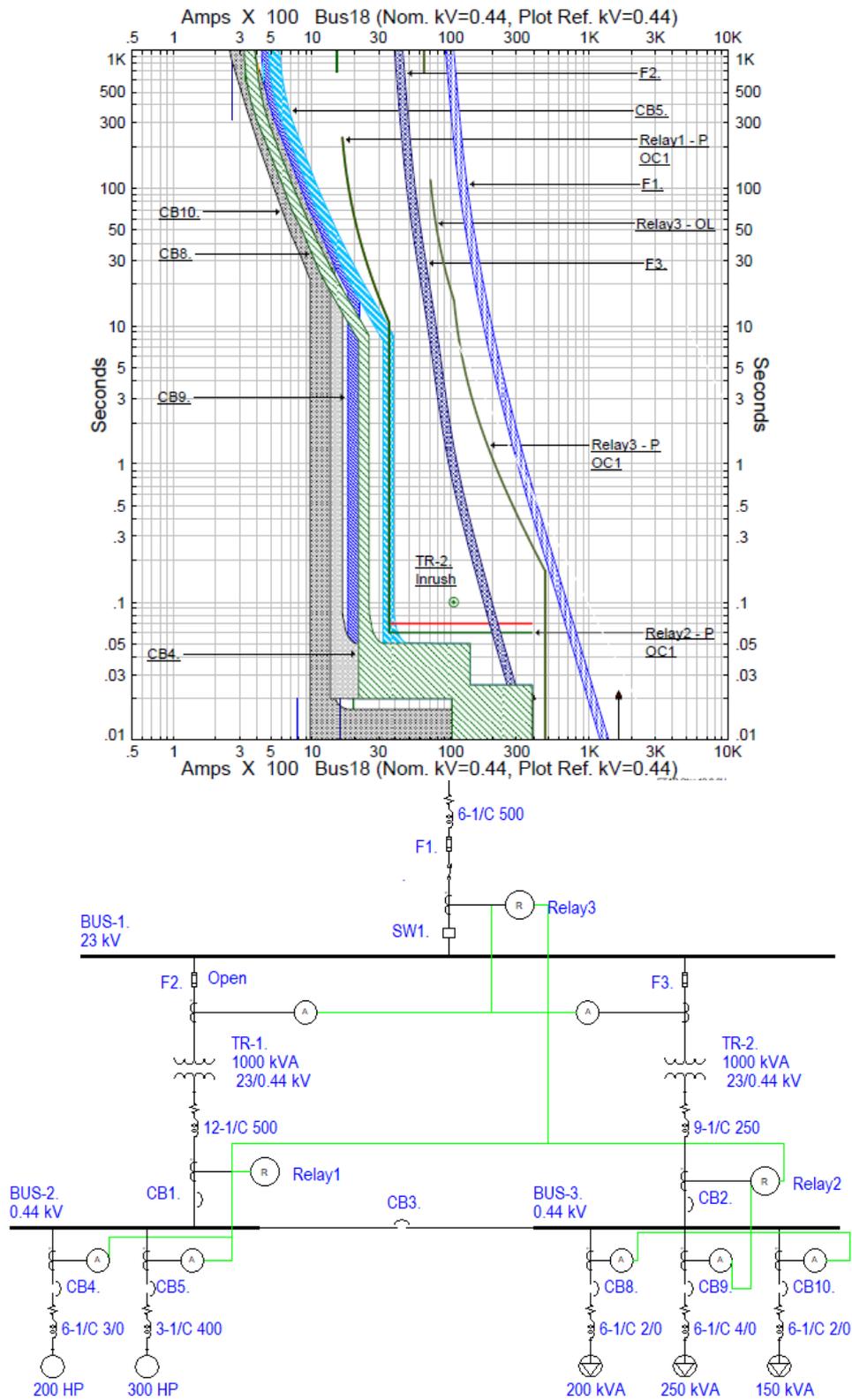


Figura 37 Ajustes propuestos de los relevadores adaptivos Relay 1,2 y 3.

Capítulo 7

Conclusiones generales y trabajos futuros

7.1 Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se recopiló y dio a conocer la información técnica y aplicación de las protecciones eléctricas adaptivas de sobrecorriente, las cuales presentan la ventaja de poder programar diversos ajustes dependiendo de la topología de los sistemas eléctricos industriales.

El cambio dinámico en los parámetros de ajuste de las protecciones adaptivas permite optimizar el tiempo y eficacia en la coordinación de los sistemas eléctricos de una manera automatizada, la cual hoy en día es importante para todas las industrias, debido a que permiten ejecutar cambios en sus ajustes de una manera más rápida y precisa y al mismo tiempo disminuir el error humano que se puede presentar al momento de realizar dichas actividades.

Con los análisis realizados a las protecciones que permiten varios ajustes, se propone la aplicación de esquemas de protección adaptivas a un sistema eléctrico industrial. En el sistema eléctrico analizado, se identificaron los sitios para la colocación de relevadores digitales de la marca Siemens modelo 7SJ80 los cuales pueden ser utilizados como protecciones adaptivas de sobrecorriente.

Mediante simulaciones con el Software para análisis y operación de sistemas eléctricos de potencia ETAP se evaluaron e identificaron los sitios en donde se colocaron los relevadores digitales, debido a las diferentes topologías que se presentan en esta planta, los valores de cortocircuito cambian considerablemente, por lo que se concluye que es factible la implementación de protecciones adaptivas a este sistema eléctrico.

La coordinación de protecciones actual que presenta este sistema eléctrico está en función, de que el sistema trabaje con el 100% de la carga. Con el sistema propuesto se pretende que los relevadores cambien sus parámetros de ajuste de acuerdo con la operación de las cargas que están alimentando, con lo que se puede tener un sistema eléctrico con una coordinación de protecciones automatizada, eficaz y selectiva ante la ocurrencia de una falla eléctrica.

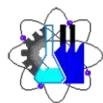
7.2 Trabajos futuros

Durante la realización de este trabajo de tesis, se observó que existen diferentes métodos en la programación de los relevadores digitales en los cuales no se profundizó, por esta razón se considera apropiado que como continuación de este trabajo se incorpore algún método de programación al esquema de protección propuesto, así como la implementación de las protecciones propuestas a otros sistemas eléctricos industriales.

Referencias

- [1] Bo, Z., X. L., Q. W., F. Z., & Y. Y. (2016). Developments of power system protection and control. *Protection and Control of Modern Power Systems volume 1*.
- [2] SCRIBD. (2011). Obtenido de SCRIBD: <https://es.scribd.com/doc/51572240/Introduccion-a-los-relevadores-digitales>
- [3] Benítez Lobato, M. (2015). Implementación práctica del protocolo IEC 61850 en subestaciones eléctricas problemas y soluciones.
- [4] Chapi Lucero, J. F. (2019). Determinación de ajustes de la protección de sobrecorriente en base a la estimación de corrientes de cortocircuito usando mediciones locales.
- [5] Omron Electronics, S. (s.f.). *Guía rápida Relés de estado sólido SSRs*.
- [6] Vázquez Bojórquez, V. J. (2007). *Estudio comparativo de las normas IEC y ANSI para cálculo de cortocircuito*.
- [7] Gómez Marcial, D. (s.f.). *Análisis de contingencias eléctricas en centros comerciales*.
- [8] L. Ferro, G. (2019). *Estudio de fallas asimétricas*.
- [9] Cervantes Vega, J. R. (2000). *Protección en sistemas eléctricos*.
- [10] Cortocircuito (Fallas Simétricas y Asimétricas). (s.f.). Recuperado el 2019, de <https://manautomata.files.wordpress.com/2012/10/capitulo8.pdf>
- [11] Aboytes García, F. (1990). *Análisis de sistema de potencia*.
- [12] Jhon J. Grainger, W. J. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill.
- [13] Beeman, D. (1955). *Industrial power systems handbook*. New York: McGraw-Hill.
- [14] Gonzales, A. (s.f.). *Academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/33365241/ANALISIS_DE_CORTO_CIRCUITO
- [15] CDEC-SIC. (s.f.). *Academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/23764093/PROCEDIMIENTO_DO_T%C3%89RMINOS_Y_CONDICIONES_DEL_C%C3%81LCULO_DE_CORRIENTES_DE_CORTOCIRCUITO_PARA_LA_VERIFICACION_DEL_DIMENSIONAMIENTO_DE_INTERRUPTORES_EN_EL_SIC
- [16] L. Ferro, G. (2015). *Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna*. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [17] Sánchez Villanueva, R. (Junio de 2019). *Eléctrica*. Obtenido de <https://electronica.mx/importancia-de-los-estudios-electricos-cortocircuito/>

- [18] B. Hickey, R. (s.f.). *Electical Construction Databook*. McGraw-Hill.
- [19] Calvo Herrera, E. A. (2017). *Análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones de una Sub-estación de media tensión para la Oficina consultora Apame Design*. Catargo.
- [20] Bedoya Toro, M. Y., & Cadavid Giraldo, F. (2015). *Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas de distribución con penetración de generación distribuida*. Pereira.
- [21] Latorre Valladares, C. (2012). *Protección de sistemas eléctricos de potencia*.
- [22] J. Zapata, C., & E. Mejía, G. (2003). coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas radiales utilizando programación lineal. *Scientia et technica* no. 22.
- [23] Renzo Tamasco, A. (2007). *Protecciones eléctricas*.
- [24] Gonzáles Rincon, C. E., & Padilla Flores, A. G. (2013). *Análisis de la lógica de comunicación en la protección diferencial del transformador de potencia*. Mexico D.F.
- [25] Ramirez Alanis, M. (2005). *Protección de sistemas eléctricos de potencia*. Nuevo Leon.
- [26] Jaramillo Córdoba, R. D. (2014). *Desarrollo de un sistema de protección de sobrecorriente en una red de distribución con inyección de fuentes alternas de energía*. Santiago de cali.
- [27] Conde Enriquez, A. (2007). *Desarrollo de un relevador de sobrecorriente con capacidades dinámicas de ajuste*.
- [28] Valdez Gómez, J. M. (2012). *Proceso adaptivo de las funciones de operación de los relevadores de protección*. CIENCIA UANL, Vol. X, No.4
- [29] Jiménez Martínez, S. J. (2017). *Protección adaptable de sobrecorriente instantanea*.
- [30] J. Mora, J., C. Bedoya, J., & Meléndez, J. (2006). Implementación de protecciones y simulación automática de eventos para localización de fallas en sistemas de distribución de energía. *Ingeniería y competitividad*, 5-14.
- [31] RES 151(2016). Comisión Reguladora de Energía. Resolución por la que la comisión reguladora de energía expide las disposiciones administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del sistema eléctrico nacional: código de red, conforme dispone el artículo 12, fracción xxxvii de la ley de la industria eléctrica. Diario oficial, 8 de abril de 2016.



Cuernavaca, Mor., a 11 de noviembre de 2021

DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS
DR. MARIO LIMÓN MENDOZA
ING. ELIDE MEDINA AREVALO
ING. EDGAR MARCELO HUERTA JÁCOME
DR. OSCAR HILARIO SALINAS AVILES
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**
Titulado:

**“PROTECCIONES ADAPTIVAS DE SOBRECORRIENTE APLICADAS A
SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES”**

Que presenta (el) o (la) **C. JORGE ARMANDO GARCIA BARRON**, del programa educativo de
INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRONICA.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS	
	DR. MARIO LIMÓN MENDOZA	
	ING. ELIDE MEDINA AREVALO	
	ING. EDGAR MARCELO HUERTA JÁCOME	
	DR. OSCAR HILARIO SALINAS AVILES	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas
VALH/fjbg



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-11-11 19:27:13 | Firmante

AfRIY1VrXRKWhduwSYbxzZ3FgmBylx1IqSvtULNVnd4uf6oMxyt4g1FfJyXY8Swo7HK8jOc9hAFY2Kg1+a6SnX3guoRIgBcDjGVFxFxJHJe4oP41+k1bWA/FCqWoGrNGS5jCATWGX8MSP1ay8K+JtgocqpltXWOXvBAmg7VDb+pCoEghU2+w60/1isXcKL/X1AfwXzA0PurM9X5pTYm3mvNyrWw6CTQimBT8HTxHCQ5RhniZvSIMz5HRbl2sMJAg5qaBoSSHT90e7qZ2tAQry1Bocwxu21SuwqIO+zG4z4JbQz+s8WFhJtXfOWmZWLI/kh5Q/qYBq/RL+aKGPMLGfbkA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



126wLOIEW

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/lbCwx1Nxvm9dcQXIFHMUWya0CRugmdXd>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ELIDE MEDINA AREVALO | Fecha:2021-11-12 10:52:39 | Firmante

HwXCZrTnrB3bcCpHZ6evqMgEuk484HgFtLnmBwjnjxjRrSUc7xOgY0D+46xaJKzRYZnvrFwqU1xzUZl3gYwg2E/LZJFQQe18MqQAuYEMprlRtHOfEH7M27oNo9QORorzr5JsA2j0gDoYWQpGGUioVc4FJRc23iCZOcPTAECgYat2OMkTzy9/oVH69Ar8UJxEceo1WEU6bgnv6rTublvOG+HktizbbYVWdtXhgZrmpxfE5nge+4XQ1hzYxCTRxSWEojEPLSst29D3uA1JiwVw5gbzJ6o8icaB+vC3j2XpBx+vwpOU6MnXOHY8GT+weGVtTn1NEWqSsYTXKHAIkByZWEJQ==

LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2021-11-12 12:31:46 | Firmante

og7n8dPLtoNw7o2GMLjOg1YyXLgtUkBoosMNGRYDo8Ym3QPuMgBb83v8BnoFnaWe6rDa0SEF7/iArcazPT0cZ52fxTLowAj1uePM99+Ykf3TuhZFvpf2hDNBJk6jhFh+OMbCi3lIHwPZg0kLnEeSTLYDZC430J6e7O5ln1p/EfbPRq+OS1/ZdlPkF+mAlY2Z85Yrhl1ARYUUWjE/PgbrZesqNMDIt63i4MqdDsUkPlKvrROJDKz+2vdZ0lInoNa/besoxCmCU2RQ8IE TxqJWsxssyimyrdlsNHfG5ri6hhpj2z4JTU7SbQ7dR+UD5bLueffsFFWF/i0ZR2CM6A==

MARIO LIMON MENDOZA | Fecha:2021-11-12 12:56:29 | Firmante

Eq27WWu/WNzthtAMsVSQv4YCW+ccnTL5W3PFGwaPn7P810avxu10sxT4Qa5T/jEz1jSGZPJVjDSVEgygtc5coxA9hoy2bePBj7sHaRMO2FUZB/B8dpdcu5o5r1n450Hjqn5D+uscOwYix4YsdumrQX/x5u9H+iKK6r7PHbwvzSyMnuVm6dgn09kvo4IEX2Wce4AeGjxjICW6U2zVSTGzfe9fih1d48l4zN9tOwBm0Z0E4Xtmf17TeUH26kRiKvSTfAVJiuGouk3e+3bPfizQ+imt1XVbwmyneGMcxvhYTNs/PVlkqJs3bRM+CqPZtK/vZO/iRGleUJeXfPO/Wg==

OSCAR HILARIO SALINAS AVILES | Fecha:2021-11-16 12:19:26 | Firmante

hiQGUEo/sgDSYA37tGfZRB8x4XxGFTPwKgj+gd3FF8pEsELDUxyJTWnFzc6VvtWI2i9U5i1sKXEjgrkuh9mlVt+xhex85l4KqFUh6x1H/THWj4SylxWBp6dvlKSI08TmnnWUKxiGldTBwW8ME3TAMORK31bAMfRHOX9y4b+wXLUlpjmO1b5+Sewcql05T5R4p6L9bfOmlQtqJ5A+/98jMnw/HV4enKmAFFIY1mCVyoYOyA90chZumpoxuJm45Xm/7NnNKoJ9QvLq0MVUxUP9u4tnPcMK7Z2LDzPZVLFgY5yHNXqS94v4q8wNcVkJzkcSkv18tjgBawU8FuUQ==

EDGAR MARCELO HUERTA JÁCOME | Fecha:2021-11-19 14:01:36 | Firmante

bYCqdiBn3gBIGCEBjrm78MIZKSni1lehiQuXZwhfSqi2wIPw9BRxQzghASIOOPK3pgoYA528yB9Od2VjwedRY8DtjMPZD1NtZgTM7wprXWZ86iXvle5BxASQOwysxol7qU7CU8GFQleNY35DSqgNM/75RExuwylOIPQYgMcTC4YzHPeDquBcEW7r7kuTJkaw3H8muRHVBQh2TZ9ZDNEx9lee2AwbO2mWYyjid4EkDQu6kqwdexi7lFoSjU2JljukUIRvHLQ9Trn pN3jIUw6maGw87Vuf5sK2rVWoSIZOKvxxKUXedoGrRM5xTAHPTTHZOMwarQ/rPLVhqt4dHEJQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



WVLikxuNT

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/nhls3Mdk1CsnzKtKx4s1d6rB2IMCSOJ>

