

**DISEÑO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRÁCTICAS EN
PROTECCIONES ELÉCTRICAS PARA LA IU PASCUAL BRAVO**

Mario Alberto Gallo Mejía

Marlon Gaviria Patiño

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2014

**DISEÑO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRÁCTICAS EN
PROTECCIONES ELÉCTRICAS PARA LA IU PASCUAL BRAVO**

Mario Alberto Gallo Mejía
Marlon Gaviria Patiño

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

Asesor

IE Santiago Alzate Arias

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2014**

Nota de aceptación

Firma

Nombre

Presidente del jurado

Firma

Nombre

Jurado

Firma

Nombre

Jurado

Medellín, Noviembre de 2014

DEDICATORIA

A nuestras esposas Vanessa y Marina, por su paciencia y constante apoyo para lograr nuestros sueños, a nuestros hijos José David, Juan Sebastián, María Alejandra y Manuel José, por ser en gran parte nuestra razón de vivir y nuestra excusa para continuar, a pesar de los obstáculos.

Mario Alberto Gallo Mejía

Marlon Gaviria Patiño

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

- Dios por la oportunidad de vivir y continuar adelante.
- Al IE Santiago Alzate Arias, asesor del trabajo de grado, docente de asignatura Protecciones y Medidas de la IU Pascual Bravo, por su colaboración y asesoría constante durante el proceso de recolección de información, y elaboración de este trabajo.
- A toda la planta docente del programa de Ingeniería Eléctrica en la IU Pascual Bravo, por el constante apoyo, asesoría y paciencia que tuvieron a lo largo de esos años en los cuáles soñamos con ser profesionales.

A todos ellos, mil gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS	13
2. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA	14
3. RESEÑA HISTÓRICA.....	15
4. DISEÑO PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA.....	18
4.1. PLAN DE ESTUDIOS INGENIERÍA ELÉCTRICA	19
5. METODOLOGÍA	21
5.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	21
5.2. CONSULTA DE FUENTES DE INFORMACIÓN	21
5.2.1. Fuentes primarias de información	21
5.2.2. Fuentes secundarias de información.....	22
5.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	22
6. PROTECCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	24
6.1. INTRODUCCIÓN.....	24
6.2. GENERALIDADES	24
6.2.1. Los criterios de protección	26
6.3. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	27
6.3.1. Altas corrientes.....	27
6.3.2. Variación de tensión.....	27
6.3.3. Esfuerzos mecánicos en equipos y estructuras	27
6.3.4. Qué es el corto circuito y su importancia en el sistema eléctrico	28

6.3.5.	Objetivo de un estudio de corto circuito	28
6.3.6.	Importancia del estudio de corto circuito	28
6.3.7.	Cálculo de corrientes de cortocircuito	29
6.4.	FUNCIONALIDAD DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN	33
6.4.1.	Sensibilidad	34
6.4.2.	Selectividad	34
6.4.3.	Rapidez	35
6.4.4.	Protecciones instantáneas	36
6.4.5.	Protecciones de tiempo diferido o con retraso en tiempo.....	36
6.4.6.	Protecciones primarias.....	36
6.4.7.	Protecciones de respaldo	37
6.4.8.	Protección por relevadores	37
6.4.9.	Interruptor automático (Magneto térmico)	38
6.5.	DIFERENCIACIÓN EN PROTECCIONES.....	39
6.5.1.	Relés de sobrecorriente	39
6.5.2.	Parámetros de ajuste	40
6.5.3.	Relés de fases y de tierra.....	44
6.5.4.	Relés de sobrecorriente direccionales	45
6.6.	PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	46
6.7.	RELÉS DE DISTANCIA	47
6.7.1.	Ajuste de la Zona 1	47
6.7.2.	Ajuste de la Zona 2	48
6.7.3.	Ajuste de la Zona de reversa	48

6.7.4.	Ajuste de la Zona 3 hacia adelante	49
6.7.5.	Alcance resistivo	49
6.8.	PROTECCIÓN DE GENERADORES Y TRANSFORMADORES	52
6.8.1.	PROTECCIÓN DE GENERADORES.....	52
6.8.2.	PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES.....	53
6.9.	TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y DE TENSIÓN.....	54
6.9.1.	TRANSFORMADORES DE CORRIENTE	54
6.9.2.	TRANSFORMADORES DE TENSIÓN.....	55
6.10.	DESCRIPCION DE LOS NUMEROS ANSI / IEEE EN PROTECCIONES ELÉCTRICAS.....	57
7.	RESULTADOS DEL TRABAJO DE GRADO	69
7.1.	MÓDULO DE PRÁCTICAS EN PROTECCIONES ELÉCTRICAS.....	69
7.1.1.	Elementos constitutivos del módulo	69
7.1.2.	Bastidor multimodular.....	70
7.1.3.	Relés de protección.....	71
7.1.4.	Equipo de inyección de corriente y señales	76
	CONCLUSIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plan de estudios Ingeniería Eléctrica.....	19
Figura 2. Tipos de fallas en los sistemas eléctricos de potencia.....	30
Figura 3. Simulación corriente falla monofásica.....	31
Figura 4. Simulación corriente falla bifásica.....	32
Figura 5. Simulación corriente falla trifásica	33
Figura 6. Selectividad total y parcial de dos interruptores.....	34
Figura 7. Selectividad para bajas corrientes de falla.....	35
Figura 8. Interruptor magneto térmico.....	39
Figura 9. Operación corriente vs tiempo rele de sobrecorriente	40
Figura 10. Ajustes relé de sobrecorriente	42
Figura 11. Curvas de tiempo vs corriente de relés: a) Instantáneo; b) Tiempo definido; c) Tiempo inverso.....	43
Figura 12. Curva de operación de un rele de tiempo inverso y Dial.....	43
Figura 13. Conexión relés sobrecorriente de fases.....	44
Figura 14. Conexión relés sobrecorriente de tierra	45
Figura 15. Relé de sobrecorriente direccional	46
Figura 16. Características del relé de distancia	50
Figura 17. Alcance zonas de protección distancia	51
Fuente: Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, (Mujal, 2002). Figura 18. Alcance de zonas.....	51

Figura 19. Protección diferencial de Transformador	54
Figura 20. Transformador de corriente, vista sección	54
Figura 21. Transformador de tensión, vista sección	56
Figura 22. Ejemplo de módulo bastidor vertical multimodular.....	70
Figura 23. Ejemplo de relé de sobrecorriente. Relé SPAJ 141 C	72
Figura 24. Ejemplo de relé multifuncional de generador. Relé M-3430 Becwith	74
Figura 25. Ejemplo de relé protección de línea (distancia). Relé REC615 ABB	76
Figura 26. Equipo de inyección de relés. CMC 356 OMICRON.....	78

INTRODUCCIÓN

La realización de este trabajo de grado tiene como finalidad dar a conocer todo lo relacionado con el diseño para la posterior implementación de un módulo didáctico de prácticas para pruebas de protecciones eléctricas en la Institución Universitaria Pascual Bravo, en adelante IU Pascual Bravo.

Día tras día, la industria de la energía se ve abocada a mantener en constante actualización tecnológica, sus sistemas de protección, con altos índices de confiabilidad y disponibilidad. De esta misma forma, tal como lo hacen los diferentes proveedores nacionales e internacionales, las instituciones de educación superior que tienen injerencia en estos temas de tipo técnico, se ven en la necesidad de tomar acciones para permitir que sus estudiantes tengan contacto con dicha tecnología, buscando así una apropiación adecuada del conocimiento, para su posterior aplicación en dicha industria.

Siendo la IU Pascual Bravo una de las instituciones pioneras a nivel tecnológico, se hace necesaria la actualización permanente de los equipos de laboratorio, y con base en ello, se diseñará el “Módulo de prácticas en Protecciones eléctricas”, facilitando con ello la interacción de los estudiantes y la aplicación práctica de términos ya vistos en clase.

El tema de protecciones eléctricas es quizás uno de los temas de mayor relevancia en la gestión de los sistemas de potencia, y como tal, refiere administración y atención, necesarias en la educación de los nuevos graduandos en Ingeniería Eléctrica, y se convierte en uno de los ejes centrales para la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el transcurso de dicha carrera.

Una vez realizado el estudio de referentes y la consulta externa en otras instituciones de educación superior, tanto de orden público como privado, fue posible constatar la no existencia de un laboratorio o módulo didáctico, donde los estudiantes pudieran practicar los conocimientos adquiridos en la materia de protecciones eléctricas, lo cual permite potencializar la iniciativa y motivar el diseño y posterior implementación, facilitando con ello que la IU Pascual Bravo obtenga una ventaja competitiva respecto a la transferencia de conocimiento otorgada a sus alumnos, bajo condiciones prácticas, que no tienen otras instituciones.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

Diseñar un módulo de prácticas en protecciones eléctricas, para ser implementado en la IU Pascual Bravo.

1.2. ESPECIFICOS

- Estudiar el estado del arte en protecciones eléctricas y obtener una referencia para el diseño del módulo.
- Identificar los equipos disponibles y proponer un diseño estructural y funcional del módulo de protecciones.
- Diseñar el módulo de prácticas en protecciones eléctricas, teniendo en cuenta las partes disponibles y su utilización.
- Adecuar los elementos del módulo, referentes a las partes constitutivas del mismo, para su posterior implementación.
- Elaborar guía base para el manejo del módulo, con el fin de mejorar su utilización en las diferentes prácticas.

2. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

Durante el recorrido a través del plan de estudios en Ingeniería Eléctrica, se observó como de manera individual se desarrollan cada una de las prácticas que hacen referencia al contenido programático de las diferentes asignaturas, y éstas han sido más efectivas cuando la Institución ha facilitado los espacios, equipos y elementos necesarios para este fin, como son los laboratorios de PLC, de máquinas eléctricas, instrumentación, etc.

Con respecto a la asignatura protecciones y medidas, la Institución aún no cuenta con un espacio adecuado, con equipos o elementos que permitan ejecutar adecuadamente su módulo de prácticas, lo cual impacta la referencia final y la consolidación del contenido de dicha asignatura por parte de los estudiantes, limitándose exclusivamente a elementos teóricos, generando que el conocimiento sea solo referencial, y no experimental.

Si los estudiantes no encuentran los espacios con la implementación adecuada y continúa solo recibiendo información de tipo teórica, es posible que se creen incertidumbres y falencias de tipo técnico, al momento de enfrentar situaciones reales en el campo laboral, reduciendo su capacidad de decisión y solución de problemas en el área de protecciones eléctricas, tema de gran relevancia en la formación de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica.

Así mismo, cobra importancia que los estudiantes puedan trabajar sobre prototipos modulares, permitiendo afianzar sus conocimientos desde niveles inferiores, tema de gran aporte a la Institución.

3. RESEÑA HISTÓRICA

3.1. ¿POR QUÉ EL NOMBRE "PASCUAL BRAVO" PARA UNA INSTITUCIÓN EDUCATIVA?

En 1930 surge la necesidad de empezar a formar personal calificado, con un aprendizaje que pudiera ayudar a mejorar el nivel de vida de las familias. El desarrollo de la industria naciente era ya una preocupación para las autoridades locales de dirigir entonces un aprendizaje hacia un oficio que permitiera al obrero, vincularse al proceso productivo. En el año 1933 surge la idea de conformar una escuela de artes y oficios que le permitiera a las personas como vendedores y amas de casa desempeñarse en otro tipo de actividades, ya que la demanda de la industria exigía trabajadores especializados. Los oficios como la sastrería, la zapatería, albañilería y la carpintería eran desarrollados desde el hogar, de ahí que la formación profesional que venía imponiéndose desde finales del siglo XIX exigiera una preparación de profesionales técnicos. (Meliton, 1930)

La Escuela de Artes y Oficios inició con especialidades técnicas como:

Mecánica industrial, Carpintería, Latonería, Electricidad y Fundición.

El Congreso de la República, mediante la Ley 43 de 1942, transformó las escuelas industriales en institutos técnicos superiores, año en el que se ofrecían las modalidades:

Mecánica industrial, Dibujo técnico, Metalistería, Ebanistería, Electricidad, Mecánica automotriz, Fundición.

Por medio del Decreto 108 de 1950 el Congreso de la República convierte la "Escuela Industrial de Artes y Oficios Pascual Bravo" en "Instituto Técnico Superior Pascual Bravo" y continúa dependiendo del Ministerio de Educación Nacional.

En 1957 el Instituto Técnico Superior Pascual Bravo se convirtió en uno de los mejores de América del Sur; produjo maquinaria en sus propios talleres, sus laboratorios de electrotecnia se contaban entre los más modernos de todo el continente.

En 1965 el Instituto Técnico Superior Pascual Bravo recibía mujeres para los cursos de Diseño de Arquitectura y para la Facultad de Electrónica. En el año de 1972 el Ministerio de Educación Nacional, por Resolución 4603 del 24 de agosto, aprueba el programa de Tecnología Electrónica. En 1973 y por resolución 1371 del 2 de febrero aprueba el programa en Sistemas Industriales. En 1975 el Acuerdo 77 de la Junta Directiva del ICFES le concede licencia de funcionamiento al programa de Tecnología Mecánica. En 1981 el Ministerio de Educación Nacional por Resolución 199 el 14 de julio aprueba el programa de Tecnología Eléctrica.

En el año de 1982 el Congreso de la República, mediante la Ley 52, reorganiza el "Instituto Técnico Superior Pascual Bravo" como "Instituto Tecnológico Pascual Bravo" y le da autonomía administrativa, personería jurídica y patrimonio independiente. En 1984 el Tecnológico Pascual Bravo dio inicio a los programas de educación superior en la modalidad de educación abierta y a distancia, con los programas de Tecnología Mecánica, Tecnología Electrónica y Tecnología Eléctrica en algunos municipios de Antioquia, como: Sonsón, Rionegro, Marinilla, Yolombó, Yarumal, Andes, El Carmen de Viboral y El Santuario.

Ya en el año de 1988, el Tecnológico Pascual Bravo celebraba 20 años de sus carreras tecnológicas, opción educativa importante para las clases populares. Por la calidad académica de los egresados, las empresas se disputaban a los profesionales de dicha Institución, aspecto que ha trascendido hasta nuestros días como una fortaleza de nuestro egresado en el aspecto laboral. En 2007, el Ministerio de Educación Nacional, mediante Resolución número 1237 del 16 de marzo de 2007, avaló la transformación del Instituto Tecnológico Pascual Bravo a Institución Universitaria.

Este escalafón educativo consolida al Pascual Bravo como una institución líder en programas técnicos, tecnológicos y ahora universitarios, pertinentes para el sector productivo de nuestro país. La Institución ha venido proyectando nuevos programas para atender las necesidades del medio, entre los nuevos programas tecnológicos encontramos: Operación Integral de Transporte y Mantenimiento de Aeronaves.

Se han diseñado cinco especializaciones de acuerdo a las necesidades de la industria, avance tecnológico y buscando un nivel superior para sus estudiantes, ellas son:

Sistemas automáticos de control, Procesos de calidad, Diseño de redes de gas, Gestión de proyectos con énfasis en finanzas y Distribución y manejo de energía, especializaciones que se han diseñado de acuerdo con las necesidades impuestas a la industria por el avance tecnológico.

En la actualidad se desarrollan programas de formación superior tecnológica y programas de especialización, bajo dos modalidades presencial y semipresencial, (Institución Universitaria Pascual Bravo, 2014).

4. DISEÑO PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA

La formación del Ingeniero Electricista de la IU Pascual Bravo está orientada hacia la intervención de los Sistemas Eléctricos (SE), es decir, aquellos componentes, dispositivos, máquinas, equipos y procesos en los que se transforma, transporta, distribuye, comercializa y/o crea las condiciones para el aprovechamiento de la energía eléctrica.

El Ingeniero Electricista de la Institución Universitaria Pascual Bravo se desempeña en el contexto de los sectores industrial, comercial y residencial, desde la perspectiva del diseño e implementación de Sistemas Eléctricos, así como de la automatización, reconversión y modernización de Sistemas Eléctricos.

Interviene el diseño, gestión y ejecución de proyectos eléctricos con el propósito de satisfacer necesidades en materia de generación, suministro y uso de la energía eléctrica, cumpliendo en todo momento y con responsabilidad con las normas de seguridad industrial, medioambientales y las propias del sector, (Institución Universitaria Pascual Bravo, 2009).

En síntesis el profesional en Ingeniería Eléctrica que se pretende formar estará capacitado para:

- El Diseño, instalación, mantenimiento y operación de los sistemas de transmisión, sub-transmisión, redes de distribución, instalaciones eléctricas, industriales, comerciales y residenciales.
- La Planeación de sistemas eléctricos, evaluación económica de proyectos, normatividad de equipos y materiales eléctricos.
- El Mantenimiento y operación de centrales y subestaciones.

- El Diseño, instalación, supervisión, operación y mantenimiento en sistemas de control eléctrico, electrónico y de procesos industriales.
- El Desarrollo de la automatización industrial diseñando, aplicando o adaptando sistemas eléctricos y electrónicos a los procesos industriales.
- La Investigación de nuevos campos de aplicación y generación de energía eléctrica.

4.1. PLAN DE ESTUDIOS INGENIERÍA ELÉCTRICA

Figura 1. Plan de estudios Ingeniería Eléctrica

Asignaturas	Créditos	Horas presenciales	Intensidad horaria
Nivel 1			
MATEMATICAS BASICAS	4	4	64
INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA ELECTRICA	4	4	64
HERRAMIENTAS OFIMATICAS	2	2	32
HERRAMIENTAS CAD/CAE I	2	2	32
LENGUA MATERNA	2	2	32
DESARROLLO HUMANO Y SOCIAL	2	2	32
Total nivel 1	16	16	256
Nivel 2			
CALCULO DIFERENCIAL	4	4	64
FISICA MECANICA	4	4	64
ANALISIS DE CIRCUITOS I	4	4	64
HERRAMIENTAS CAD/CAE II	2	2	32
CONSTITUCION Y PARTICIPACION CIUDADANA	2	2	32
Total nivel 2	12	12	192
Nivel 3			
CALCULO INTEGRAL	4	4	64
FISICA DE CAMPOS	4	4	64
ANALISIS DE CIRCUITOS II	4	4	64
SECTOR ENERGETICO	2	2	32
INSTALACIONES E ILUMINACION	4	4	64
Total nivel 3	18	18	288
Nivel 4			
ECUACIONES DIFERENCIALES	4	4	64
ELECTROMAGNETISMO	2	2	32
ANALISIS DE CIRCUITOS III	4	4	64
TRANSPORTE DE ENERGIA	4	4	64
GESTION AMBIENTAL	2	2	32
Total nivel 4	16	16	256
Nivel 5			
MATEMATICAS ESPECIALES	4	4	64
MAQUINAS I	4	4	64
CONTROLES I	2	2	32
GESTION EMPRESARIAL	2	2	32
GENERACION DE ENERGIA	4	4	64
Total nivel 5	16	16	256
Nivel 6			
METODOS NUMERICOS	4	4	64
MAQUINAS II	4	4	64
CONTROL II	2	2	32
ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA I	2	2	32
CALIDAD DE ENERGIA	4	4	64
Total nivel 6	16	16	256
Nivel 7			
MECANICA DE FLUIDOS	4	4	64
PROTECCIONES Y MEDIDAS	4	4	64
GESTION DE LA CALIDAD	2	2	32
ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA II	4	4	64
INGENIERIA ECONOMICA	2	2	32
Total nivel 7	16	16	256
Nivel 8			
SISTEMAS AUTOMATICOS DE CONTROL	4	4	64
RESISTENCIA DE MATERIALES	2	2	32
REDES ELECTRICAS I	4	4	64
USO RACIONAL DE ENERGIA	4	4	64
FUNDAMENTOS DE ADMINISTRACION	2	2	32
Total nivel 8	16	16	256
Nivel 9			
INSTRUMENTACION INDUSTRIAL	4	4	64
REDES ELECTRICAS II	4	4	64
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	2	2	32
ELECTIVA INGENIERIA I	2	2	32
PROFUNDIZACION INGENIERIA I	2	2	32
Total nivel 9	14	14	224
Nivel 10			
GERENCIA DE MANTENIMIENTO	4	4	64
GESTION TECNOLÓGICA	4	4	64
PROFUNDIZACION INGENIERIA II	2	2	32
ELECTIVA INGENIERIA II	2	2	32
EVALUACION DE PROYECTOS	4	4	64
Total nivel 10	16	16	256

Fuente: Programa Ingeniería Eléctrica IUPB, 2014.

Dentro del núcleo básico se incluye la asignatura protecciones y medidas para el nivel 7 del plan de estudios, por lo tanto, se hace necesario reforzar el contenido de la asignatura mediante demostraciones y actividades prácticas, estimulando el aprendizaje y la asimilación de conceptos teóricos.

5. METODOLOGÍA

El trabajo de grado es de tipo teórico – práctico, donde se investiga un campo de la Ingeniería Eléctrica, relacionado con la protección de Sistemas de Potencia.

Para la correcta ejecución de este trabajo se cumplieron tres pasos esenciales, los cuáles ejecutados sistemáticamente, permitieron compilar la información necesaria.

5.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

En la primera etapa del desarrollo de este trabajo de grado se adelantó un proceso de recolección y selección de información relacionada con el estado del arte en materia de protecciones eléctricas, a fin de disponer con anticipación, de un material de investigación suficientemente amplio y actualizado que sirviera de marco de referencia para establecer las bases del trabajo.

5.2. CONSULTA DE FUENTES DE INFORMACIÓN

Se acudió a la consulta de diversas fuentes primarias y secundarias de información, de acuerdo con las posibilidades de acceso y disponibilidad de las mismas y se detallan a continuación:

5.2.1. Fuentes primarias de información

Se consultaron profesionales especializados y directivos vinculados a empresas del sector eléctrico y académico como ISAGEN SA ESP y EEPP SA ESP que han trabajado en el diseño, comisionamiento, montaje y parametrización de sistemas de protección en Sistemas de Potencia.

Estas consultas se realizaron mediante entrevistas personales y cursos orientados en el tema con la intención de conocer diferentes aspectos sobre la forma como estas entidades han actuado y actúan con relación a sus proyectos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

5.2.2. Fuentes secundarias de información

Se acudió a la consulta y al estudio de libros, textos, manuales, informes e instructivos relacionados con los temas de protecciones eléctricas, como también a la lectura y análisis de artículos y documentos editados en diversas revistas y publicaciones técnicas de carácter nacional particular e internacional a través del Internet.

5.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizó lectura sistémica de la documentación adquirida y por medio de las asesorías técnicas se aclararon dudas acerca del comportamiento de los sistemas de protección eléctricos; se reconocieron los componentes de tales sistemas de protección, lo cual fue insumo para la proyección del diseño definitivo.

Con la información recolectada y con base en el conocimiento de las necesidades actuales objeto de este trabajo de grado, se construyó una propuesta que permitirá luego de su implementación, la ejecución de prácticas en protecciones eléctricas y de gran ayuda didáctica en la IU Pascual Bravo.

Para poder obtener valores de referencia adecuados, en cuanto al funcionamiento de los equipos que constituyen el módulo de prácticas, se realizaron pruebas externas de los componentes principales del módulo como son Equipo de inyección OMICRON CMC 156 y PC portátil, Relé multifuncional de protección de generador Beckwith M-3430 SP, Relé de protección de sobre-corriente SEL 351 y Relé de protección distancia SEL 321.

Se realizaron mediciones en sitio para proyectar la ubicación de los elementos según la configuración física de los mismos y su correcta ubicación dentro del módulo de asignación respectivo.

Durante las pruebas de equipos, se revisaron parametrizaciones estándar de cada uno de ellos, buscando niveles de servicio adecuados, señales de disparo y de control acordes a lo asignado y funcionamiento general de dichos equipos.

Dada su naturaleza, el módulo de prácticas en protecciones eléctricas es un aporte a la dotación de la IU Pascual Bravo en sus laboratorios de control, instrumentación y potencia.

6. PROTECCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

6.1. INTRODUCCIÓN

La continuidad y calidad del servicio son dos requisitos íntimamente ligados al funcionamiento satisfactorio de un sistema eléctrico de potencia (SEP), (Ingeniería Especializada, 2009).

Cuando se producen fallas, las magnitudes asociadas al SEP alcanzan valores fuera del rango normal de funcionamiento y en diferentes áreas de éste pueden presentarse operaciones en condiciones desequilibradas, con el riesgo que conlleva esto para los equipos. Es de gran importancia los principios fundamentales del accionar de las protecciones, (Mason, 2014).

Es imposible evitar fallos desde todo punto de vista, y es por eso que desde la etapa de diseño se debe contemplar la correcta dotación del SEP de los medios adecuados para su protección y operación. En este orden de ideas, las protecciones en el SEP están encaminadas a mantener la calidad y continuidad del servicio, intentando mantener niveles de servicio adecuados y en caso de fallos, con duraciones muy cortas.

6.2. GENERALIDADES

A continuación se detallan los aspectos de mayor relevancia dentro del marco de actuación de las protecciones eléctricas:

- **Protección eléctrica:** Son equipos utilizados en los sistemas de potencia para evitar la destrucción de equipos o instalaciones por causa de fallas que se pueden extender sin control en forma escalonada.

- **Nivel de tensión:** Es la magnitud de voltaje de alimentación y de trabajo, asignado a un sistema de potencia en generación, transmisión y/o distribución.
- **Confiabilidad:** Es el grado de certeza con el que un relé de protección eléctrica actuará, según el estado pre diseñado. Es decir, un relé tendrá un grado óptimo de confiabilidad, cuando éste actúe en el momento en que se requiere, desde el diseño.
- **Seguridad:** se refiere al grado de certeza en el cual un relé no actuará para aquellos casos en los cuales no tiene que actuar. Por lo que un dispositivo que no actúe cuando no es necesario, tiene un grado de seguridad mayor que otros que actúan de forma inesperada, cuando son otras protecciones las que deben actuar.
- **Selectividad:** Este aspecto es muy importante en el diseño de un Sistema de Potencia, pues indica la secuencia en que los relés actuarán, de manera que si falla un elemento, sea la protección de este elemento la que actúe y no la protección de otros elementos, si no actúa esta protección, deberá actuar la protección de mayor capacidad de interrupción, precedente a la protección que no actuó. Esto significa que la protección que espera un tiempo y actúa, se conoce como dispositivo de protección de respaldo.
- **Velocidad:** Es el tiempo en que el relé tarda en completar el ciclo de detección-acción. Muchos dispositivos detectan instantáneamente la falla, pero tardan poco tiempo en enviar la señal de disparo al interruptor correspondiente. Es muy importante la selección adecuada de una protección que no sobrepase el tiempo que tarda en dañarse el elemento a proteger de las posibles fallas.
- **Generador:** Máquina rotatoria que gira por la energía mecánica aplicada en su eje, alcanzando velocidades de sincronismo, las cuáles se convierten posteriormente en energía eléctrica.

- **Motor:** Máquina rotatoria que produce energía mecánica y de movimiento, transformando algún tipo de energía (eléctrica, combustible, etc) en la energía mecánica capaz de realizar un trabajo específico.
- **Transformador:** Juega un papel muy importante dentro del Sistema de Potencia donde se aplica, pueden ser de interconexión, de elevación o de reducción y su protección más común es de diferencial de corriente.
- **Línea de transmisión:** Es el elemento dentro del Sistema de Potencia que está destinado a interconectar diferentes puntos y a transportar la energía por ellos, desde la generación hasta la distribución. Las protecciones más comunes en estos sistemas son de sobre corriente, de distancia, de hilo piloto y la protección híbrida.
- **Relé:** Un relé es un dispositivo de salida en un circuito de control, el cual recibe señales de energización o des-energización, y mediante su actuación, permite el accionamiento de diferentes contactos que responderán a la apertura o cierre de líneas de control preestablecidas, que en el caso de las protecciones eléctricas, actuarán otros dispositivos de protección primaria y secundaria, según diseño. Estos relés pueden encontrarse desde electromecánicos hasta digitales.

6.2.1. Los criterios de protección

Es importante conocer cuáles son los tipos de condiciones anormales asociadas con cada equipo y conocer cuáles son sus limitaciones, para conocer la forma de proteger los diferentes equipos eléctricos. Un sistema de protecciones requiere una amplia cantidad de cálculos para la determinación de los diferentes dispositivos de protección, sin embargo, debe mezclarse con algunos criterios que dependen básicamente de la experiencia. Estos criterios dependen de factores tales como:

- Frecuencia de fallas
- Vulnerabilidad de equipos

- Orientación a confiabilidad o a seguridad de las protecciones
- Tipos de falla más comunes
- Tipo de instalaciones a proteger
- Tiempos de despeje de las fallas

6.3. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Al presentarse cortocircuitos en los sistemas de transmisión y distribución, pueden generarse resultantes que pueden llegar a ser perjudiciales para sus equipos anexos (Blackburn, 1993), y como consecuencias se pueden presentar los siguientes inconvenientes:

6.3.1. Altas corrientes

Incremento de la corriente en niveles superiores a la corriente nominal, generándose aumento de temperatura y sobre esfuerzos que afectan el aislamiento y los conductores.

6.3.2. Variación de tensión

Se pueden producir caídas de tensión en varios puntos de la red, generándose perturbaciones en los sistemas de iluminación, posibles desconexiones de cargas rotativas y se pueden provocar sobretensiones de acuerdo al tipo de falla, por ejemplo en las monofásicas, con incidencia de sobretensiones en las fases sanas.

6.3.3. Esfuerzos mecánicos en equipos y estructuras

Las corrientes de corto circuito pueden generar fuerzas que pueden llegar a deformar los devanados de generadores y transformadores, y pueden llegar a afectar los pórticos y estructuras de subestaciones.

6.3.4. Qué es el corto circuito y su importancia en el sistema eléctrico

Todas las fases de diseño y operación de los sistemas eléctricos, necesitan de minuciosos estudios para evaluar su comportamiento, confiabilidad y seguridad. (Egea, 2009), Estudios típicos que se realizan son los flujos de potencia, estabilidad, coordinación de protecciones, cálculo de cortocircuito, etc. Un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio donde se incluyan la selección de voltaje, tamaño del equipamiento y selección apropiada de las protecciones.

La mayoría de los estudios necesitan de un complejo y detallado modelo que represente al sistema eléctrico, generalmente establecido en la etapa de proyecto. Las dimensiones de una instalación eléctrica y de los materiales que se instalan, así como la determinación de las protecciones de las personas y bienes, precisan el cálculo de las corrientes de cortocircuito en cualquier punto de la red.

Un estudio de corto circuito tiene la finalidad de proporcionar información sobre corrientes y voltajes en un sistema eléctrico durante posibles condiciones de falla. Un corto circuito es un fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto entre sí (Montané, 1993), y presentan elevadas corrientes circulantes hasta el punto de falla.

6.3.5. Objetivo de un estudio de corto circuito

El objetivo es calcular el valor máximo de la corriente y su comportamiento durante el tiempo que permanece en ese estado, (Gómez, 2012). Así se puede determinar el valor de la corriente que debe interrumpirse y conocer el esfuerzo al que son sometidos los equipos durante el tiempo transcurrido desde que se presenta la falla hasta que se interrumpe la circulación de la corriente.

6.3.6. Importancia del estudio de corto circuito

Algo muy importante que debe considerarse en la operación y planificación de los sistemas eléctricos es su comportamiento en condiciones normales, sin embargo

también es relevante observarlo en el estado transitorio (Procobres, 2014); es decir, ante una contingencia. Esta condición transitoria en las instalaciones se debe a distintas causas y una gran variedad de ellas está fuera del control de la operación.

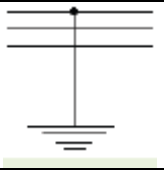
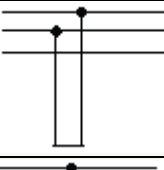
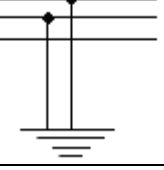
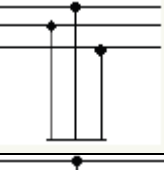
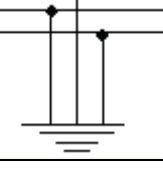
En general, se puede mencionar que un estudio de corto circuito sirve para:

- Determinar las capacidades interruptivas de los elementos de protección como son interruptores, fusibles, entre otros.
- Ejecutar la coordinación de los dispositivos de protección contra las corrientes de cortocircuito.
- Permite realizar estudios térmicos y dinámicos que consideren los efectos de las corrientes de corto circuito en algunos elementos de las instalaciones como tableros, cables o sistemas de barras, etc.
- Obtener los circuitos equivalentes de Thevenin y su utilización con otros estudios del sistema.
- Calcular las mallas de puesta a tierra, seleccionar conductores y alimentadores.

6.3.7. Cálculo de corrientes de cortocircuito

Los tipos de fallas que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia pueden observarse en detalle en la Figura 2:

Figura 2. Tipos de fallas en los sistemas eléctricos de potencia

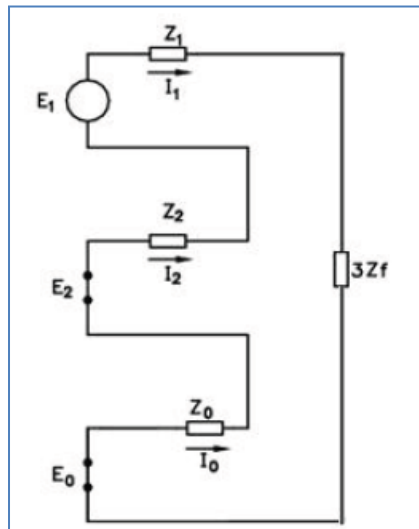
Tipo de falla	Conexión	Frecuencia de ocurrencia	Tipo
Monofásica		75%	Asimétrica
Bifásica aislada		15%	Asimétrica
Bifásica a tierra		6%	Asimétrica
Trifásica aislada		3%	Simétrica
Trifásica a tierra		1%	Simétrica

Fuente: Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica (Egea, 2009).

Algunos tipos de cálculo de corrientes de falla son monofásica, bifásica aislada y trifásica y se muestran a continuación:

Falla monofásica:

Figura 3. Simulación corriente falla monofásica



Fuente: Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica (Egea, 2009).

Ecuación 1. Cálculo de la simulación de corriente falla monofásica

$$I_{f_{1\phi}} = 3I_0 = \frac{3V_n}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f}$$

I_f: Corriente eficaz de cortocircuito.

I₀: Corriente de secuencia cero

V_n: Tensión de fase eficaz nominal o de prefalla en el punto de falla.

Z₁: Impedancia de secuencia positiva.

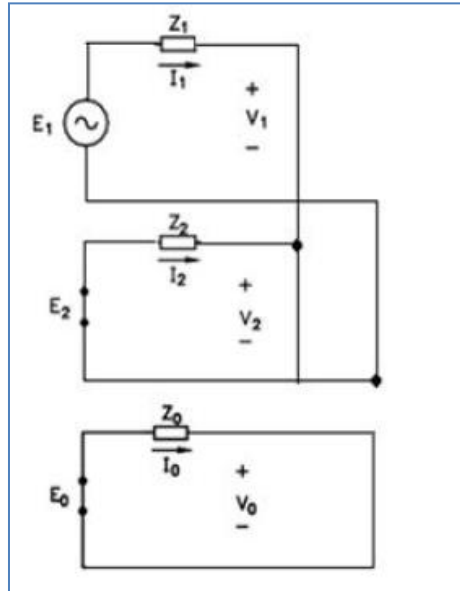
Z₂: Impedancia de secuencia negativa.

Z₀: Impedancia de secuencia cero.

Z_f: Impedancia de falla.

Falla bifásica aislada:

Figura 4. Simulación corriente falla bifásica



Fuente: Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica (Egea, 2009).

Ecuación 2. Cálculo de la falla bifásica aislada

$$I_{\hat{a}lla} = \frac{V_{prefalla} / \sqrt{3}}{Z_1 + 2Z_0}$$

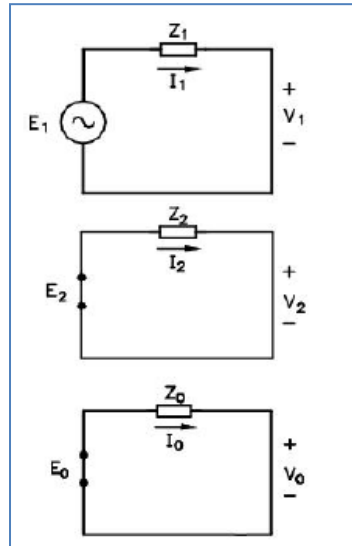
Vp: Tensión de fase eficaz nominal o de prefalla en el punto de falla.

Z1: Impedancia de secuencia positiva.

Z0: Impedancia de secuencia cero.

Falla trifásica:

Figura 5. Simulación corriente falla trifásica



Fuente: Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica (Egea, 2009).

Ecuación 3. Cálculo de la falla trifásica

$$I_{falla} = \frac{V_n}{Z_1 + Z_f}$$

V_n: Tensión de fase eficaz nominal

Z₁: Impedancia de secuencia positiva.

Z_f: Impedancia de falla.

6.4. FUNCIONALIDAD DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN

Los sistemas de protección se configuran con el objetivo de mantener las siguientes variables importantes en un SEP (Mujal, 2002):

6.4.1. Sensibilidad

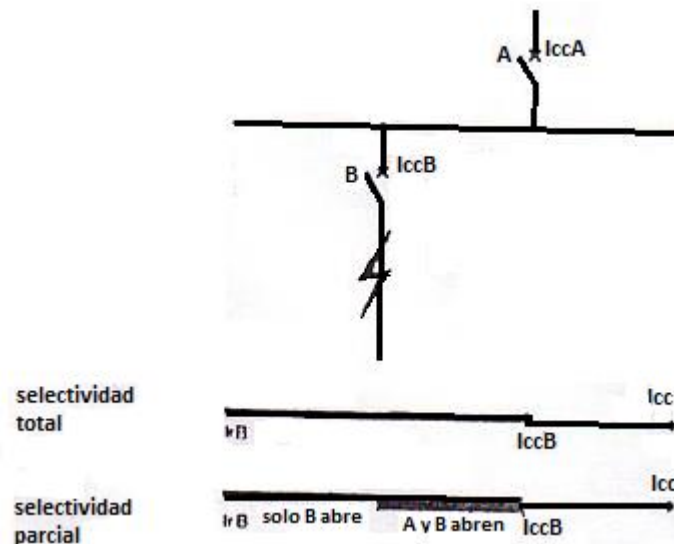
Es necesario que el sistema de protección sepa diferenciar entre una situación de falla real y una de no falla:

- Se deben configurar los rangos de alarma, disparo y operación para cada estado, de tal forma que el sistema pueda discernir entre una falla real y una ficticia.
- Determinar para cada actuación, las condiciones límite que diferencian las situaciones de falla de las situaciones de operación normal.

6.4.2. Selectividad

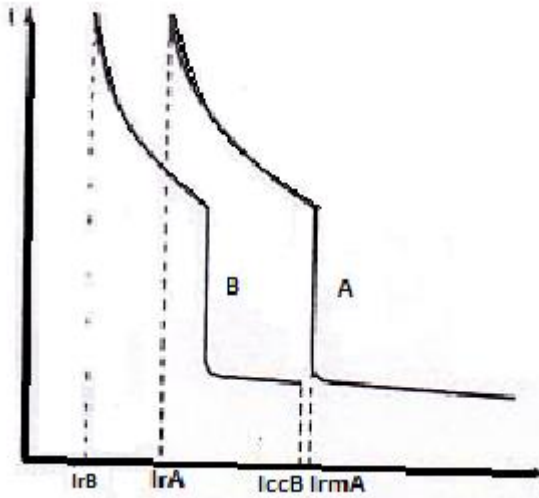
Es la capacidad que debe tener la protección para discernir si la falla se ha producido dentro o fuera de su área de observación y, en consecuencia, dar orden de disparo de los interruptores automáticos que así mismo controlan y/o despejan la falla.

Figura 6. Selectividad total y parcial de dos interruptores



Fuente: Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica (Egea, 2009).

Figura 7. Selectividad para bajas corrientes de falla



Fuente: Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica (Egea, 2009).

Es importante que una protección actúe cuando tiene que actuar, pero que no actúe cuando no tiene que actuar. Si la falla se ha producido dentro del área de observación, por la protección ésta debe dar la orden de abrir los interruptores que aíslen el circuito en falla (Elmore, 2004). Si, por el contrario, la falla se ha producido fuera de su área de observación, la protección debe dejar que sean otras protecciones las que actúen para despejarla.

6.4.3. Rapidez

Una vez fue detectada la falla, ésta debe ser despejada lo más rápidamente posible. Cuanto menos tiempo se tarde en aislar la falla, menos se extenderán sus efectos y menores daños y alteraciones se producirán al reducirse el tiempo de permanencia bajo condiciones anómalas en los diferentes elementos.

La rapidez con que puede actuar una protección depende directamente de la tecnología utilizada en el sistema y de la de la velocidad de respuesta del sistema de control de los interruptores asociados al mismo.

No obstante, una adecuada coordinación de protecciones no exige que éstas actúen de manera inmediata, una vez se ha detectado la falla.

En función de esta característica, las protecciones se clasifican en:

6.4.4. Protecciones instantáneas

Actúan en tiempos muy cortos debido a que la falla se ha producido dentro del área que observan directamente. Es común encontrar tiempos de actuación expresados en milisegundos.

6.4.5. Protecciones de tiempo diferido o con retraso en tiempo

En este tipo se introduce un tiempo de espera que retarda su operación, de tal forma que se retrasa el inicio de la maniobra de apertura de los interruptores una vez que ha sido tomada la decisión de operar. Este retardo facilita la coordinación entre las protecciones con el objetivo de que actúen solamente aquellas que permiten aislar la falla desconectando la mínima parte posible del SEP.

Los sistemas de protección pueden estructurarse con:

6.4.6. Protecciones primarias

Son aquellas que tienen la tarea de despejar la falla en primera instancia. Están definidas para desconectar el mínimo número de elementos necesarios para aislar la falla. Con base en esto, el SEP se divide en zonas de protección primaria definidas en torno a cada elemento importante (Weedy, 1982). El traslape entre dos zonas se establece alrededor del interruptor común a ambas que sirve de separación entre los dos elementos contiguos.

Cuando se produce una falla de una zona, las protecciones primarias correspondientes deben disparar los interruptores pertenecientes a la misma, pero solamente éstos y ninguno más deben ser disparados para despejar la falla.

Únicamente en el caso, poco probable pero posible, de que la falla se produzca en la zona traslapada, la actuación de las protecciones primarias pueden llevar a desconectar un área más amplia que la estrictamente necesaria para aislar la falla.

6.4.7. Protecciones de respaldo

Son aquellas que tienen la tarea de despejar la falla en segunda instancia, y solamente deben operar en el caso de que hayan fallado las protecciones primarias correspondientes. Es entonces muy importante independizar entre si las causas de fallo de la protección principal y de respaldo (Villegas, 2014), de forma tal que nada que pueda producir el fallo de la protección principal sea capaz también de provocar el fallo de la protección de respaldo.

Deben operar con retraso en tiempo respecto a las principales con el fin de dejarles tiempo suficiente para que puedan actuar. Una vez que se haya producido esta actuación, las protecciones de respaldo deben ser reinicializadas con el fin de impedir innecesarias aperturas de interruptores.

Es preciso señalar que una misma protección puede desempeñar funciones de protección primaria para un determinado elemento y, al mismo tiempo, funciones de protección de respaldo para otro elemento. Así mismo, cuando las protecciones primarias se encuentran fuera de servicio debido a tareas de reparación o mantenimiento, las protecciones de respaldo correspondientes se convierten en protección primaria frente a las fallas que puedan producirse.

6.4.8. Protección por relevadores

Su función es originar el retiro rápido del servicio de cualquier elemento de un SEP cuando este sufre un cortocircuito o cuando empieza a funcionar en forma anormal, tal que pueda originar daño e interfiera de otra manera con el funcionamiento eficaz del resto del sistema.

El equipo de protección se soporta por interruptores para desconectar el elemento defectuoso cuando el equipo de protección así lo ordena. Estos interruptores están localizados de tal manera que cada generador, transformador, barra colectora, línea de transmisión, etc., pueda desconectarse por completo del resto del sistema.

Aunque la función principal de la protección por relevadores es reducir los efectos de los cortocircuitos, surgen otras condiciones anormales de funcionamiento que también necesitan esta protección. Una función secundaria de la protección por relevadores es indicar el sitio y el tipo de la falla.

6.4.9. Interruptor automático (Magneto térmico)

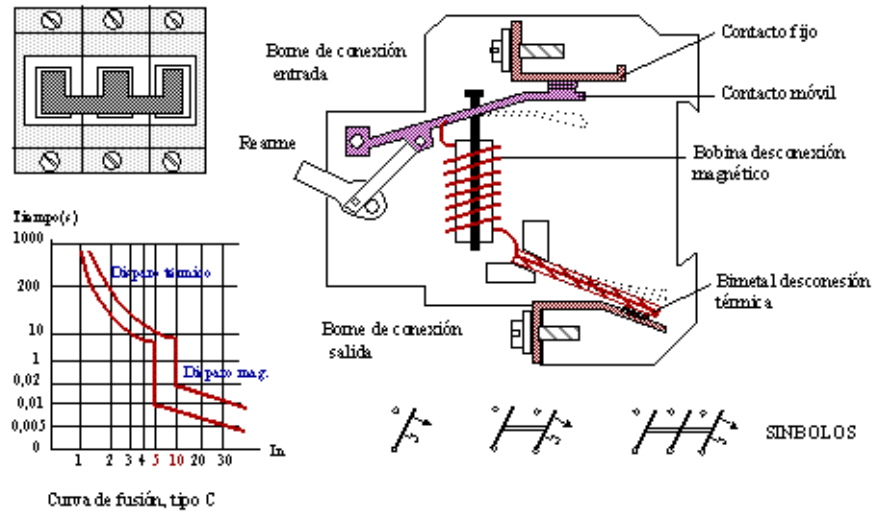
El interruptor automático, conocido como interruptor magneto térmico, es el elemento que permite abrir o cerrar un circuito en tensión, interrumpiendo o estableciendo una circulación de corriente. Opera bajo el control de la protección y su apertura, coordinada con la de otros interruptores, permite aislar el punto en que se ha producido la falla. Se muestra en la Figura 8.

Este dispositivo consta de:

- Circuito de control, que es gobernado por la protección correspondiente.
- Contactos principales, que al separarse o juntarse implican, respectivamente, la apertura o cierre del interruptor.
- Contactos auxiliares, que reflejan el estado en que se encuentra el interruptor. Mediante ellos se realimenta a la protección y a otros equipos con la información de si el interruptor está abierto o cerrado y, permiten conocer si el interruptor ha operado correctamente siguiendo la orden dada por la protección.
- Cámara de extinción, en la que se crea un ambiente de alta rigidez dieléctrica que favorece la extinción del arco que se produce como

consecuencia de la separación de los contactos del interruptor que se encuentran inmersos en ella. Como medios dieléctricos más empleados actualmente cabe citar el aceite y el hexafluoruro de azufre.

Figura 8. Interruptor magneto térmico



Fuente: Protecciones en las Instalaciones eléctricas-Evolucion y perspectivas, (Montané, 1993)

Estos dispositivos son ampliamente utilizados como primeros elementos de protección y en diversas aplicaciones industriales. Su principio de funcionamiento permite aislar las fallas presentadas en los circuitos de potencia, en presencia de altas corrientes y con efectos de temperatura intrínsecos al sistema protegido.

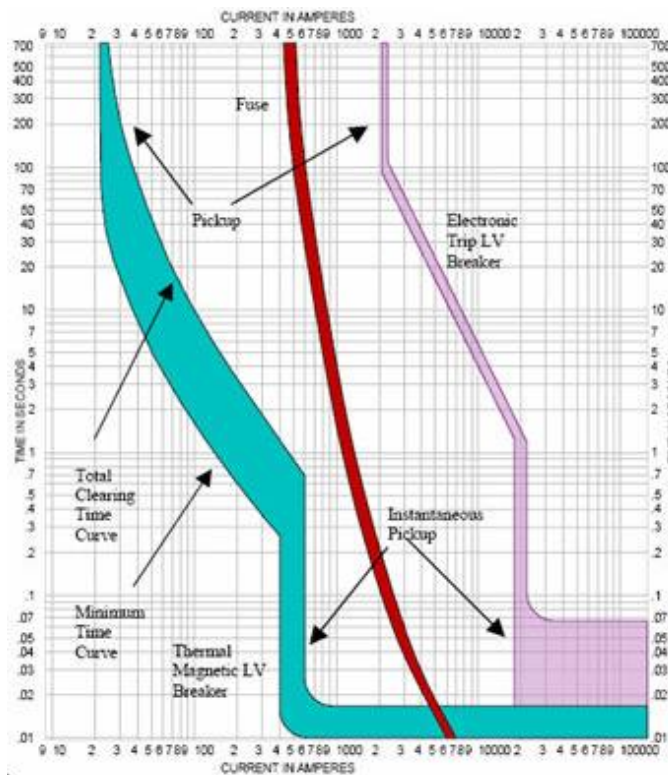
6.5. DIFERENCIACIÓN EN PROTECCIONES

6.5.1. Relés de sobrecorriente

El relé de sobrecorriente es un elemento que funciona con base en la corriente sensada, la cual puede incrementarse debido a alguna condición anormal del sistema, tal como un cortocircuito o una sobrecarga. La Figura 9 muestra las condiciones de corriente (I) vs tiempo en este tipo de protección.

La protección de sobrecorriente es la forma más simple y la menos costosa de proteger un circuito o equipo. Esta protección permite aclarar las fallas con un retardo de tiempo que depende de la magnitud de corriente circulante, suministrando un respaldo para los terminales remotos.

Figura 9. Operación corriente vs tiempo rele de sobrecorriente



Fuente: Protecciones en las Instalaciones eléctricas-Evolución y perspectivas, (Montané, 1993)

6.5.2. Parámetros de ajuste

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

- De tiempo definido cuando se supera un umbral previamente calibrado. En este caso su operación puede ser instantánea (función 50) o temporizada (función 51).
- De tiempo inverso cuya operación depende del tiempo según una función exponencial establecida por la siguiente expresión en la Ecuación 4:

Ecuación 4. De tiempo inverso

$$t = TMS \cdot \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_s} \right)^\alpha} + C \right)$$

Dónde

- t=** Tiempo de actuación del Relé (variable dependiente)
- I=** Corriente que mide el Relé (variable independiente)
- α =** Parámetro que define la curva característica de operación del Relé
- I_s=** Corriente de Arranque del Relé
- TMS=** Constante de ajuste del Relé
- K =** Parámetro que define la curva característica de operación del Relé
- C=** Constante de ajuste del Relé

Para el ajuste del relé se debe definir lo siguiente:

Para la función (51)

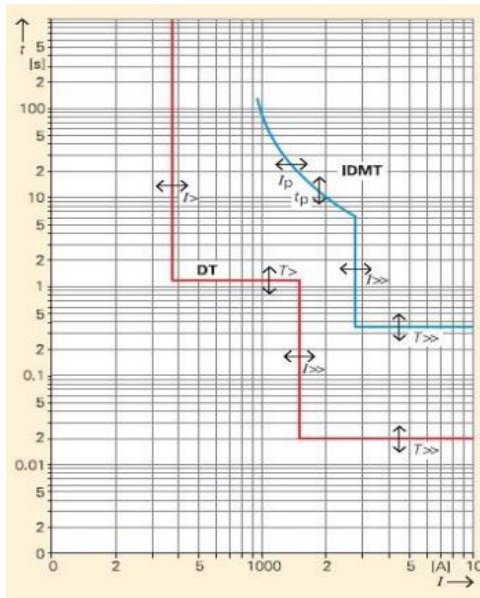
- La corriente de Arranque del Relé (I_s) que viene a ser el umbral de la corriente de operación del relé.
- La constante de ajuste del Relé (TMS) que viene a ser el parámetro que permite definir los tiempos de operación según su curva característica.

Para la función (50)

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

En la Figura 10, se muestran los ajustes del relé de sobrecorriente de tiempo inverso (51) combinado con la función instantánea (50) en comparación con un relé de sobrecorriente de tiempo definido con dos umbrales de operación (50/51) .

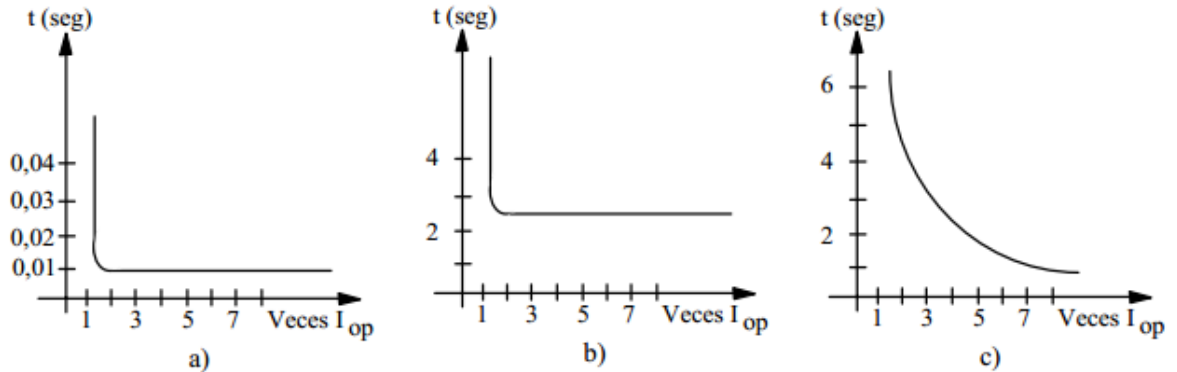
Figura 10. Ajustes relé de sobrecorriente



Fuente: Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica (Egea, 2009).

En la Figura 11, se pueden observar algunas gráficas acerca del comportamiento de la corriente en función del tiempo para relés de corriente.

Figura 11. Curvas de tiempo vs corriente de relés: a) Instantáneo; b) Tiempo definido; c) Tiempo inverso

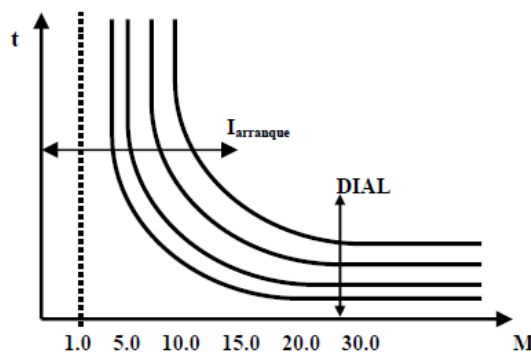


Fuente: Capítulo IV: Análisis de corto circuito (Gómez, 2012).

Los relés de protección traen consigo la opción *Dial*, la cual permite obtener diferentes tiempos de operación para un mismo tipo de curva y una corriente (I) dada, tal como lo muestra la Figura 12.

En relés actualizados, los pasos de dial son muy cercanos entre sí, por ejemplo 0.1 a 1 en pasos de 0.05, equivalente a 18 curva

Figura 12. Curva de operación de un rele de tiempo inverso y Dial



Fuente: Capítulo IV: Análisis de corto circuito (Gómez, 2012).

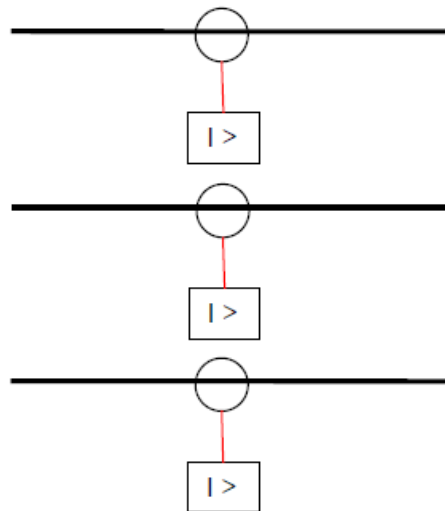
Así mismo, dentro de los parámetros principales de una protección de sobre corriente se encuentra el “pick up” que corresponde a la magnitud de la corriente mínima de operación del relé y la curva de operación llamada “lever”.

El “pick up” fija la sensibilidad de la protección, lo que permite detectar cualquier tipo de cortocircuito en su zona protegida, incluyendo la zona donde debe dar respaldo

6.5.3. Relés de fases y de tierra

Se pueden encontrar relés de sobrecorriente de fases y de tierra. Los relés de fase operan para todo tipo de falla, ya que actúan con la corriente que circula por cada una de las fases, su conexión es la siguiente:

Figura 13. Conexión relés sobrecorriente de fases

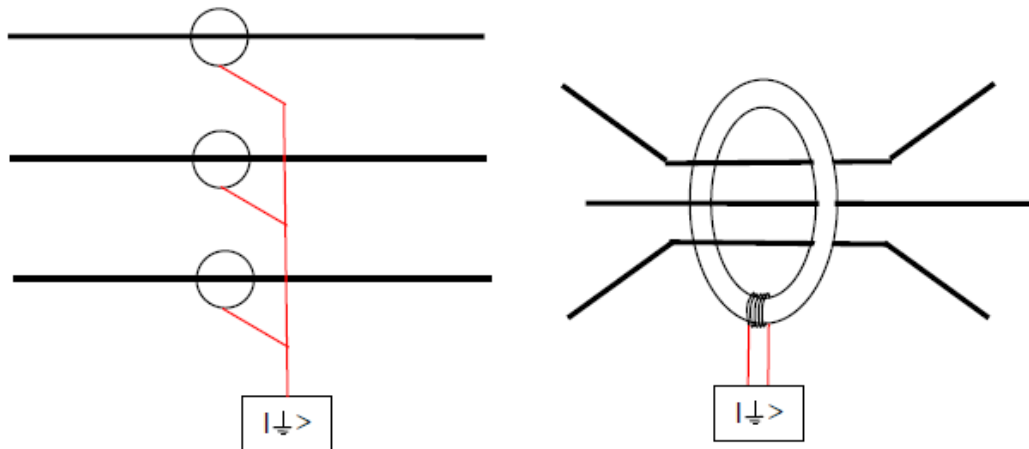


Fuente: Capítulo IV: Análisis de corto circuito (Gómez, 2012).

Los relés de sobrecorriente de tierra solo detectan fallas que involucren tierra. Es una protección que puede garantizar una alta sensibilidad teniendo en cuenta que se alimenta con la corriente residual, la cual debe tener normalmente un valor bastante bajo.

A continuación se muestran los esquemas de conexión:

Figura 14. Conexión relés sobrecorriente de tierra



Fuente: Capítulo IV: Análisis de corto circuito (Gómez, 2012).

6.5.4. Relés de sobrecorriente direccionales

Adicional a medir la magnitud de la corriente, miden el ángulo entre la tensión y la corriente para determinar en qué sentido fluye la corriente de falla. Estos relés se utilizan principalmente en sistemas enmallados donde la corriente de falla o de carga puede fluir en ambas direcciones, ya que la fuente no se encuentra ubicada a un solo lado del sistema. En la Figura 15 se puede apreciar el diagrama de conexión interno de un relé direccional.

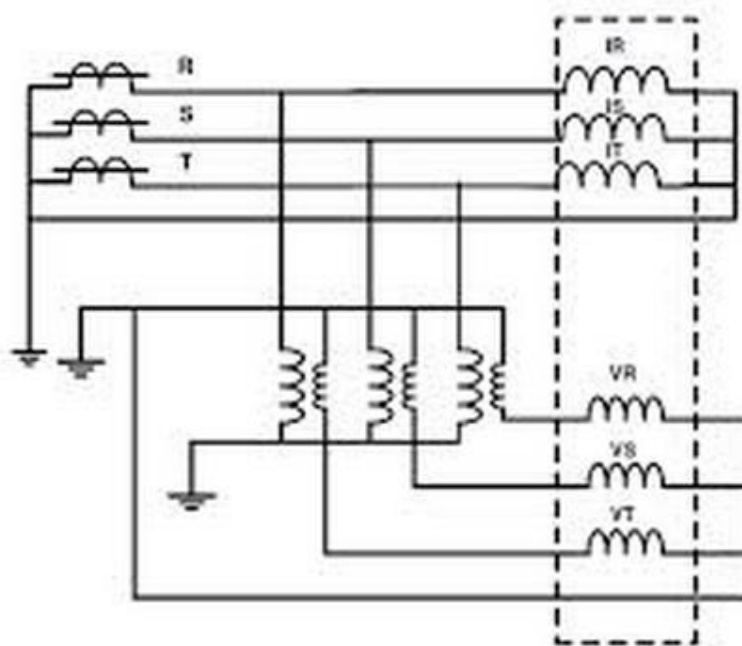
Algunas características importantes de este tipo de relés son:

- Presenta una mayor simplicidad en la coordinación de relés.
- Requieren de señales tanto de corriente como de tensión para determinar la dirección de la falla. Los relés direccionales de fase son polarizados por el voltaje de fase, mientras que los relés de tierra emplean varios métodos de

polarización, usando cantidades de secuencia cero o de secuencia negativa.

- Los elementos direccionales se utilizan en conjunto con relés de sobrecorriente o de impedancia para mejorar la selectividad.

Figura 15. Relé de sobrecorriente direccional



Fuente: Capítulo IV: Análisis de corto circuito (Gómez, 2012).

6.6. PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Tal que en todos los componentes del SEP, las protecciones eléctricas deben obedecer a los tipos de fallas que se presentan, siendo las más comunes en líneas de transmisión por:

- Descargas atmosféricas
- Daños de aisladores
- Caída de cables
- Acercamientos

Las fallas además pueden ser monofásicas, bifásicas o trifásicas, e involucrar o no contacto con tierra, así mismo, pueden ser de alta o de baja impedancia, siendo las de alta impedancia más difíciles de detectar. Para la protección de las líneas debe tenerse en cuenta si el flujo de corriente de falla se puede presentar en ambas direcciones o si es en una sola dirección. Para las líneas enmalladas en las cuales la corriente de falla puede fluir desde ambos extremos de la línea, es preciso implementar otros esquemas de protección más complejos.

6.7. RELÉS DE DISTANCIA

Utilizan la medida de la relación entre el voltaje y la corriente para determinar si la falla está en la zona de protección del relé. Estos relés se ajustan de acuerdo con las impedancias de secuencia cero y positiva de la línea de transmisión.

La impedancia medida durante operación normal es la relación entre el voltaje en el extremo terminal y el flujo de corriente en la línea. Este valor es usualmente un valor alto y resistivo. Pero durante fallas este valor es bajo y con alto contenido reactivo. Un cambio repentino en la impedancia medida determina la ocurrencia de una falla y si ésta se encuentra dentro en su zona de protección o en otra parte del sistema. Esto es llevado a cabo por la limitación del relé a una cierta franja de la impedancia observada, comúnmente llamada “Alcance”.

La mayor ventaja de estos relés de distancia es su utilización en fallas polifásicas, pues su zona de operación es función sólo de la impedancia medida y de la resistencia de falla.

6.7.1. Ajuste de la Zona 1

Es para operación instantánea y su objetivo es proveer un despeje rápido de fallas que ocurran a lo largo de la línea. Esta Zona 1 se ajusta entre un 80 o 90% de la

impedancia de la línea para evitar operaciones innecesarias cuando se presente una falla más allá de la barra remota. Cuando ocurre una falla con impedancia de falla (común en fallas a tierra), la inyección de corriente del otro extremo de la línea, introduce un error de medida en el extremo inicial, denominado efecto “Infeed”. Cuando se ajusta la Zona 1 se deben tener en cuenta el efecto infeed en Zona 1, errores en la característica del relé y longitud de la línea.

6.7.2. Ajuste de la Zona 2

Su objetivo es proteger completamente la línea y actuar como zona de respaldo ante la no operación de la Zona 1 de las líneas ubicadas en la subestación remota.

Se escoge el 120% de la impedancia de la línea a proteger como valor mínimo de ajuste, dado que si se escoge un valor inferior, los errores de los transformadores de instrumentos (CT y PT), el acople mutuo de secuencia cero en circuitos paralelos y el valor de la impedancia de falla, pueden producir desbalance en el relé, esto quiere decir que el relé no verá la falla en Zona 2, sino más allá y por lo tanto operará en un tiempo muy largo (Tiempo de Zona 3).

El ajuste de Zona 2 se puede seleccionar por encima del 120% de la impedancia de la línea siempre y cuando se justifique con los resultados de un análisis de efecto “Infeed” para esta zona.

6.7.3. Ajuste de la Zona de reversa

El propósito de esta zona es proveer un respaldo a la protección diferencial de barras de la subestación local. Su ajuste se realiza tomando el menor valor de los cálculos siguientes:

- 20% de la impedancia de la línea reversa con menor impedancia.
- 20% de la impedancia equivalente de los transformadores de la subestación local.

6.7.4. Ajuste de la Zona 3 hacia adelante

Su objetivo es servir de respaldo a las protecciones de las líneas adyacentes. Su ajuste se extiende hasta el extremo opuesto de la línea adyacente de mayor impedancia, pero se debe garantizar que este alcance no detecte fallas ocurridas en las subestaciones de diferentes tensiones conectadas a través de los transformadores de potencia.

El ajuste de la Zona 3 es el menor valor de impedancia calculada para los dos casos siguientes:

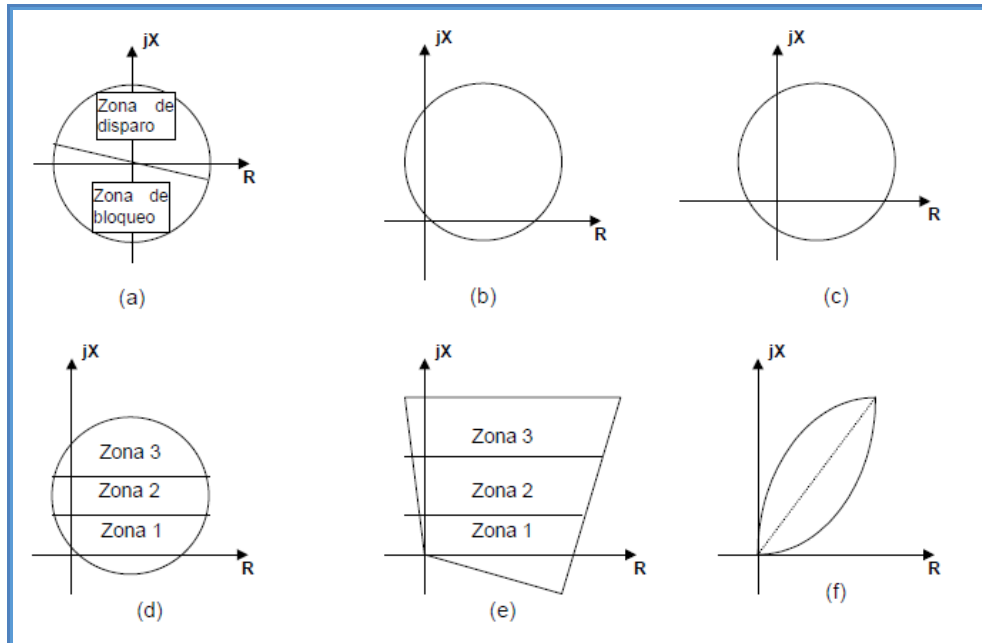
- Impedancia de la línea a proteger más el 80% de la impedancia equivalente de los transformadores en la barra remota.
- Impedancia de la línea a proteger más el valor de Z de la línea adyacente con mayor impedancia, multiplicada por un factor de seguridad del 120%.

6.7.5. Alcance resistivo

Para el ajuste del alcance resistivo de las diferentes zonas, se debe seleccionar un único valor para todas las diferentes zonas de la protección distancia, permitiendo establecer la coordinación a través de los tiempos de disparo de cada zona y logrando selectividad por medio de la impedancia de la línea vista por el relé hasta el sitio de la falla de alta impedancia. La Figura 13 muestra las zonas de trabajo de un relé distancia.

Los valores típicos resistivos son calculados como el 45% de la impedancia mínima de carga o de máxima transferencia del circuito en cuestión.

Figura 16. Características del relé de distancia



Fuente: Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, (Mujal, 2002).

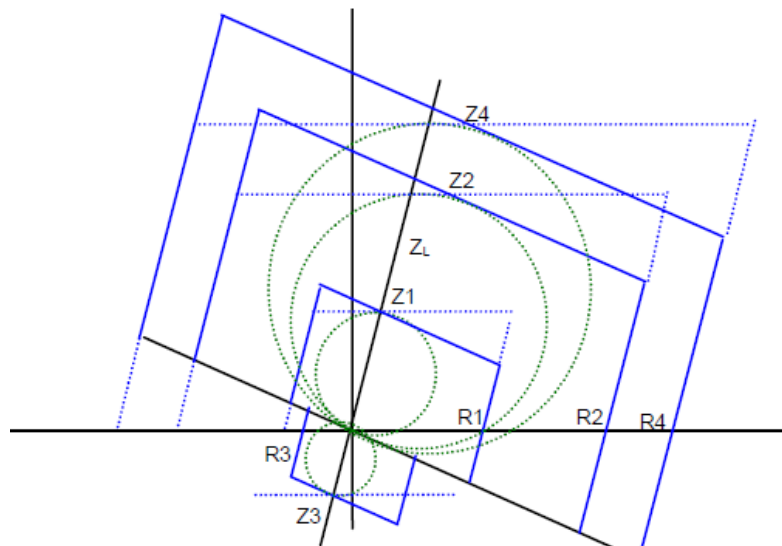
- a. Relé impedancia: opera cuando la impedancia medida es menor que el ajuste.
- b. Relé Mho: opera si la impedancia medida cae dentro del círculo.
- c. Relé Mho Offset: opera para dar disparo bajo supervisión de unidad direccional.
- d. Relé Reactancia: mide la componente reactiva de la impedancia.
- e. Relé cuadrilateral: opera bajo la acción de reactancia y direccional.
- f. Relé lenticular: similar al Mho, pero con menos sensibilidad.

La protección de distancia utiliza varias zonas para proteger la línea de transmisión. En Colombia el Código de Redes establece: zona 1, zona 2, zona 3 y zona reversa. Sin embargo, algunos relés sólo disponen de dos o tres zonas, y existen relés que pueden llegar a tener hasta cinco (5) zonas y una zona adicional llamada zona de arranque.

Estas zonas se definen debido a que pueden existir errores en la medida de lazos de impedancia del circuito de protección y los relés anexo tienen cierto nivel de incertidumbre sobre si la falla se presentó sobre la línea que vigilan o fuera de ella.

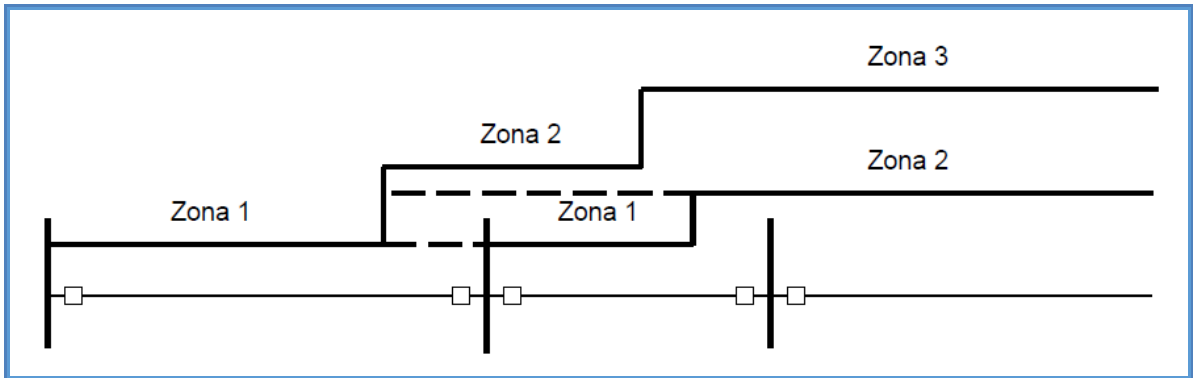
En las Figuras 17 y 18 pueden observarse los alcances de las zonas de una protección distancia.

Figura 17. Alcance zonas de protección distancia



Fuente: Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, (Mujal, 2002).

Figura 18. Alcance de zonas



Fuente: Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, (Mujal, 2002).

La distribución de estas zonas permite una mejor parametrización de los ajustes del relé, debido a que la presencia de incertidumbre mencionada anteriormente en los mismos, hace que se puedan generar errores de automatismo al momento de dar la orden de apertura de tramos de líneas específicas en un SEP.

6.8. PROTECCIÓN DE GENERADORES Y TRANSFORMADORES

6.8.1. PROTECCIÓN DE GENERADORES

Una unidad de generación es un sistema complejo que se constituye de los devanados del estator y su transformador asociado, el rotor con su devanado de campo y la excitatriz, la turbina, etc. Se pueden presentar fallas de diversa índole dentro de un sistema tan complejo como éste, por lo que se requiere un sistema de protección muy completo.

Generalmente se utilizan dos grupos de protecciones donde el uno es complemento del otro de tal forma que exista un esquema confiable y seguro que cubra completamente las fallas del generador (Agosto, 2014). Existen dos grupos de protección para generadores, la primera para detectar y aislar fallas en la máquina y la segunda para proteger la máquina contra los efectos de fallas externas.

Existen dos tipos de fallas en la máquina: fallas eléctricas y fallas mecánicas.

Las principales protecciones utilizadas en los generadores son:

- Diferencial del generador: protección contra fallas en los arrollamientos del estator.
- Protección contra fallas entre espiras
- Protección contra fallas a tierra del estator
- Protección contra fallas a tierra del rotor
- Protección contra pérdida de excitación
- Protección de balance de tensión
- Protección de sobre-excitación (Voltios/Hz)

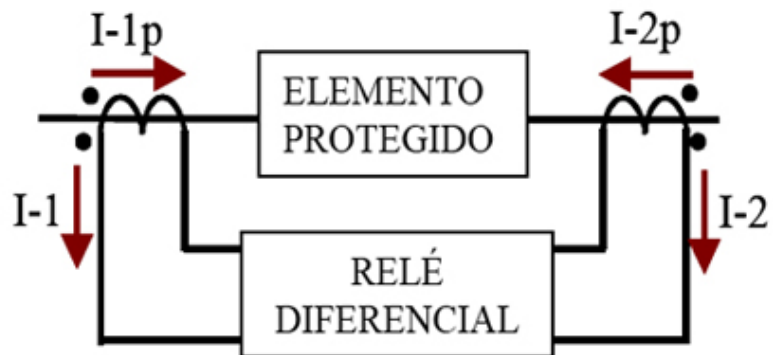
6.8.2. PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES

Los transformadores y autotransformadores, están sometidos a cortocircuitos internos de los cuales se protegen con relés diferenciales porcentuales o de alta impedancia (ver Figura 19) y con relés de presión o acumulación de gas. También están sometidos a sobre corrientes por fallas externas contra las cuales se protegen con relés de sobrecorriente. Adicionalmente, pueden sufrir sobrecalentamientos y sobrecargas que se pueden detectar con resistencias detectoras de temperatura y con relés de sobrecarga, respectivamente.

Las principales protecciones utilizadas en los transformadores son:

- Protección diferencial de transformador
- Protección se sobrecorriente: de fases, de fase instantánea, falla a tierra, protección devanado terciario, protección transformador de puesta a tierra.
- Protecciones mecánicas: de presión súbita o válvula de sobrepresión, Relé Buchholz, detección de nivel de aceite, temperatura, imagen térmica.

Figura 19. Protección diferencial de Transformador



Fuente: Protección de sistemas eléctricos de potencia (Villegas, 2014).

6.9. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y DE TENSIÓN

6.9.1. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Son dispositivos utilizados en los SEP para disminuir la corriente que circula a través de los circuitos de protección y medida a niveles que sean fácilmente manejables. Por ejemplo, se pueden tener 1000 A de corriente nominal en el primario y 1 A de corriente nominal en el secundario. La Figura 20 muestra una vista en sección de un transformador de corriente.

Figura 20. Transformador de corriente, vista sección



Fuente: Transformador de corriente, (Cmaps, 2014)

Los transformadores de corriente se aplican básicamente en:

- Circuitos de protección: para llevar las corrientes a los equipos de protección y equipos de registro de fallas.
- Circuitos de medición: proporcionan la corriente necesaria para todos los equipos de medición tales como amperímetros, vatímetros, contadores de energía, transductores para tele-medida, etc.

Según la norma IEC 61869-2 (Omicron, 2012), las relaciones de transformación más comunes en los transformadores de corriente son:

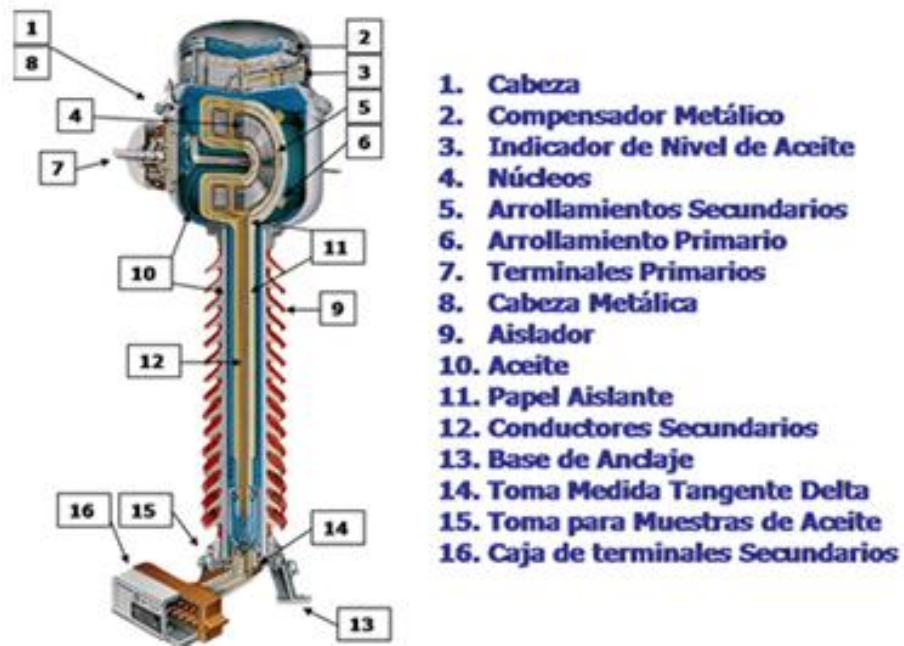
Para corrientes primarias: 10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A y sus múltiplos de 10 en AT.

Para corrientes secundarias: 1 A y 5 A.

6.9.2. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Son dispositivos utilizados en los SEP con el objetivo de aislar los circuitos de medición y protección de las altas tensiones, permitiendo que los relés, equipos de medición y equipos de registro sean aislados solo para baja tensión. Los niveles de tensión varían según lo indicado en la norma IEC 60038, (International Electrotechnical Commission, 2002), En la Figura 21 se puede observar un transformador de potencial (tensión) y sus partes constitutivas.

Figura 21. Transformador de tensión, vista sección



Fuente: Transformadores de tensión, (ACJ High Voltage, 2014)

Adicional a lo indicado anteriormente, los transformadores de tensión son utilizados principalmente para:

- Disminuir la tensión que se lleva a los circuitos de protección y medida a niveles que sean fácilmente manejables. Por ejemplo, se pueden tener 220 kV de tensión nominal en el primario y 110 V de tensión nominal en el secundario.
- En las líneas de transmisión que cuentan con sistema de portadora por línea de potencia, se utiliza la parte capacitiva de los transformadores para recibir la señal de comunicaciones que proviene del extremo remoto.

Los transformadores de tensión pueden ser:

- Inductivos
- De acople capacitivo: utilizan un divisor tipo capacitivo para disminuir la tensión a valores de media tensión, por ejemplo 15 kV. De la salida de la parte capacitiva se conecta un transformador inductivo.

Según las normas IEC 61869-3 (International Electrotechnical Commission, 2011) e IEC 61869-5 (IEC, Instrument transformers - Part 3-5: Additional requirements for inductive voltage transformers, 2011), las relaciones de transformación más comunes en los transformadores de tensión son:

- Según norma IEC 60038, (International Electrotechnical Commission, 2002) los valores de referencia de tensión se establecen dependiendo del rango de operación del SEP, y todas las tensiones primarias para la selección del PT deberán ser $1/\sqrt{3}$ veces la tensión nominal.
- Para el secundario se tendrán dos opciones, según prácticas de países Europeos de 100 V y 110 V, para Estados Unidos y Canadá 120 V en sistemas de distribución, 115 V en sistemas de transmisión y 230 V en circuitos secundarios extendidos.

6.10. DESCRIPCIÓN DE LOS NÚMEROS ANSI / IEEE EN PROTECCIONES ELÉCTRICAS

En el diseño de SEP, la norma ANSI/IEEE C37.2-2008 facilita información sobre los elementos que componen un esquema de protecciones, los cuales, de distintas maneras, protegerán los elementos principales como son: Generadores, transformadores y líneas de transmisión de posibles daños ocasionados por fallas de cortocircuito, de línea abierta, circuitos resonantes o algún régimen anormal como las sobrecargas, baja frecuencia, oscilación de potencia, pérdida de

sincronismo, entre otras. Se tienen los siguientes dispositivos y sus números (Schneider Electric, 2014):

1. **Relé de cierre o arranque temporizado**, es el que da la temporización deseada entre operaciones de una secuencia automática o de un sistema de protección.
2. **Relé de comprobación o de bloqueo**, es el que opera en respuesta a la posición de un número de condiciones determinadas, en un equipo para permitir que continúe su operación, para que se pare o para proporcionar una prueba de la posición de estos dispositivos o de estas condiciones para cualquier fin.
3. **Contacto principal**, es un dispositivo generalmente mandado por el dispositivo N° 1 o su equivalente y los dispositivos de permiso y protección necesarios, y sirve para cerrar y abrir los circuitos de control necesarios para reponer un equipo en marcha, bajo las condiciones deseadas o bajo otras condiciones anormales.
4. **Dispositivo de parada**, es aquel cuya función primaria es quitar y mantener un equipo fuera de servicio.
5. **Interruptor de arranque**, es un dispositivo cuya función principal es conectar la máquina a su fuente de tensión de arranque.
6. **Interruptor de ánodo**, es el utilizado en los circuitos del ánodo de un rectificador de potencia, principalmente para interrumpir el circuito rectificador por retorno del encendido de arco.
7. **Dispositivo de desconexión de energía de control**, es un dispositivo de desconexión (tal como un conmutador de cuchilla, interruptor o bloque de fusibles extraíbles) que se utiliza con el fin de conectar y desconectar, respectivamente, la fuente de energía de control hacia y desde la barra o equipo de control.

8. **Dispositivo de inversión**, es el que se utiliza para invertir las conexiones del campo de una máquina o bien para otras funciones especiales de inversión.
9. **Conmutador de secuencia**, es el que se utiliza para cambiar la secuencia de conexión o desconexión de unidades de un equipo de unidades múltiples.
10. **Reservado para aplicaciones futuras.**
11. **Dispositivo de exceso de velocidad**, es normalmente un interruptor de velocidad de conexión directa que actúa cuando la máquina embala.
12. **Dispositivo de velocidad síncrona**, es el que funciona con aproximadamente la velocidad normal de una máquina, tal como un conmutador de velocidad centrífuga, relés de frecuencia de deslizamiento, relé de tensión, relé de intensidad mínima o cualquier tipo de dispositivo similar.
13. **Dispositivo de falta de velocidad**, es el que actúa cuando la velocidad de la máquina desciende por debajo de un valor predeterminado.
14. **Dispositivo regulador de velocidad o frecuencia**, de una máquina o sistema a un cierto valor o bien entre ciertos límites.
15. **Reservado para aplicaciones futuras.**
16. **Conmutador para puentear el campo serie**, sirve para abrir y cerrar un circuito en shunt entre los extremos de cualquier pieza o aparto (excepto una resistencia) tal como el campo de una máquina un condensador o una reactancia.
17. **Dispositivo de aceleración o declaración**, es el que se utiliza para cerrar o hacer cerrar los circuitos que sirven para aumentar o disminuir la velocidad de una máquina.
18. **Contactos de transición de arranque a marcha normal**. Su función es hacer las transferencias de las conexiones de alimentación de arranque a las de marcha normal de la máquina.

19. **Válvula maniobrada eléctricamente**, es una válvula accionada por solenoide o motor, que se utiliza en circuitos de vacío, aire, gas, aceite, agua o similares.
20. **Relé de distancia**, es el que funciona cuando la admitancia, impedancia o reactancia del circuito disminuyen o aumentan a unos límites preestablecidos.
21. **Interruptor igualador**, sirve para conectar y desconectar las conexiones para actualización de intensidad para los reguladores del campo de la máquina o de la tensión de la máquina, en una instalación de unidades múltiples.
22. **Dispositivo regulador de temperatura**, es el que funciona para mantener la temperatura de la máquina u otros aparatos dentro de ciertos límites.
23. **Sobre excitación**. Un relé que funciona cuando la relación V/Hz (tensión/frecuencia) excede un valor preajustado. El relé puede tener una característica temporizada o instantánea.
24. **Dispositivo de sincronización o puesta en paralelo**, es el que funciona cuando dos circuitos de alterna están dentro de los límites deseados de tensión, frecuencia o ángulo de fase, lo cual permite o causa la puesta en paralelo de estos circuitos.
25. **Dispositivo térmico**, es el que funciona cuando la temperatura del campo en shunt, o el bobinado amortiguador de una máquina, o el de una resistencia de limitación de carga o de cambio de carga, o de un líquido u otro medio, excede de un valor determinado con anterioridad.
26. **Relé de mínima tensión**, es el que funciona al descender la tensión de un valor predeterminado.
27. **Detector de llama**, su función es detectar la existencia de llama en el piloto o quemador principal, por ejemplo de una caldera o una turbina de gas.

28. **Contactador de aislamiento**, es el que se utiliza con el propósito especial de desconectar un circuito de otro, por razones de maniobra de emergencia, conservación o prueba.
29. **Relé anunciador**, es un dispositivo de reposición no automática que da un número de indicaciones visuales independientes al accionar el dispositivo de protección y además también puede estar dispuesto para efectuar la función de bloqueo.
30. **Dispositivo de excitación separada**, es el que conecta un circuito, tal como el campo shunt de una conmutatriz, a la fuente de excitación separada durante el proceso de arranque, o bien se utiliza para energizar la excitación y el circuito de encendido de un rectificador.
31. **Relé direccional de potencia**, es el que funciona sobre un valor deseado de potencia en una dirección dada o sobre la inversión de potencia como por ejemplo, la resultante del retroceso del arco en los circuitos de ánodo o cátodo de un rectificador de potencia.
32. **Conmutador de posición**, es el que hace o abre contacto cuando el dispositivo principal o parte del aparato, que no tiene un número funcional de dispositivo, alcanza una posición dada.
33. **Conmutador de secuencia movido a motor**, es un conmutador de contactos múltiples el cual fija la secuencia de operación de los dispositivos principales durante el arranque y la parada, o durante otras operaciones que requieran una secuencia.
34. **Dispositivo de cortocircuito de las escobillas o anillos rozantes**, es para elevar, bajar o desviar las escobillas de una máquina, o para cortocircuitar los anillos rozantes.
35. **Dispositivo de polaridad**, es el que acciona o permite accionar a otros dispositivos con una polaridad solamente.
36. **Relé de baja intensidad o baja potencia**, es el que funciona cuando la intensidad o la potencia caen por debajo de un valor predeterminado.

37. **Dispositivo térmico de cojinetes**, es el que funciona con temperatura excesiva de los cojinetes.
38. **Detector de condiciones mecánicas**, es el que tiene por cometido funcionar en situaciones mecánicas anormales (excepto las que suceden a los cojinetes de una máquina, tal y como se escoge en la función 38), tales como vibración excesiva, excentricidad, etc.
39. **Relé de campo**, es el que funciona por un valor dado, anormalmente bajo, por fallo de la intensidad de campo de la máquina, o por un valor excesivo del valor de la componente reactiva de la corriente de armadura en una máquina de c.a. que indica excitación del campo anormalmente baja.
40. **Interruptor de campo**, es un dispositivo que funciona para aplicar o quitar la excitación de campo de una máquina.
41. **Interruptor de marcha**, es un dispositivo cuya función principal es la de conectar la máquina a su fuente de tensión de funcionamiento en marcha, después de haber sido llevada hasta la velocidad deseada desde la conexión de arranque.
42. **Dispositivo de transferencia**, es un dispositivo accionado a mano, que efectúa la transferencia de los circuitos de control para modificar el proceso de operación del equipo de conexión de los circuitos o de algunos de los dispositivos.
43. **Relé de secuencia de arranque del grupo**, es el que funciona para arrancar la unidad próxima disponible en un equipo de unidades múltiples cuando falta o no está disponible la unidad que normalmente precede.
44. **Detector de condiciones atmosféricas**. Funciona ante condiciones atmosféricas anormales, como humos peligrosos, gases explosivos, fuego, etc.
45. **Relé de intensidad para equilibrio o inversión de fases**, es un relé que funciona cuando las intensidades polifásicas están en secuencia inversa o desequilibrada o contienen componentes de secuencia negativa.

46. **Relé de tensión para secuencia de fase**, es el que funciona con un valor dado de tensión polifásica de la secuencia de fase deseada.
47. **Relé de secuencia incompleta**, es el que vuelve al equipo a la posición normal o “desconectado” y lo enclava si la secuencia normal de arranque, funcionamiento o parada no se completa debidamente dentro de un intervalo predeterminado.
48. **Relé térmico para máquina, aparato o transformador**, es el que funciona cuando la temperatura de la máquina, aparato o transformador excede de un valor fijado.
49. **Relé instantáneo de sobre intensidad o de velocidad de aumento de intensidad**, es el que funciona instantáneamente con un valor excesivo de velocidad de aumento de intensidad.
50. **Relé de sobrecorriente temporizado**, es un relé con una característica de tiempo inverso o de tiempo fijo que funciona cuando la intensidad de un circuito de c.a. sobrepasa in valor dado.
51. **Interruptor de c.a.** es el que se usa para cerrar e interrumpir un circuito de potencia de c.a. bajo condiciones normales, o para interrumpir este circuito bajo condiciones de falta de emergencia.
52. **Relé de la excitatriz o del generador de c.c.** es el que fuerza un campo de la máquina de c.c. durante el arranque o funciona cuando la tensión de la máquina ha llegado a un valor dado.
53. **Reservado para aplicaciones futuras.**
54. **Relé de factor de potencia**, es el que funciona cuando el factor de potencia de un circuito de c.a. no llega o sobrepasa un valor dado.
55. **Relé de aplicación del campo**, es el que se utiliza para controlar automáticamente la aplicación de la excitación de campo de un motor de c.a. en un punto predeterminado en el ciclo de deslizamiento.

56. **Dispositivo de cortocircuito o de puesta a tierra**, es el que funciona debido al fallo de uno o más de los ánodos del rectificador de potencia, o por el fallo de un diodo por no conducir o bloquear adecuadamente.
57. **Relé de fallo de rectificador de potencia**, es el que funciona debido al fallo de uno o más de los ánodos del rectificador de potencia, o por el fallo de un diodo por no conducir o bloquear adecuadamente.
58. **Relé de sobretensión**, es que funciona con un valor dado de sobretensión.
59. **Relé de equilibrio de tensión**, es el que opera con una diferencia de tensión entre dos circuitos.
60. **Relé de parada o apertura temporizada**, es el que se utiliza en unión con el dispositivo que inicia la parada total o la indicación de parada o apertura en una secuencia automática.
61. **Reservado para aplicaciones futuras.**
62. **Relé de presión de gas, líquido o vacío**, es el que funciona con un valor dado de presión del líquido o gas, para una determinada velocidad de variación de la presión.
63. **Relé de protección de tierra**, es el que funciona con el fallo a tierra del aislamiento de una máquina, transformador u otros aparatos, o por arco a tierra de una máquina de c.c.
64. **Regulador mecánico**, es el equipo que controla la apertura de la compuerta o válvula de la máquina motora, para arrancarla, mantener su velocidad o detenerla.
65. **Relé de pasos**, es el que funciona para permitir un número especificado de operaciones de un dispositivo dado o equipo, o bien, un número especificado de operaciones sucesivas con un intervalo dado de tiempo entre cada una de ellas. También se utiliza para permitir el energizado periódico de un circuito, y la aceleración gradual de una máquina.
66. **Relé direccional de sobreintensidad de c.a.** es el que funciona con un valor deseado de circulación de sobreintensidad de c.a. en una dirección dada.

67. **Relé de bloqueo**, es el que inicia una señal piloto para bloquear o disparar en faltas externas en una línea de transmisión o en otros aparatos bajo condiciones dadas, coopera con otros dispositivos a bloquear el disparo o a bloquear el reenganche con una condición de pérdida de sincronismo o en oscilaciones de potencia.
68. **Dispositivo de supervisión y control**, es generalmente un interruptor auxiliar de dos posiciones accionado a mano, el cual permite una posición de cierre de un interruptor o la puesta en servicio de un equipo y en la otra posición impide el accionamiento del interruptor o del equipo.
69. **Reóstato**, es el que se utiliza para variar la resistencia de un circuito en respuesta a algún método de control eléctrico, que, o bien es accionado eléctricamente, o tiene otros accesorios eléctricos como contactos auxiliares de posición o limitación.
70. **Relé de nivel líquido o gaseoso**. Este relé funciona para valores dados de nivel de líquidos o gases, o para determinadas velocidades de variación de estos parámetros.
71. **Interruptor de c.c.** es el que se utiliza para cerrar o interrumpir el circuito de alimentación de c.c. bajo condiciones normales o para interrumpir este circuito bajo condiciones de emergencia.
72. **Contactador de resistencia de carga**, es el que se utiliza para puentear o meter en circuito un punto de la resistencia limitadora, de cambio o indicadora, o bien para activar un calentador, una luz, o una resistencia de carga de un rectificador de potencia u otra máquina.
73. **Relé de alarma**, es cualquier otro relé diferente al anunciador comprendido bajo el dispositivo 30 que se utiliza para accionar u operar en unión de una alarma visible o audible.
74. **Mecanismo de cambio de posición**, se utiliza para cambiar un interruptor desconectable en unidad entre las posiciones de conectado, desconectado y prueba.

75. **Relé de sobreintensidad de c.c.** es el que funciona cuando la intensidad en un circuito de c.c. sobrepasa un valor dado.
76. **Transmisor de impulsos**, es el que se utiliza para generar o transmitir impulsos, a través de un circuito de Telemidida o hilos pilotos, a un dispositivo de indicación o recepción de distancia.
77. **Relé de medio de ángulo de desfase o de protección de salida de paralelo**, es el que funciona con un valor determinado de ángulo de desfase entre dos tensiones o dos intensidades, o entre tensión e intensidad.
78. **Relé de reenganche de c.a.** es el que controla el reenganche enclavamiento de un interruptor de c.a.
79. **Relé de flujo líquido o gaseoso**, actúa para valores dados de la magnitud del flujo o para determinadas velocidades de variación de éste.
80. **Relé de frecuencia**, es el que funciona con un valor dado de la frecuencia o por la velocidad de variación de la frecuencia.
81. **Relé de reenganche de c.c.** es el que controla el cierre y reenganche de un interruptor de c.c. generalmente respondiendo a las condiciones de la carga del circuito.
82. **Relé de selección o transferencia del control automático**, es el que funciona para elegir automáticamente entre ciertas fuentes de alimentación o condiciones en un equipo, o efectúa automáticamente una operación de transferencia.
83. **Mecanismo de accionamiento**, es el mecanismo eléctrico completo, o servomecanismo, incluyendo el motor de operación, solenoides, auxiliares de posición, etc., para un cambiador de tomas, regulador de inducción o cualquier pieza de un aparato que no tenga número de función.
84. **Relé receptor de ondas portadoras o hilo piloto**, es el que es accionado o frenado por una señal y se usa en combinación con una protección direccional que funciona con equipos de transmisión de onda portadora o hilos piloto de c.c.

85. **Relé de enclavamiento**, es un relé accionado eléctricamente con reposición a mando o eléctrica, que funciona para parar y mantener un equipo fuera de servicio cuando concurren condiciones anormales.
86. **Relé de protección diferencial**, es el que funciona sobre un porcentaje o ángulo de fase u otra diferencia cuantitativa de dos intensidades o algunas otras cantidades eléctricas.
87. **Motor o grupo motor generador auxiliar**, es el que se utiliza para accionar equipos auxiliares, tales como bombas, ventiladores, excitatrices, etc.
88. **Desconectador de línea**, es el que se utiliza como un desconectador de desconexión o aislamiento en un circuito de potencia de c.a. o c.c. cuando este dispositivo se acciona eléctricamente o bien tiene accesorios eléctricos, tales como interruptores auxiliares, enclavamiento electromagnético, etc.
89. **Dispositivo de regulación**, es el que funciona para regular una cantidad, tal como la tensión, intensidad, potencia, velocidad, frecuencia, temperatura y carga a un valor dado, o bien ciertos límites para las máquinas, líneas de unión u otros aparatos.
90. **Relé direccional de tensión**, es el que funciona cuando la tensión entre los extremos de un interruptor o contactor abierto sobrepasa de un valor dado en una dirección dada.
91. **Relé direccional de tensión y potencia**, es un relé que permite y ocasiona la conexión de dos circuitos cuando la diferencia de tensión entre ellos excede de un valor dado en una dirección determinada y da lugar a que estos dos circuitos sean desconectados uno del otro cuando la potencia circulante entre ellos excede de un valor dado en la dirección opuesta.
92. **Contador de cambio de campo**, es el que funciona para cambiar el valor de la excitación de la máquina.

93. Relé de disparo o disparo libre, es el que funciona para disparar o permitir disparar un interruptor, contactor o equipo, o evitar un reenganche inmediato de un interruptor en el caso que abra por sobrecarga, aunque el circuito inicial de mando de cierre sea mantenido.

7. RESULTADOS DEL TRABAJO DE GRADO

7.1. MÓDULO DE PRÁCTICAS EN PROTECCIONES ELÉCTRICAS

Se plantea el módulo como un banco de pruebas, que por su diseño permita la realización de simulacros de actuación de protecciones eléctricas en diversos niveles, para los cuáles se debe contar con relés específicos que respondan a una configuración predeterminada.

El proceso de diseño para el montaje e instalación posteriores del módulo de prácticas, se realiza de tal manera que permita la aplicación conjunta de las prácticas de laboratorio correspondientes a la asignatura Protecciones y medidas en el pensum de Ingeniería Eléctrica de la IU Pascual Bravo.

7.1.1. Elementos constitutivos del módulo

El módulo de prácticas en protecciones eléctricas debe contener los siguientes elementos, dispuestos para la ejecución de los laboratorios futuros:

- **Bastidor vertical u horizontal multimodular**, con soporte, para la ubicación de elementos de control y protección. Este debe tener una base para la utilización de equipo de inyección y equipo de cómputo respectivo.
- **Relés de protección** que abarquen como mínimo la aplicación de ejemplos de sistemas de sobrecorriente, multifuncional de generador haciendo posible una protección de línea (distancia).
- **Equipo de inyección de corriente y señales**, de control, para la simulación de señales de alarma, disparo y actuación simultánea de los relés de protección, sobre el módulo bastidor.
- **Equipo de cómputo**, con software de aplicación específico para la administración y utilización del equipo de inyección de relés.

- **Elementos auxiliares de conexionado y Figurado** para la señalización y control, como conectores para cables, terminales, borneras y elementos de sujeción.

7.1.2. Bastidor multimodular

El bastidor es un módulo multimodular, construido preferiblemente en hierro tratado y terminación en pintura dieléctrica, diseñado a condición, de hasta 10 módulos, precisando elementos de sujeción para los diversos componentes como relés, módulos de protección y señalización, actuadores, etc. Se les puede encontrar en el mercado en disposición horizontal y vertical, siendo éste último de mayor utilización en el medio.

Figura 22. Ejemplo de módulo bastidor vertical multimodular



Fuente: Módulo bastidor vertical multimodular (Instaladores , 2014)

7.1.3. Relés de protección

- **Relé de sobrecorriente**

Existen muchos relés de protección de sobrecorriente, para distintos niveles de intervención y en varias marcas. El detalle de estos dispositivos fue tratado en capítulos anteriores. (Ver numeral 6.5.1).

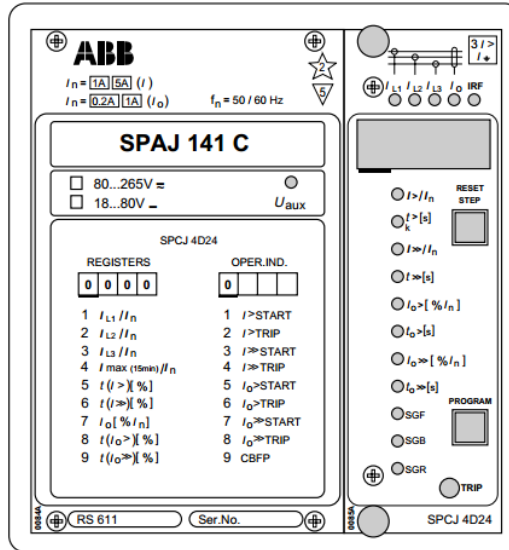
El relé que se plantea para el módulo de prácticas es el relé de sobrecorriente direccional, en lo posible con características de localización de fallas, con tensión de servicio hasta 125 VDC, inyectable, con niveles de corriente admisibles para el equipo de inyección.

Algunos relés más actualizados vienen con una programación para recierres automáticos, característica importante, de manera que la práctica y manipulación de este elemento permita configurar acciones ficticias de recierre y pueda verificarse directamente en sitio por parte de los practicantes.

Algunos tipos de relés que se plantean dentro de las posibilidades son:

- Relé sobrecorriente de tiempo GE IFC 77A y 77B
- Relé SPAJ 141 C relé combinado de sobrecorriente y falla tierra, Ver Figura 23.
- Relé SEL 351 direccional

Figura 23. Ejemplo de relé de sobrecorriente. Relé SPAJ 141 C



Fuente: Relé de sobrecorriente, (ABB SPAJ, 2014)

- **Relé protección de generador**

Los generadores representan el equipo más costoso en un SEP y se encuentran sometidos, más que ningún otro equipo del sistema, a los más diversos tipos de condiciones anormales.

Tal como se indica en (IEEE Standards Asociation, 2014), en un sistema integral de protección de generador, son varias las variables que se buscan proteger, con el fin de evitar prolongación de daños específicos en los equipos que constituyen el generador.

Entre las protecciones más importantes del generador se encuentran:

- Protección del Estator
 - Contra cortocircuito entre fases.
 - Contra cortocircuito entre fase y tierra

- Protección de generador con neutro desconectado de tierra
- Protección de generador con neutro conectado a tierra a través de una resistencia o reactancia.
- Protección de generador con neutro conectado a tierra a través de un transformador de distribución.
 - Contra cortocircuito entre espiras misma fase y fases abiertas
 - Contra sobrecalentamiento del estator
 - Contra sobretensiones
 - Contra cortocircuito a tierra del campo
- Método potenciométrico
- Método de inyección de corriente alterna
- Método de inyección de corriente continua
 - Contra sobrecalentamientos del rotor
 - Contra pérdida de excitación
- Protección de respaldo-fallas externas al generador
- Protección contra motoreo

Muchas compañías ofrecen diversos productos, ya sea para vigilar sobrecorrientes, o secuencias de fase, o fallas a tierra de manera individual, pero se plantea en este diseño la posibilidad de dotar el módulo con un relé de protección multifunción, de manera que se puedan realizar prácticas, simulando varias protecciones que se configuran normalmente para un generador.

Se pretende que el relé pueda ofrecer protección entre algunas funciones de:

- Protección para fuera de fase (78)

- Diferencial de fase (50DT)
- Protección frecuencia (81A)
- Protección secuencia negativa (50/27)
- Sobrevoltaje multipropósito (59X)

Figura 24. Ejemplo de relé multifuncional de generador. Relé M-3430 Becwith



Fuente: Relé multifuncional, (Beckwith Electric, 2010)

- **Relé protección de línea (distancia)**

Los relés de distancia se configuran con el objetivo de proveer protección a las líneas de transmisión, por eventos externos y facilitar tanto los recierres automáticos para la normalización de la línea, o para la apertura definitiva en presencia de fallas francas.

La elección de los relés de protección distancia dependerá siempre de las componentes eléctricas del circuito protegido y de los métodos de análisis utilizados para su asignación final. Un ejemplo se muestra en la Figura 25.

Según las variables eléctricas analizadas, las protecciones distancia más utilizadas son:

- Protección relés de distancia de tierra. Es esta protección se utilizan dos tipos de medición:
 - Medición impedancia secuencia positiva
 - Medición impedancia secuencia cero

- Relés de distancia de tierra
- Bloqueo por comparación direccional
- Protección por transferencia de apertura
 - Transferencia de apertura simple
 - Transferencia de apertura con confirmación local
 - Transferencia de apertura con confirmación local y relés con sobre alcance

Para este tipo de protección también existen diversas marcas de estos relés, y varían según niveles de tensión de aplicación, configuración de recierres automáticos, distancias de protección e interacción con otros equipos de monitoreo, señalización y protección.

Se pretende que el módulo contenga un tipo de relé distancia, que permita interfaz hombre máquina, inyectable, con fuente hasta 125 VDC. En el mercado existen diversas marcas como ABB, SEL, GE, SIEMENS, etc.

Los relés disponibles para su utilización en el módulo pueden contener circuitos de disparo rápido, con detección de oscilaciones de servicio a frecuencias establecidas, con canales de comunicación específicos con otros equipos y recierres o reconexiones de línea.

Figura 25. Ejemplo de relé protección de línea (distancia). Relé REC615 ABB



Fuente: Relé de protección de línea (Omicron Electronics, 2014)

7.1.4. Equipo de inyección de corriente y señales

Los equipos de inyección de corriente son equipos de utilización universal que permiten probar todas las generaciones y tipos de relés de protección. Los equipos comerciales poseen potentes fuentes de corriente con valores cercanos a los 64 amperios y hasta 860 voltamperios, para ampliar su rango de aplicación.

Las características principales de estos equipos son:

- Fuentes de corriente muy potentes para prueba incluso de relés electromecánicos de alta carga.
- Altas amplitudes de corriente para prueba de relés de 5 A
- Alta precisión y versatilidad para pruebas de relés estáticos y numéricos de todos los tipos

- Red integrada para prueba de dispositivos IED (Dispositivos Electrónicos Inteligentes) según norma IEC 61850, (Baigent , Adamiak, & Mackiewicz, s.f.).
- Funcionalidad de medida analógica de 10 canales y registro de transitorios (opción)

Estos equipos vienen provistos no solo de señales de corriente, sino también de tensión, los cuáles pueden ajustarse en sus rangos de amplitud, fase y frecuencia, lo cual los hace muy versátiles.

Normalmente su amplia posibilidad de conexiones permite ampliar su utilización a diversos dispositivos de protección y es posible la simulación de disparo de los diferentes relés, según la configuración establecida en los mismos.

Este equipo será indispensable en el módulo de pruebas y deberá contar con el apoyo de un equipo portátil que permita la interacción con el software específico del equipo, con el fin de tener amplitud en la manipulación de variables a través de la interfaz propuesta por este.

La Figura 26 muestra un tipo de equipo de inyección de relés, el cual podrá utilizarse como referencia para la implementación final.

Figura 26. Equipo de inyección de relés. CMC 356 OMICRON



Fuente: Equipo de inyección de relés (Omicron Electronics, 2014)

CONCLUSIONES

- Con el objetivo de diseñar un módulo de prácticas en protecciones eléctricas se realizó una introducción general a los sistemas de protección eléctrica en los SEP, lo cual amplió la visión y el conocimiento de los estudiantes que participaron en este trabajo.
- Si bien las tecnologías actuales están en continuo desarrollo, y es posible encontrar los sistemas de protección cada vez más integrados a otros sistemas de supervisión y control, se entiende que la fundamentación teórica es muy relevante al momento de participar en grupos de ajuste y comisionamiento final de este tipo de servicios.
- El investigar al respecto de los diferentes tipos de protección eléctrica permite una visión más integral y facilita el entendimiento de conceptos teóricos adquiridos durante el desarrollo de la carrera y afianza mucho más la confianza en lo técnico de los futuros profesionales del área eléctrica.
- Este módulo de prácticas en protecciones eléctricas será sin duda un gran apoyo en la asimilación de los conceptos de la materia y brindará dinamismo en la administración de la información facilitada a los estudiantes en la gestión de sistemas de potencia y sus tópicos generales de aplicación.
- En la amplia gama de líneas de profundización de la Ingeniería Eléctrica, el estudio de los sistemas de protección eléctrica es de gran importancia para aquellos profesionales que vean allí una oportunidad de desarrollo futuro.

- La aplicación de conocimientos, su profundización durante la investigación y materialización en equipos, documentos y/o sistemas al servicio de la IU Pascual Bravo redundarán seguramente en el nivel académico de la misma y permitirá hallar congruencia por toda la comunidad técnica docente y estudiantil, entre los diferentes temas propuestos a lo largo de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

ABB SPAJ. (2014). *ABB SPAJ 141 C - Control y protección de líneas (Protección y control de distribución)*. Obtenido de ABB SPAJ:

<http://www.abb.com/product/db0003db004281/c12573990068e57cc1256eb6002c2135.aspx>

ACJ High Voltage. (2014). *Transformadores de tensión*. Obtenido de ACJ High Voltage: <http://www.acj.com.co/images/imagesproductos/trafosmedida.jpg>

Agosto, P. (2014). *Tutorial IEEE de Protección de generadores síncronicos*.

Obtenido de IEEE:

<http://www.integrattech.com.ar/Tutorial%20IEEE%20Proteccion%20Generadores%20Espa%F1ol.pdf>.

Baigent, D., Adamiak, M., & Mackiewicz, R. (s.f.). *IEC 61850 Communication networks and Systems in substations*. Suiza: International Standards Association.

Beckwith Electric. (2010). *Ejemplo de relé multifuncional de generador*. Obtenido

de Beckwith Electric: <http://www.beckwithelectric.com/>

Blackburn, L. (1993). *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*.

Obtenido de Water Stones Marketplace:

<http://www.waterstonesmarketplace.com/Symmetrical-Components-for-Power-Systems-Engineering-J-Lewis-Blackburn/book/6501967>

Cmaps . (2014). *Transformador de Corriente* . Obtenido de Cmaps :
<http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1L6G53GT2-14JPB5R-1GZB/Transformador%20de%20corriente%20abb.png>

Egea, L. (2009). *Casos estudios típicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica* . Obtenido de Universidad Nacional :
http://www.bdigital.unal.edu.co/800/1/1036607998_2009.pdf

Elmore, W. (2004). *Protective Relaying, Theory and Application*. Obtenido de Google Books : <http://books.google.com.co/books?id=1JqhpdrhoUC&pg=PA411&lpg=PA411&dq=Protective+Relaying,+Theory+and+Application,+ABB+Relay+Division,+Coral+Springs&source=bl&ots=mbMlrprsto&sig=cZ9r7ZryKEZRazlyx45WNVDTK7E&hl=es-419&sa=X&ei=hUZEVlaGLMvKggSuvoKICQ&ved=0CC>

Gómez, D. (2012). *Capítulo IV: Análisis de corto circuito*. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/801/A7.pdf?sequence=7>

IEEE Standards Association. (2014). *ANSI/IEEE C37.102-1986, "IEEE Guide for AC Generator Protection."*. Obtenido de IEEE Standards Association:
http://resourcecenter.ieee-pes.org/files/2013/10/TP102_Full_Content.pdf

Ingeniería Especializada. (20 de Mayo de 2009). *Curso de protecciones eléctricas*. Obtenido de Ingeniería Especializada:
<http://www.ieb.com.co/CURSO%20CARTAGENA%20MAYO%2020,%2021%20Y%2022.pdf>

Instaladores . (2014). *Módulo bastidor vertical multimodular* . Obtenido de Instaladores :
<http://www.instaladoresdetelecomhoy.com/imagenes/2012/10/Rack-modular.jpg>

Institución Universitaria Pascual Bravo. (25 de Septiembre de 2009). *Programa Ingeniería Eléctrica*. Obtenido de Institución Universitaria Pascual Bravo:
<http://www.pascualbravo.edu.co/ingenieria/index.php/programas/profesionales/ingenieriaelectrica>

Institución Universitaria Pascual Bravo. (10 de Octubre de 2014). *¿Quiénes Somos? Historia*. Obtenido de Institución Universitaria Pascual Bravo:
<http://www.pascualbravo.edu.co/index.php/lainstitucion/quienes-somos/historia>

International Electrotechnical Commission. (2011). *Instrument transformers - Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers*. Obtenido de International Standard IEC 61869-3-5 Instrument Transformers- Additional requirements for inductive and capacitor voltage transformers Edition, x 1.0 2011-07, página 13.

International Electrotechnical Commission. (2002). *IEC standard voltages*. Obtenido de International Standard Commission: <http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1L6G6428L-XZ32Y6-1H9G/iec60038.pdf>

International Electrotechnical Commission. (2002). International Standard IEC 60038 Standard Voltajes. Suiza: International Electrotechnical Commission.

International Electrotechnical Commission. (2011). IEC 61869-3:2011 Instrument Transformers additional requirements for inductive and capacitor voltage transformers. Suiza : International Electrotechnical Commission.

Mason, R. (2014). *The art & Science of protective relaying*. Obtenido de Digital Energy: <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/notes/artsci/artsci.pdf>

Montané, P. (1993). *Protecciones en las Instalaciones eléctricas-Evolucion y perspectivas*. Obtenido de Biblioteca PDF : <http://www.biblioteca-pdf.com/2012/09/protecciones-en-las-instalaciones.html>

Mujal, R. (2002). *Proteccion de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Obtenido de

Google

Books:

[http://books.google.com.co/books?id=NJ0_qDplgykC&pg=PA196&lpg=PA196&dq=protecci%C3%B3n+de+sistemas+el%C3%A9ctricos+de+potencia+\(mujal\)&source=bl&ots=t-D0T97zSZ&sig=bp74vBS8kWgx3nY_PBrC-lUb5bo&hl=es-419&sa=X&ei=vEVEVJeUKpHPggSUIYDQBA&ved=0CDQQ6AEwAw#v=onep](http://books.google.com.co/books?id=NJ0_qDplgykC&pg=PA196&lpg=PA196&dq=protecci%C3%B3n+de+sistemas+el%C3%A9ctricos+de+potencia+(mujal)&source=bl&ots=t-D0T97zSZ&sig=bp74vBS8kWgx3nY_PBrC-lUb5bo&hl=es-419&sa=X&ei=vEVEVJeUKpHPggSUIYDQBA&ved=0CDQQ6AEwAw#v=onep)

Omicron. (2012). *International Standard IEC 61869-2 Instrument Transformers- Additional requeriments for current transformers Edition , x 1.0 2012-09*.

Obtenido

de

Omicron

:

https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/literature/CTA-Standard-Guide-ENU.pdf

Omicron Electronics. (2014). *Equipo de inyección de relés*. Obtenido de Omicron

Electronics:

<https://www.omicron.at/es/products/all/secondary-testing-calibration/cms-156/>

Procobres. (2014). *Curso sobre protecciones eléctricas*. Obtenido de Procobres:

<http://procobre.org/es/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=150>.

Schneider Electric. (2014). *Descripción de los números ANSI/IEEE*. Obtenido de

Schneider Electric: [http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER ELECTRIC/content/live/FAQS/34000/FA34639/es_ES](http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/34000/FA34639/es_ES)

Villegas, G. (2014). *Protección de sistemas eléctricos de potencia*. Obtenido de

Slideshare: <http://es.slideshare.net/martinmt/grifaldo-investigacion>

Weedy, B. (1982). *Sistemas eléctricos de gran potencia*. Obtenido de Google

Books:

<http://books.google.com.co/books?id=0Z1Dnf0PuCQC&printsec=frontcover&dq=Sistemas+el%C3%A9ctricos+de+gran+potencia+WEEEDY&hl=es-419&sa=X&ei=XEdEVOC6B9HHgWTghoHoDA&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=Sistemas%20el%C3%A9ctricos%20de%20gran%20potencia%20WEEEDY&f=false>