



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

EXPERIENCIA DOCENTE DE PROTECCIONES PARA UNA MICRO-RED BASADA
EN EL ESTUDIO DE FUNCIONES DE SOBRE CORRIENTE Y BAJA TENSIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

PABLO ERNESTO GONZÁLEZ INOSTROZA

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GUILLERMO JIMÉNEZ ESTÉVEZ
OSCAR NÚÑEZ MATA

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: PABLO ERNESTO GONZÁLEZ INOSTROZA
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: PATRICIO MENDOZA ARAYA

EXPERIENCIA DOCENTE DE PROTECCIONES PARA UNA MICRO-RED BASADA EN EL ESTUDIO DE FUNCIONES DE SOBRE CORRIENTE Y BAJA TENSIÓN

Las micro-redes se han presentado como un tema de gran interés en la comunidad científica producto de la capacidad que tienen éstas de romper con los paradigmas tradicionales de generación, en donde logran incorporar diversas tecnologías de generación en las cercanías de la demanda. Esto se conoce como generación distribuida. Lo anterior permite a pequeños centros de consumo tener la posibilidad de autoabastecerse, además de tener la capacidad de autogestión e independencia de un ente centralizado. En este mismo contexto, las micro-redes permiten a zonas completamente aisladas tener acceso a la energía, sin la necesidad de depender de una expansión de la transmisión para tener un punto de inyección. Durante los últimos años se ha hecho una gran cantidad de investigación respecto a los desafíos y problemáticas de este tipo de redes y las soluciones que se plantean. Dichos desafíos han generado cambios en la concepción de los esquemas que pueden conformar una micro-red, a diferencia de los sistemas eléctricos convencionales. Estos cambios han priorizado los esquemas de control, pero en años recientes, los esquemas de protección se han instaurado como un tema de importancia producto de la constante expansión y actualización que sufren los sistemas eléctricos.

El objetivo de esta memoria, es la implementación de una novedosa experiencia de laboratorio dirigida al estudio de nuevos esquemas de protección aplicados en sistemas de potencia con generación distribuida y micro-redes. La meta de la experiencia, es el de contribuir al perfil de egreso de los estudiantes a partir de la comprensión y análisis de las nuevas dificultades presentadas en el área de protecciones y sus posibles soluciones. Lo anterior, generado a partir de un enfoque práctico. En este contexto, la metodología propuesta para la creación de la experiencia permitirá a los alumnos evaluar la experiencia y poder incluir posibles mejoras a ésta a partir de una encuesta.

Los resultados obtenidos a partir de las encuestas realizadas en las actividades demuestran que, tomando en consideración la opinión de los alumnos y su evaluación de la experiencia, hubo un aumento en cada uno de los ítemes señalados, logrando ponderaciones superiores a 4 en la segunda experiencia en una escala de Likert de 1 a 5. En este mismo contexto, se valida la encuesta y sus resultados a través del coeficiente alfa de Crobach, obteniendo los dos niveles más altos que se pueden obtener a partir del criterio utilizado por los autores George y Mallery. De esta forma, se presenta una metodología capaz de ser replicada para la creación de otra experiencia práctica y se crea una novedosa experiencia que refuerza las capacidades de los alumnos en temáticas de protección.

*A ti que me diste tu vida, tu amor y tu espacio
A ti que cargaste en tu vientre dolor y cansancio
A ti que peleaste con uñas y dientes
Valiente en tu casa y en cualquier lugar
A ti te dedico mis versos, mi ser, mis victorias
A ti mis respetos señora
A ti luchadora incansable
A ti mi amiga constante, de todas las horas
Tu nombre es un nombre común, como las margaritas
Y para no hacer tanto alarde
Esta mujer de quien hablo
Su nombre es mi madre*

Para Verónica.

Agradecimientos

Al entrar a esta facultad lo primero que pensé es cómo serían mis compañeros de sección, y ya el día de inducción me di cuenta que serían muy buenos años. A Goza, Migue, Chinoy, Javi, Lucas, Gonzu, Claudio, Tomi, Gustavo, JP, Jasone, Patoco, Belén, Isi y muchos más, gracias por ser un gran grupo humano. A pesar de no tener mucho tiempo, para mí siempre es un agrado compartir minutos con ustedes un día viernes o donde caiga la ocasión.

En mis dudas de qué sería mi vida en un futuro, me decidí por ingresar al DIE (sigla muy esperanzadora). Aquí mi círculo de amigos se agrandaría, conocería tardes y noches completas de estudio e incluso una que otra pijamada por tener el talento de dejar las cosas a última hora. Rochita, Sebita, Cristian, Nico y Simón, ustedes me apañaron en el inicio de eléctrica y eso no lo olvidaré nunca, gracias por todo el apañe y el impulso. Jaimillo, Negro, Lalito, Chamas, Dieguito, Ivan, Tito, Anto, Rafita y NicoMi, gracias por enseñarme que no todo es estudio y ser un gran grupo de amigos. Una mención honrosa a Richi y Matiprimo por ser amigos leales en los mejores y peores tiempos y a Camila por ser una gran amiga y aguantar a este odioso. A todo el EnergyLab, a los más viejos que me acogieron y dieron un lugar único. Panchoke, Barre, Pelao, Giorgio, Chela, NicoCi, Mati y todos los que conformamos este gran grupo.

Agradecer a mis profesores que hicieron posible este trabajo. A Oscar por impulsarme a ir más allá de una simple memoria y confiar en mis capacidades, al profesor Jiménez que dio de su tiempo para mejorar y al profesor Mendoza quien aguantó infinitas preguntas, idas intempestivas a su oficina, que confió en mi trabajo en el laboratorio y que impulsó mi interés por la docencia gracias a este trabajo, pues fue usted quien me ofreció seguir esta memoria.

Y finalmente a dos personas especiales. A Javiera pollita por su infinita paciencia y amor, que ha sabido comprender y acompañarme en cada una de las metas que me impongo, que me impulsa a ser mejor persona y me espera con un abrazo al final del día. Y mi madre Verónica, que me enseñó con su ejemplo el significado de esfuerzo y sacrificio, pues no fue fácil criar sola a dos hijos, trabajar de 8 a 22 varios días a la semana y aún así tener energía para llegar a la casa a realizar labores de madre y asegurarse de que hubiéramos estudiado. Nunca nos ha faltado nada gracias a ti.

Agradecer los aportes de General Electric mediante las gestiones de Claudio Ogaz y de EEnergy, los aportes de ABB mediante las gestiones de Luis Figueroa y Luis Cid, así como los aportes de Schneider Electric mediante las gestiones de Alex Bustos. Agradecer también a los proyectos U-Inicia UI0010/15 y CONICYT/FONDAP/15110019 por el apoyo que han entregado a esta memoria de título.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	3
1.4. Estructura del trabajo	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Micro-red	4
2.1.1. Operación conectada a la red eléctrica interconectada	4
2.1.2. Operación aislada de la red interconectada	5
2.2. Protecciones eléctricas	6
2.2.1. Exigencias básicas de sistemas de protección	8
2.2.2. Dispositivos de protección	9
2.2.3. Coordinación de protecciones	13
2.3. Revisión de trabajos de laboratorio en protecciones	14
3. Metodología	16
3.1. Definición de objetivos	17
3.2. Análisis de equipos y fallas	18
3.3. Diseño de la experiencia	19
3.4. Implementación y pruebas	20
4. Implementación de la experiencia de laboratorio	22
4.1. Evaluación y ensayos de equipamiento eléctrico	22
4.1.1. Levantamiento micro-red	23
4.1.2. Familiarización de equipos de protección	24
4.1.3. Definición de funciones	25
4.1.4. Pruebas de funcionamiento para relé F35	28
4.1.5. Resultados de las pruebas de funcionamiento	32
5. Resultados de la aplicación de la experiencia de laboratorio	36
5.1. Primera aplicación	36
5.1.1. Resultados de la primera aplicación	37
5.1.2. Primera encuesta	38
5.2. Segunda aplicación	40

5.2.1. Resultados de la segunda aplicación	41
5.2.2. Segunda encuesta	42
5.3. Análisis resultados	44
6. Conclusiones	47
7. Bibliografía	49
8. Anexos	51
8.1. Manual Rele Multilin F35	51
8.2. Paper conferencia CHILECON	67
8.3. Encuesta	74
8.4. Guía primer semestre	77
8.5. Guía teórica segundo semestre	92
8.6. Guía práctica segundo semestre	103
8.7. Guía teórica final	124
8.8. Guía práctica final	137

Índice de Tablas

4.1. Comparación entre funciones de sobre corriente y baja tensión.	25
4.2. Parámetros utilizados en la prueba de sobre corriente.	33
4.3. Parámetros utilizados en la prueba de baja tensión.	33
5.1. Resultados de la sección II de la encuesta.	39
5.2. Resultados de la sección III de la encuesta.	40
5.3. Resultados de la sección II de la encuesta.	43
5.4. Resultados de la sección III de la encuesta.	43
5.5. Coeficiente alfa de Cronbach según secciones.	44

Índice de Ilustraciones

2.1. Esquema de una micro-red con sus componentes típicos.	5
2.2. Requerimientos fundamentales de un sistema eléctrico de potencia.	6
2.3. Fusible utilizado en aplicaciones de electrónica y electricidad básica.	9
2.4. Dispositivos termomagnéticos.	10
2.5. Dispositivo termomagnético con ajuste remoto.	10
2.6. Interruptor diferencial.	11
2.7. Pasos lógicos de un relé digital.	12
2.8. Coordinación para una red radial.	13
3.1. Metodología propuesta.	16
3.2. Ciclo de retroalimentación.	21
4.1. Topología micro-red presente en Laboratorio de Energía y Accionamientos.	23
4.2. Diagrama unilineal de las barras de la micro-red.	24
4.3. Portada del manual de instrucciones para relé universal F35.	24
4.4. Curva de sobre corriente típica.	27
4.5. Curva de baja tensión típica.	28
4.6. Diagrama lógico de la protección combinada.	30
4.7. Simulación RMS de las variables en conexión estrella y delta.	31
4.8. Oscilografía de las variables.	32
4.9. Reportes de falla.	33
4.10. Resultados de protección combinada.	34
4.11. Comportamiento variables en protección combinada durante conexión motor de inducción.	35
5.1. Primera guía confeccionada para experiencia de protecciones.	37
5.2. Alumnos durante primera experiencia de protecciones.	38
5.3. Guías preparadas para segunda experiencia.	41
5.4. Alumnos durante segunda experiencia de protecciones.	42
5.5. Resultados promediados según escala de Likert según encuesta.	46

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En la actualidad, las micro-redes se han presentado como uno de los temas de mayor discusión dentro de la comunidad científica, no tan solo a nivel teórico, sino que también a nivel práctico. Algunos de los atributos que caracterizan a este tipo de tecnología son por ejemplo, la capacidad que tienen de romper con los paradigmas tradicionales de generación de energía debido a la capacidad de incorporación, en donde los centros de generación no se encuentran alejados de los centros de consumo, ni es llevada a través de grandes líneas de transmisión. Además, la posibilidad de funcionar en forma aislada de los grandes sistemas de potencia, permitiendo el acceso a zonas completamente aisladas, la facilidad de inserción de energías renovables debido a los niveles de consumo menores que poseen, capacidad de autogestión y la independencia de una entidad centralizada, entre otras.

Sin embargo, grandes desafíos se han planteado desde su aparición, dentro de las que se destacan:

- Niveles de variabilidad de consumo y generación son más grandes que los de un sistema eléctrico de potencia convencional.
- Corrientes de corto circuito menores debido a gran cantidad de inversores.
- Tiempos de actuación de esquemas de desconexión automática de carga (EDAC) menores según el porcentaje de renovables en el sistema.
- Cambios en los paradigmas de protecciones debido a la presencia de flujos bidireccionales.
- Comunicación más rápida, segura y confiable.

Estos desafíos generan cambios en los esquemas que conforman la micro-red, en donde generalmente se ha priorizado a los esquemas de control. Lo anterior, ha generado que se deje de lado al área de protecciones. Así, con los avances de la electrónica de potencia y las telecomunicaciones, además de la inserción masiva de energías renovables no convencionales (ERNCC) a los sistemas eléctricos de potencia (SEP), los esquemas de protección se han vuelto

a instaurar como un tema de importancia e investigación producto de la constante expansión y actualización que sufren los SEP. En el marco anterior, la coordinación de protecciones dentro de una micro-red se ha vuelto una de las problemáticas más desafiantes producto de los bajos niveles de corrientes de cortocircuito y cambios significativos de topología durante su operación. Así, los esquemas de protección adaptativos han tomado fuerza dado la libertad de configuración que poseen y la libertad de elección de funciones de protección que se pueden instaurar en un mismo sistema.

Sin embargo, es necesario que se contextualicen dichas problemáticas actuales de los esquemas de protección dentro de los programas de ingeniería eléctrica, con el fin que estudiantes puedan adherir tanto problemáticas como soluciones a sus conocimientos. Para ello, es importante que los alumnos adquieran estos conocimientos no solo en forma teórica, sino que también de forma práctica, tal como menciona [4], ya que esto tendrá un mayor impacto en ellos. Lo anterior se explica producto de que la evaluación de un relé de protección a nivel de su operación en un sistema eléctrico únicamente mediante simulaciones computacionales es poco recomendado. Por lo tanto, en esta memoria se propone una metodología de trabajo que sea aplicable para la creación de diversas actividades de laboratorio, cuyo resultado final sera la creación de una novedosa experiencia docente para el estudio de protecciones en sistemas eléctricos con generación distribuida y micro-redes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Implementar una nueva experiencia en el laboratorio de energía y accionamientos, dirigida al estudio de nuevos esquemas de protección aplicados en sistemas eléctricos de potencia con generación distribuida (GD) y micro-redes. La finalidad de dicha experiencia, será la de contribuir al perfil de egreso aportando a las competencias de los estudiantes, basado en la comprensión de las nuevas dificultades que se presentan en este campo.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Proponer, desarrollar y aplicar una metodología de trabajo, que sea aplicable a diversas experiencias prácticas de laboratorio.
2. Proponer, desarrollar y evaluar un conjunto de experiencias iniciales de laboratorio, con el propósito de probar sistemas de protecciones en cursos de la malla curricular en las dependencias del Laboratorio de Energía y Accionamientos del DIE, Universidad de Chile.
3. Desarrollar una experiencia docente para el estudio de protecciones en sistemas eléctricos de potencia con GD y micro-redes enfocada a cursos de la malla curricular, basado en las alternativas evaluadas en el punto anterior.

1.3. Alcances

El siguiente trabajo tiene como finalidad dotar al Laboratorio de Energía y Accionamientos del DIE, Universidad de Chile, de la correcta configuración de los dispositivos de protección que se encuentran ubicados en la micro-red, con el fin de aportar con un modelo capaz de funcionar de forma flexible ante la recreación de una falla eléctrica y que sea un aporte significativo para el desarrollo docente.

A partir de este trabajo se desprenderá la creación de una experiencia docente que contribuya al perfil de egreso de la carrera, aportando a las competencias de los estudiantes. Lo anterior, se generará a través de la comprensión de las dificultades que se puedan encontrar en la configuración de los sistemas de protección y su teoría. Esto tomará lugar en un documento que posea una guía teórica, guía de estudio y guía con el paso a paso de la experiencia.

1.4. Estructura del trabajo

Este trabajo de memoria se presenta dividido en siete capítulos. Cada uno de los capítulos y temas que se abarcarán se presentan a continuación:

El primer capítulo corresponde a la introducción del tema de trabajo, en donde se presenta la motivación, el objetivo general, los objetivos específicos, los alcances de la memoria y la estructura que seguirá el presente informe.

El segundo capítulo presenta un marco teórico para comprender con mayor facilidad algunos términos que se utilizarán a lo largo dentro del informe. Se describen las micro-redes desde un punto de vista eléctrico y sistémico, para seguir con una explicación de los principios que rigen a un esquema de protección y los dispositivos más usados.

El capítulo tres presenta la metodología propuesta y las etapas que lo componen. A partir de ésta, se establecen los pasos de trabajo a seguir para el desarrollo del trabajo de memoria.

El capítulo cuatro trata la implementación de la experiencia de laboratorio. Se divide en secciones de trabajo que van desde la familiarización de los distintos dispositivos a utilizar, hasta los resultados de las pruebas de funcionamiento para medir la factibilidad de la experiencia.

En el quinto capítulo se exponen los resultados de las experiencias con los alumnos, en donde se analiza la evaluación de los alumnos hacia la actividad a partir de la realización de encuestas.

Las conclusiones del trabajo de memoria están contenidas en el sexto capítulo, en conjunto con la sección de trabajo futuro.

Finalmente, en el séptimo capítulo se listan las referencias bibliográficas utilizadas en la memoria.

Capítulo 2

Marco Teórico

En esta sección se realiza una descripción de los conceptos teóricos asociados a la temática del trabajo expuesto, con el fin de lograr un entendimiento del proceso de trabajo realizado. Además, se presenta una pequeña sección con el estado del arte en temáticas de laboratorio, los cuales son enfocados en temas de protecciones y micro-redes.

2.1. Micro-red

El concepto de micro-red puede ser definido según [2] como un sistema eléctrico auto-contenido, que incluye fuentes de generación distribuida a través interfaz de electrónica de potencia, en conjunto con máquinas rotatorias y cargas, formando un sistema controlable. Desde un punto de vista operacional, una micro-red puede operar en dos modos: conectada o aislada de la red eléctrica interconectada.

2.1.1. Operación conectada a la red eléctrica interconectada

En este modo de operación, la micro-red se encuentra directamente conectada a una red principal mediante el punto de acoplamiento común (PCC por sus siglas en inglés de “Point of Common Couplin”, tal como se observa en la figura 2.1. En este caso, la red principal cumple el rol de suplir las variaciones de demanda e imponer la frecuencia al sistema, actuando como el principal regulador. Además, el PCC es capaz de soportar flujos bidireccionales, en donde se tienen tres casos posibles:

- La micro-red se comporta como un pequeño medio de generación, siendo no solamente capaz de suplir la demanda a su interior, sino que también es capaz de entregar a la red parte de su generación.
- La micro-red no es capaz de suplir en totalidad su demanda, por lo que importa energía desde la red principal para ello.

- No existe flujo de potencia por el PCC producto de que se alcanza el equilibrio entre demanda y generación dentro de la micro-red.

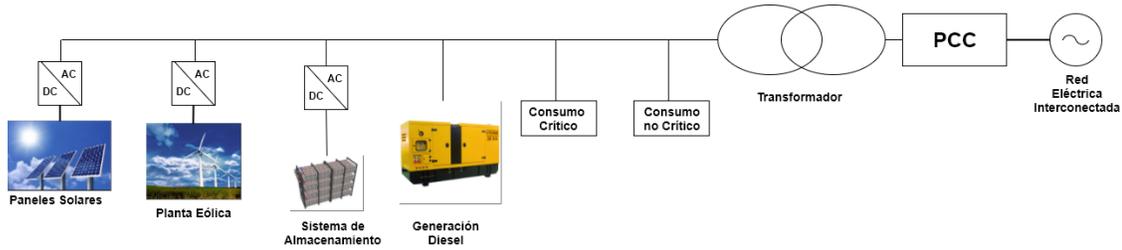


Figura 2.1: Esquema de una micro-red con sus componentes típicos.

2.1.2. Operación aislada de la red interconectada

Este modo de operación también se conoce como “modo isla” y se caracteriza porque la micro-red se encuentra en forma desconectada de la red principal. Un caso particular, es cuando ésta se encuentra permanentemente desconectada, por lo que la micro-red debe satisfacer de forma autónoma su demanda eléctrica en forma segura, confiable y con la calidad requerida.

En caso de fallas de cortocircuito, son las unidades de generación distribuida las que se encargan regular el desequilibrio entre carga y generación, suministrando la potencia requerida. En este contexto, es necesario destacar que en caso de encontrarse la micro-red en forma aislada de una red principal y al tener una menor cantidad de unidades de generación convencional que aporten con corriente de falla, las sobre corrientes que se producen son altas y las caídas de tensión son más profundas. Además, aquellas unidades de generación ERNC que se encuentren presentes en una micro-red, se encontrarán conectadas a través de convertidores, cuya electrónica de potencia limita la cantidad de corriente de falla que este tipo de tecnologías son capaces de aportar. Lo anterior a diferencia de las unidades convencionales, que durante una cierta fracción de tiempo pueden superar por varias veces su corriente nominal.

2.2. Protecciones eléctricas

Según la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), se define a las protecciones como todo dispositivo destinado a desenergizar un sistema, circuito o artefacto, cuando en ellos se alteran las condiciones normales de funcionamiento [19]. Aunque en el sentido amplio de la palabra, también se puede definir el concepto de protección como el conjunto de equipos necesarios para la detección y eliminación de los incidentes en los sistemas o instalaciones eléctricas [18].

La operación de un SEP requiere el cumplimiento de cuatro requerimientos fundamentales:

1. **Economía:** Uno de los principales desafíos que debe cumplir el organismo regulador del sistema eléctrico, es el de satisfacer la demanda a mínimo costo.
2. **Seguridad:** Un sistema eléctrico debe ser capaz de soportar diversas contingencias manteniendo los índices de calidad.
3. **Suficiencia:** El suministro eléctrico debe ser entregado con un número razonable de interrupciones, las cuales son definidas por la norma técnica de seguridad y calidad de servicio de cada país.
4. **Calidad:** Las variables del sistema deben mantenerse dentro los estándares de calidad establecidos por la norma técnica de cada país.

La figura 2.2 muestra los requerimientos fundamentales dentro de un sistema eléctrico de potencia, donde el requerimiento de seguridad está relacionado de manera directa con el sistema de protección de un SEP.

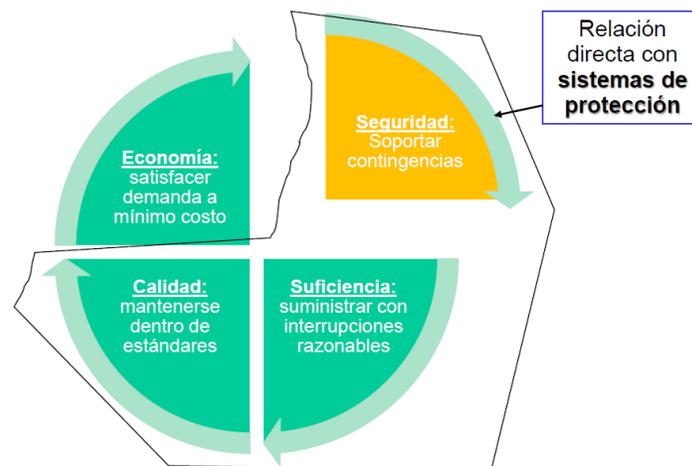


Figura 2.2: Requerimientos fundamentales de un sistema eléctrico de potencia.

Un requerimiento general dentro de un sistema eléctrico de potencia es el de salvaguardar el sistema con el fin de mantener la continuidad de servicio, minimizar daños y pérdidas en el caso de fallas, junto con asegurar la seguridad de las personas. Lo anterior se logra con:

- Detección temprana de fallas y anomalías, a través de la pronta remoción del equipo o zona fallada, donde la falla debe eliminarse en el menor tiempo posible.

- Identificando y aislando los componentes fallados del sistema para garantizar a la mayor cantidad de consumidores posible el servicio. En otras palabras, se debe aislar la zona más pequeña posible.
- El dispositivo de protección más cercano a la falla debe operar primero. En caso de no ser activado, los dispositivos más alejados deben actuar. Lo anterior, implica una correcta coordinación de los dispositivos presentes en el sistema.

Es necesario destacar una sutil diferencia entre lo que se entiende por un sistema de protección y un esquema de protección:

- Esquema de protección: Es la estrategia que se sigue para la selección de los tipos de dispositivos de protección, su disposición en la red y los ajustes necesarios. Se busca cumplir los requisitos establecidos según algún criterio. Entre los más comunes se encuentran: rapidez, selectividad, coordinación y confiabilidad.
- Sistema de protección: Es todo el conjunto de partes constitutivas, incluyendo los dispositivos, la red de comunicación, el sistema experto para el ajuste en línea y el esquema de protección.

2.2.1. Exigencias básicas de sistemas de protección

La protección ideal sería aquella que actuará frente a diversas anormalidades que se presenten en el sistema eléctrico, en el menor tiempo posible y su inversión implique el menor costo posible. Debido a que esto no es posible conseguirlo en la mayoría de los casos, generalmente se valoran diversos aspectos:

1. Seguridad: La probabilidad de no actuación de un sistema o componente cuando no debe hacerlo.
2. Confiabilidad: La probabilidad de actuación de un sistema o componente cuando debe hacerlo.
3. Fiabilidad: La probabilidad de que un sistema o componente actúe única y exclusivamente cuando debe hacerlo. Es producto de la seguridad y confiabilidad.
4. Precisión: La respuesta que tiene el sistema a los valores de entrada.
5. Rapidez: El tiempo invertido desde la aparición del incidente hasta el momento en que cierra sus contactos el relé. El aumento de rapidez implica una disminución en la fiabilidad.
6. Flexibilidad: Capacidad de la protección para adaptarse a cambios funcionales.
7. Simplicidad: En lo que concierne al diseño, se refiere a reducir al mínimo el número de funciones e interacciones.
8. Mantenimiento: Reducción al mínimo de piezas sujetas a desgaste, evitando el mantenimiento periódico.
9. Facilidades de prueba: Se otorga valor agregado a que el equipo tenga incorporado dispositivos que faciliten su verificación, sin que sea necesario desconectar ningún conductor para realizar las pruebas.
10. Autodiagnóstico: Inclusión de funciones de auto verificación en la protección. Esta ventaja la presentan las protecciones digitales.
11. Modularidad: Las protecciones montadas en módulos facilitan la localización y reparación de averías.
12. Economía: Hacer todo lo anterior al menor costo.

Dentro de las anormalidades que pueden sufrir los sistemas eléctricos de potencia son:

- Fallas: Corresponde a un daño inminente para los equipos, personas o inclusive para el sistema (puede llevar a inestabilidad y efectos cascadas). Su tiempo de acción es crítico y generalmente son menores a 1 segundo, en donde la respuesta automática debe ser la desconexión de parte del sistema eléctrico
- Perturbaciones: Corresponde a un potencial daño que puede llevar en el mediano o largo plazo a una falla. Su tiempo de acción no es crítico y se busca el mejoramiento a partir de una acción correctiva. Algunos ejemplos de perturbaciones son: sobrecargas, desequilibrios, calentamientos, sobretensiones moderadas, etc.

2.2.2. Dispositivos de protección

A continuación, se presentarán los dispositivos de protección más utilizados en la industria, en conjunto con una breve explicación de su funcionamiento.

Fusible

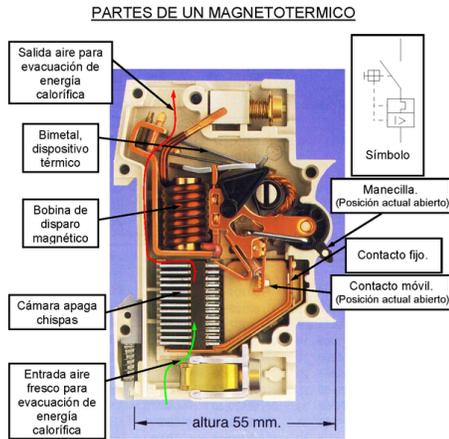
Es el método de protección más antiguo y que sigue siendo utilizado en la actualidad. Su principio de activación se basa en el incremento de temperatura que sufre el hilo conductor (imagen 2.3) al ser atravesado por un determinado flujo de corriente. El material conductor se calibra de tal manera que se funde cuando la corriente alcanza un nivel predeterminado. Algunas de sus principales desventajas son: baja precisión, bajo poder de corte, rápido envejecimiento. Aunque, por otro lado, tiene una rápida actuación (del orden de los 5 [ms]), reduciendo por lo tanto las oscilaciones térmicas y dinámica de los circuitos.



Figura 2.3: Fusible utilizado en aplicaciones de electrónica y electricidad básica.

Interruptor termomagnético

También conocido como disyuntor (imagen 2.4). Su activación puede ser realizada por acción térmica, o bien, acción magnética. El primer fenómeno tiene su origen en una lámina bimetalica (dos metales con distinta composición), que al calentarse producto del paso de la corriente, sufre una deformación que provoca el accionamiento mecánico de apertura del contacto. Esta protección tiene la función de encargarse de las sobre corrientes de pocas veces el nivel nominal (1 a 3 veces). Por otro lado, el segundo fenómeno tiene su origen en una bobina (electroimán), en donde al circular una determinada corriente produce un campo magnético que atrae al núcleo en su interior. Así, sobrepasando un cierto límite de corriente, se atrae completamente el núcleo, accionando en forma mecánica la apertura. Esta protección tiene la función de encargarse de las sobre corrientes de varias veces el valor nominal (3 a 10 veces), y su rapidez tiene el orden de 25 milésimas de segundos.



(a) Composición.



(b) Monofásico y trifásico.

Figura 2.4: Dispositivos termomagnéticos.

Hay que destacar que el dispositivo presentado anteriormente en la figura 2.4 corresponde a uno de ajuste manual. Hoy en día se pueden encontrar en el mercado dispositivos termomagnéticos con ajuste remoto tal como se presenta en la figura 2.5. Este tipo de dispositivos tiene la cualidad de acceder a ajustes de parámetros de curva en forma remota a través de la red de comunicación.



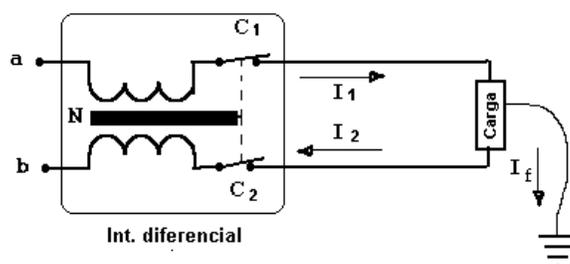
Figura 2.5: Dispositivo termomagnético con ajuste remoto.

Interruptor diferencial

También conocido como dispositivo diferencial residual (imagen 2.6). Su activación se realiza cuando existe una falla a tierra. El principio que rige esta protección corresponde a la ley de Kirchhoff, la cual plantea que la suma vectorial de las corrientes presentes en un circuito (entrando o saliendo) debe ser igual a cero. Lo anterior ocurre siempre en condiciones normales de funcionamiento, pero en caso de existir una falla a tierra, esta ley no se cumple pues parte de la corriente que entra al circuito es liberada a tierra tras generarse un camino que guía a la corriente hacia ella. Esto genera que la corriente de entrada difiera de la corriente de salida, implicando que los campos magnéticos de ambas corrientes sean distintos, provocando una fuerza de atracción sobre el núcleo de la protección y activando por consecuencia la apertura del contactor.



(a) Composición diferencial.



(b) Esquema funcionamiento.

Figura 2.6: Interruptor diferencial.

Relés y dispositivos digitales de protección

Desde la aparición de los primeros microprocesadores grandes avances se han realizado en el campo de la energía, en donde los sistemas de protección no se han quedado atrás. Fabricantes han utilizado esta tecnología en conjunto con los adelantos en las tecnologías de comunicación para crear estos nuevos equipos. Este tipo de dispositivos tienen la posibilidad de ajustarse y leer de manera remota las variables del sistema por medio de la red de comunicación, que enlaza los diversos dispositivos presentes por medio de diversos protocolos de comunicación.

El esquema de bloques lógicos que utiliza un relé digital es la que se muestra en la figura 2.7, en donde cabe destacar que dentro del bloque “utilización de datos” es donde el relé digital utiliza las funciones definidas, entre las que destaca:

- Funciones de protección de sobre corriente de tiempo inverso y tiempo definido (instantánea) por fase, por neutro, secuencia negativa y tierra.
- Funciones de protección de baja tensión de tiempo inverso y tiempo definido (instantánea) por fase.
- Función de sobre voltaje por fase y neutro.
- Protección térmica por sobre carga.
- Protección de alta y baja frecuencia.

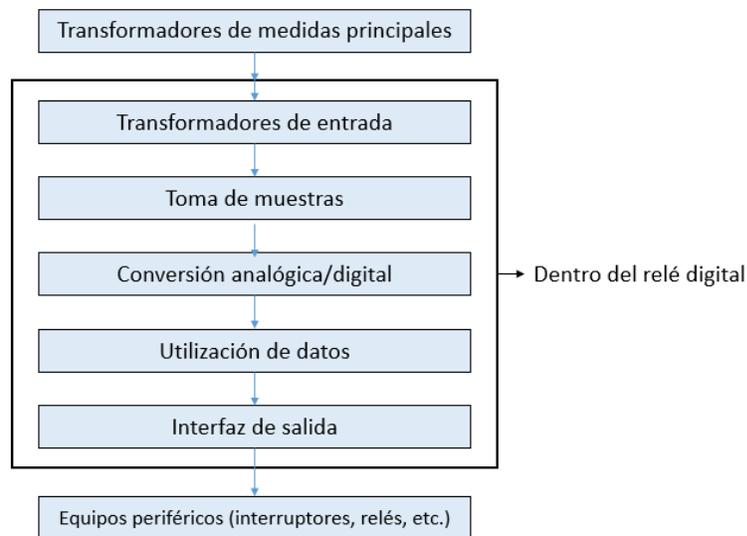


Figura 2.7: Pasos lógicos de un relé digital.

2.2.3. Coordinación de protecciones

Cuando se habla de coordinación de protecciones, se refiere al problema de determinar la secuencia de operación para cada posible localización de una falla, donde la zona fallada debe ser aislada con suficiente margen y sin excesivo retardo de tiempo. La idea que se persigue en la coordinación consiste en delimitar la falla al área mas reducida posible, por lo cual la protección que esté más próxima al punto de falla debe operar primero. En caso de que por alguna razón no logre su accionamiento, la protección que sigue debe hacerlo (siempre la protección más cercana). Cabe destacar que la secuencia seleccionada en cualquier sistema eléctrico depende de la topología de la red (sistema enmallado, radial, anillo, etc.), la característica de los relés (por ejemplo, cuántos puntos puede observar, si necesita comunicación con otro dispositivo, etc.), y la filosofía que persigue el sistema de protección.

En la figura 2.8 se aprecia una red con topología radial, en donde la curva de color rojo representa los tiempos de activación de las protecciones (eje y), y las rectas horizontales superiores representan la parte del sistema que puede llegar a desconectar la protección en caso de activación (eje x). Por ejemplo, si una falla se presenta en la zona protección de R1 y, si por algún motivo, ésta no se activa en el tiempo para R1, la protección R2 aguas arriba debe reaccionar frente a esto y desconectar la parte del sistema que está bajo su vigilancia, con una diferencia de tiempo denominado CTI (intervalo de coordinación).

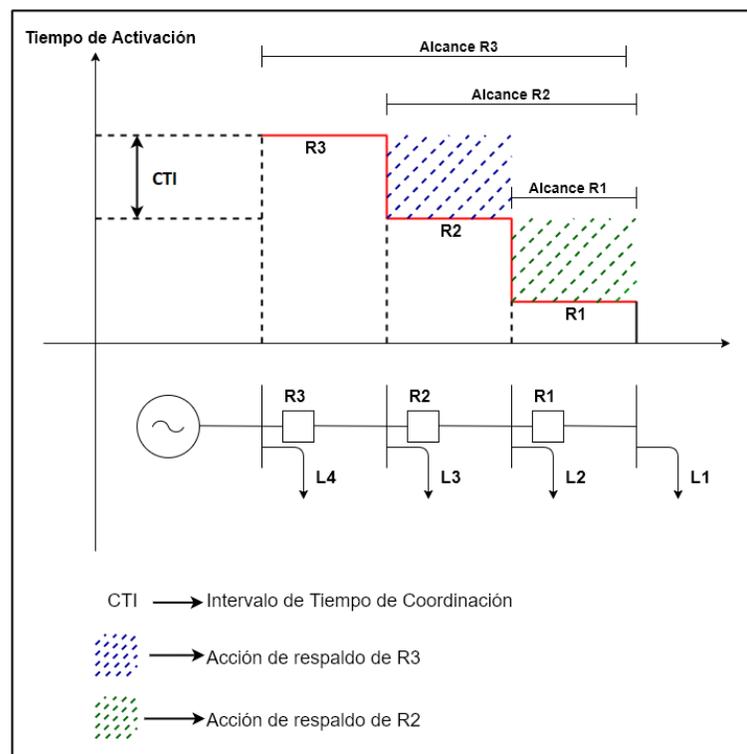


Figura 2.8: Coordinación para una red radial.

2.3. Revisión de trabajos de laboratorio en protecciones

En la literatura es posible encontrar distintas prácticas de laboratorio, dentro de las cuales algunas buscan validar en forma práctica diversos aspectos. Dentro de estos, las temáticas de micro-redes, redes inteligentes, generación distribuida y energías renovables se han vuelto populares en universidades de todo el mundo. Lo anterior, puesto que dichos tópicos han aumentado su necesidad de incorporación a los 4 años típicos de duración que poseen las carreras de ingeniería eléctrica. Además, históricamente los laboratorios han sido de gran importancia dentro de la carrera para el estudio de las problemáticas que acarrearán los sistemas eléctricos de potencia. [8].

Es así como variados trabajos presentan los pasos y dificultades para generar un laboratorio compuesto de una micro-red y generación distribuida, sus componentes de control y medida. Por ejemplo, en [9] se presenta la construcción de una micro-red monofásica que incluye dos simuladores de generación de energía fotovoltaica y eólica, los cuales son creados a partir de fuentes de voltaje DC conectados a la red a partir de inversores. Además, se implementa un sistema de almacenamiento para regular el balance de energía. A pesar de no tener la generación en forma real, este tipo de laboratorios presenta una novedosa forma de acercar al estudiante a lo que son las estrategias de control para la generación distribuida.

En el mismo contexto anterior, en [10] se presenta la construcción en Australia de un laboratorio especificado para una micro-red. La instalación considera tres tipos de tecnologías fotovoltaicas, dos tipos de energía eólica, tres tipos de baterías y un banco de carga programable. Los experimentos que se realizan dentro de este punto se presentan para investigar las problemáticas de la inclusión de generación distribuida, incluyendo tecnología ERNC dentro de la red eléctrica. Este tipo de instalaciones pueden llegar a ser altamente provechosas si, dentro de las finalidades que se imponen, está el de implementar cursos prácticos sobre micro-redes.

Dentro de esta temática, incluso antiguos laboratorios de máquinas son remodelados para funcionar como una red que tenga incluida una micro-red, esto con fines educativos tal como se presenta en [8]. En dicho trabajo, dos de las seis máquinas síncronas presentes en ese laboratorio fueron transformadas para recrear lo que son unidades de generación distribuida en una micro-red. Así, los estudiantes son capaces de experimentar lo que es el control de tensión y frecuencia cuando se tienen estas unidades en modo isla.

En el contexto anterior, es claro el creciente esfuerzo que se ha hecho por universidades de todo el mundo para implementar estudios en las temáticas presentadas, en donde se hacen presente los nuevos desafíos que enfrentan los SEP en variados campos como el económico, social, ambiental y técnico [11]. Por ejemplo, en este último se reconocen una serie de temas por resolver relacionados con los sistemas de protección, entre otros aspectos por la inclusión de unidades de generación distribuida y micro-redes, en donde uno de los mayores desafíos asociados a los sistemas de protección en micro-redes es el de la configuración de una estrategia que sea efectiva tanto para un estado conectado a la red como en operación en modo isla. Es así como en [12] se presenta una recopilación de las técnicas de protección disponibles para enfrentar las diversas problemáticas asociadas a ambos tipos de conexión.

En [1] se reconoce la importancia del estudio de protecciones en los programas de ingeniería eléctrica, puesto que el hecho de adquirir conocimientos por medio de experiencias prácticas tendrá un mayor impacto en los estudiantes. Así, también se explica que la evaluación de un relé de protección únicamente a partir de simulaciones es poco recomendado. A pesar de esto, muchos centros universitarios deben lidiar con la limitación de limitación del equipamiento adecuado. Es así como en [13] se menciona la importancia de la cooperación entre las empresas privadas y universidades, como una alternativa para dotar a estas últimas de los equipos necesarios que deben ser utilizados en cursos de protección de SEP.

El “Power System Relaying Committee (PSRC)” de la IEEE recomienda que los cursos de protecciones de sistemas eléctricos de potencia deberían consistir en lecturas estándar, sesiones de laboratorio y tareas a partir de simulación. En [14] se presenta actividades en esta temática para motivar la participación de estudiantes. Las actividades presentadas corresponden a simulaciones con diversas funciones de protección en softwares como ETAP y PSCAD, además de actividades prácticas en donde se verifique el desempeño en forma concreta de diversos relés de protección. Los mayores logros que se obtuvieron de este trabajo fue dentro de la observación e interacción que realizaron los estudiantes en las experiencias prácticas, en donde la retroalimentación entregada por éstos indican que el objetivo de lograr una mayor satisfacción y participación de los estudiantes fue alcanzado. Es importante destacar la importancia que se le da la opinión de los estudiantes para lograr medir la satisfacción de estos, en donde tomar en consideración la opinión de los estudiantes para lograr mejoras en la práctica y teoría de los cursos puede llegar a ser una fuerte herramienta de retroalimentación para implementar mejoras futuras en cursos del área.

A nivel nacional, universidades como la Universidad Federico Santa María, Universidad de Santiago de Chile, Universidad del Bio-bio y Universidad de Concepción poseen dentro de sus mallas curriculares cursos con temáticas de protecciones y laboratorios con actividades prácticas, pero es necesario acomodar estas prácticas que se basan en análisis y configuración de relés de protección a las tecnologías actuales que van surgiendo en el campo profesional. Es así como en [15] y [16] se enfatiza la necesidad de abordar los temas modernos de los sistemas eléctricos, los cuales están cada vez más ligados a infraestructura de comunicaciones y tecnologías de información para crear redes cuya operación sea accionada de forma más inteligente. Con el paso del tiempo, serán menos los dispositivos de protección que posean una operación aislada y autónoma, dando paso a sistemas protección conectados en un constante monitoreo y comunicación, que otorguen una mayor flexibilidad al sistema eléctrico. Así, a medida que se introduzcan nuevos equipos, los sistemas de protección, control y operación se integrarán cada vez más, logrando conectarse no solamente con el centro de control, sino también entre ellos en forma bidireccional.

A partir del contexto anterior, es que se produce que en la actualidad se sugiera la incorporación del tema de redes de comunicación, control y monitoreo de dispositivos dentro de las experiencias de laboratorio. Además, en [17] se recomienda que, dentro de las actividades incluidas en las prácticas de protecciones, se utilicen distintos recursos computacionales para el análisis de los eventos, con el fin de que existan distintos medios de visualización de las condiciones anormales evaluadas.

Capítulo 3

Metodología

En esta sección se presenta la metodología propuesta para la creación de una experiencia práctica docente, la cual puede ser aplicada a distintos ramos. Se explicarán las etapas que lo componen, así como las subsecciones que conforman dichas etapas. Además, se realiza una breve explicación de la metodología desde un punto de vista de la experiencia de laboratorio en temáticas de protecciones.

De acuerdo a la revisión de trabajos de laboratorio en protecciones presentado en la sección 2.3 y sumado a los nuevos requerimientos en los esquemas de protección producto de la presencia de nuevas fuentes de generación distribuida en la redes eléctricas y los desafíos que presentan las micro-redes en esta área, se propone la metodología presentada en la figura 3.1, en donde se ha dividido el trabajo en cuatro etapas con sus respectivas subsecciones. Esta metodología fue propuesta para el laboratorio de protecciones que se presentará a continuación, pero ésta puede ser utilizada en cualquier propuesta de laboratorio e incluso en otro tipo de actividad.

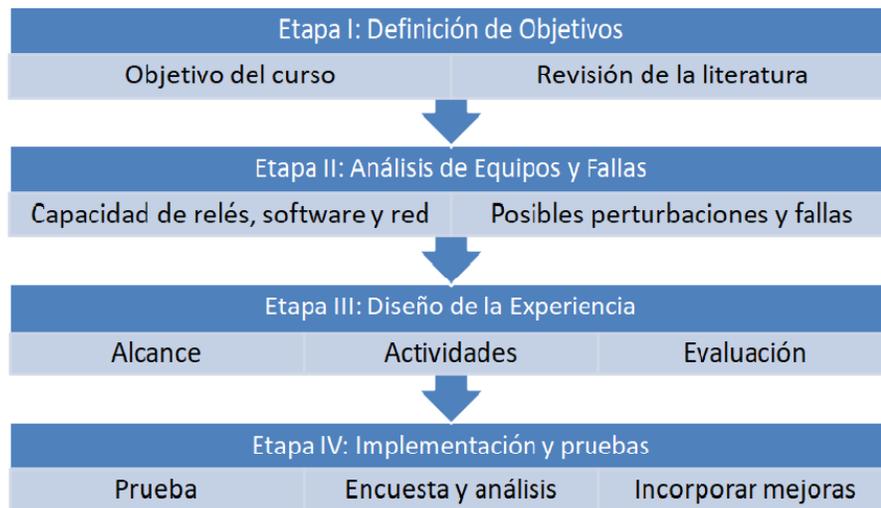


Figura 3.1: Metodología propuesta.

A continuación, se explicarán cada una de las etapas que conforman la metodología propuesta, detallando el trabajo a realizar en cada una de las subsecciones en forma general y para el caso de estudio.

3.1. Definición de objetivos

La etapa inicial del trabajo consiste en definir el objetivo que se desea conseguir, es decir, hacia donde quiere apuntar la experiencia docente a crear. Para ello, es necesario seguir dos pasos fundamentales que se complementan entre sí, los cuales son los objetivos del curso y una revisión de la literatura adecuada para este.

Objetivo del curso

Lo más importante dentro de esta etapa, es tener claridad de los objetivos del curso en donde se desea implementar una experiencia práctica. Es necesario que exista una estrecha relación entre los objetivos que se plantean lograr a lo largo del desarrollo del curso y las actividades prácticas que se realizarán dentro de este a partir de la experiencia aspirante.

Lo anterior, puesto que la metodología propuesta entrega las herramientas para crear y pasos a seguir para una confección adecuada. Así, teniendo claros los contenidos, las etapas siguientes pueden ser fácilmente moldeadas para obtener mejores resultados con miradas al curso.

Revisión de la literatura

Teniendo claridad de los objetivos del curso, para definir los objetivos de la experiencia es necesario realizar una revisión de la literatura. Con esto, se obtendrá información del estado del arte en cuanto a experiencias que siguen las temáticas en donde se desea desarrollar la actividad e información que sea de utilidad para lograr una mejor comprensión de la teoría detrás de la práctica. Así, se logra crear el soporte desde donde se comenzará a trabajar para la creación de la actividad, la cual debe lograr cumplir con ser novedosa, de interés y desafiante para los alumnos.

Para el presente trabajo, la experiencia será realizada dentro de cursos de la línea de especialización de potencias del Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Por ello, es que se debe tener gran precaución en que la experiencia presentada tenga correlación con los objetivos que buscarán satisfacer dichos cursos, los cuales se presentarán en el capítulo 5

3.2. Análisis de equipos y fallas

Esta etapa es de vital importancia para obtener la creación práctica y teórica de la experiencia, ya que sin el análisis adecuado de los equipos que serán las herramientas para llevar a cabo la experiencia propuesta, se puede ocasionar un desenlace erróneo, o incluso la falla de alguno de los dispositivos.

Para el presente trabajo, esta etapa se dividió en dos subsecciones de acuerdo a las características de los equipos que se utilizarán en la experiencia y su capacidades físicas para la creación de ésta. Sin embargo, para utilizar la presente metodología en otra instancia, esta etapa puede ser dividida en las subsecciones que se estimen convenientes, con el fin de realizar un adecuado análisis del equipamiento.

Capacidad de relés, software y red

Como punto inicial de esta subsección, es necesario tener en consideración los dispositivos que serán utilizados dentro de la actividad. Con esto, se debe comenzar un proceso de reconocimiento de las características de éstos para obtener las capacidades físicas, las diversas funcionalidades y los cuidados adecuados que se deben tener en consideración para no sobrepasar las limitaciones que se tienen.

Para el caso del presente trabajo, es necesario comprender la capacidad que poseen los dispositivos que serán utilizados, los cuales se encuentran en el Laboratorio de Energía y Accionamientos del Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica, los cuales se presentarán con detalle en el capítulo 4

Posibles perturbaciones y fallas

Producto que dentro del presente trabajo, la actividad contará con el funcionamiento de dispositivos de protección, y además teniendo en consideración la capacidad de los dispositivos que serán utilizados en la experiencia docente, es necesario plantear qué perturbaciones y fallas serán creadas para trabajar con el esquema de protección a configurar. Para ello, sabiendo que serán alumnos los que trabajarán con dichas anomalías, es necesario resguardar tanto los dispositivos como a las personas, optando por la perturbación que mejor se acomode a los requerimientos, las cuales serán presentadas en el capítulo 4

3.3. Diseño de la experiencia

Esta etapa la conforman tres subsecciones que permiten dar forma a la experiencia, logrando el diseño parcial de ésta. Así, se permitirá comprobar la factibilidad de la actividad en forma teórica y práctica, a partir de la evaluación que se realizará en forma previa al trabajo con los estudiantes.

Cabe destacar que este diseño previo estará sujeto a cambios a partir de la etapa IV de la metodología, y que tan solo es el punto inicial para realizar un futuro trabajo práctico detallado y mejorado.

Alcance

Toda experiencia debe tener claro el alcance que tendrá, el cual debe ser claramente cumplido al finalizar la actividad. Este punto presenta el paso a paso que se seguirá para lograr los objetivos. Es así como en esta sección se definen los alcances que debe tener la experiencia y que debe estar fuertemente ligado a los objetivos del curso en el cual se implementará.

En particular, en el presente trabajo se debe lograr la creación de una actividad docente que sea un real aporte al perfil de egreso de los estudiantes, aportando a la competencia de estos como futuros ingenieros. Por otro lado, tanto la metodología como la actividad deben ser replicables en otra actividad y materia respectivamente.

Actividades

En esta etapa se plantean las actividades a realizar, las cuales están fuertemente ligadas a las dos etapas anteriores. Por un lado, a partir de la etapa I se debe tener una completa claridad de los objetivos del curso en donde será implementada la experiencia, con el fin de que las actividades que sean postuladas logren cumplir con ellos. Por otro lado, la etapa II entrega las características de los distintos dispositivos que tomarán un papel en la experiencia, por lo que funciones, capacidades y limitaciones físicas juegan un rol fundamental en la confección de esta subsección.

En particular, en el presente trabajo esta etapa contiene un extenso alcance, puesto que se debe determinar qué protecciones se utilizarán y por qué, cómo se realizarán las perturbaciones, qué cargas serán utilizadas, cómo los alumnos lograrán verificar los disparos y cómo extraerán la información, etc. Además, cabe destacar que debido a la gran cantidad de elementos con softwares muy actuales, es necesario plantear la necesidad de una adecuada explicación para este entorno, con el objetivo de que sea lo más autoexplicable posible para los alumnos.

Evaluación

Esta subsección es de gran interés desde el punto de vista académico, ya que a partir de esta evaluación que se realiza previo al trabajo con los alumnos, es posible comprobar la factibilidad de la actividad en forma teórica y práctica. El objetivo es llevar a cabo una lectura a conciencia de los mismos documentos que utilizarán los estudiantes, además de realizar la experiencia según los pasos presentados y obtener posibles dificultades que puedan presentar los alumnos.

Para presente trabajo, esta evaluación se realizará dentro del Laboratorio de Energía y Accionamientos, siguiendo la guía de laboratorio que se confeccione para esta ocasión. A modo de probar la factibilidad en esta parte, la activación de toda configuración del sistema de protección debe ser debidamente accionada y se debe recopilar de manera sencilla toda la información. En cualquier prueba que esto no ocurra, esa sección debe ser analizada y corregida.

3.4. Implementación y pruebas

Esta corresponde a la etapa final de la metodología y en donde se realizará en forma directa el trabajo con los alumnos. Éste representa un proceso iterativo, en donde cada actividad docente esta capacitada para incorporar mejoras a la experiencia, tal como se aprecia en la figura 3.2. Esto, a partir de la opinión que entreguen los alumnos posterior a la actividad.

Prueba

Finalizando la etapa III, comienza la etapa de prueba o actividad docente con los alumnos. Aquí se les entrega la guía de trabajo a éstos para que realicen la actividad, en donde según de la cantidad de alumnos, será posible realizar variadas experiencias a partir de la separación de estos en grupos.

Dentro del presente trabajo, a los alumnos se les entregará en forma previa a la actividad, una guía de laboratorio con un pequeño marco teórico que corresponde a lo más básico que deben saber en el ámbito de las protecciones. Además, dicha guía debe tener un “paso a paso” de las actividades a realizar, las precauciones y datos que deben tener en consideración al momento de realizar la experiencia.

Encuesta y análisis

Posterior a la actividad docente, los alumnos tendrán la oportunidad de entregar su opinión respecto de la actividad y calificarla de acuerdo al cumplimiento de objetivos. Además, los alumnos pueden entregar su apreciación respecto a las mejoras que pueden ser implementadas, con el fin de mejorar la actividad de acuerdo a su percepción como estudiantes.

A partir de lo anterior, se genera un análisis de las respuestas entregadas. Por un lado, se verificará la confiabilidad y validez del instrumento de medición, en este caso encuesta. Por otro lado, se hará una observación detallada de las mejoras que pueden ser implementadas, con el fin de mejorar la actividad de acuerdo a la percepción de los estudiantes. Cabe destacar que, para que todo análisis e incorporación de mejoras sea comparable entre actividades, es necesario que la encuesta sea estandar.

Incorporar mejoras

Finalizando la subsección anterior y teniendo en cuenta la encuesta realizada, el siguiente paso es la incorporación de mejoras. Estas son directamente planteada por los alumnos en forma posterior a la actividad a partir de la encuesta. Sin embargo, el cuerpo docente a cargo de la experiencia también esta capacitado para la incorporación de dichas mejoras. Lo anterior, si dentro de la actividad se presentan las mismas dificultades o la falta de entendimiento de alguna sección en forma reiterada.

La idea es que se rompa con el paradigma de actividades obsoletas o que presenten poco interés para el estudiantado, logrando incorporar mejoras hechas de forma transversal al incluir la opinión de éstos como un factor relevante. Tal como se puede apreciar en la figura 3.2, esta última etapa es un ciclo cerrado, en la que apartir de cada actividad se pueden desprender mejoras para ocasiones futuras.

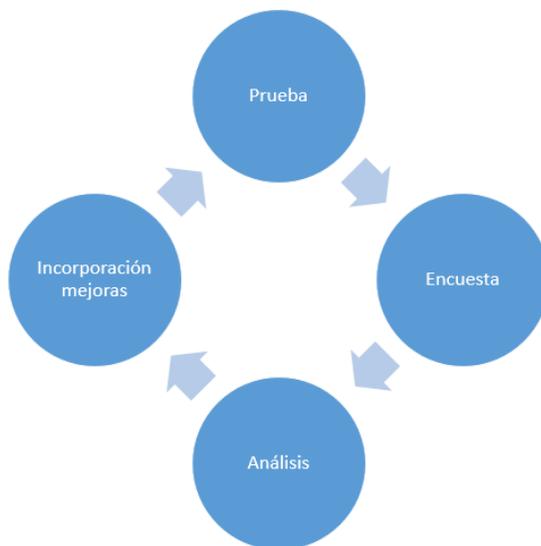


Figura 3.2: Ciclo de retroalimentación.

Capítulo 4

Implementación de la experiencia de laboratorio

En el capítulo 3 se presentó la manera en la cual se aborda el trabajo a realizar, dividiendo éste en secciones con objetivos particulares, en donde cada una de estas secciones permite el paso a la siguiente. En el presente capítulo se detallarán en conjunto las secciones que dan vida al trabajo, profundizando el trabajo realizado con los dispositivos de protección y la confección de las guías de trabajo.

4.1. Evaluación y ensayos de equipamiento eléctrico

En la figura 4.1 se puede apreciar la topología que presenta la micro-red ubicada en el Laboratorio de Energía y Accionamientos donde se realizará la experiencia de laboratorio. Como es posible observar, el relé Multilin, modelo F35 tiene la función de proteger las barras interiores de la micro-red, por lo que, con el fin de realizar una experiencia de coordinación y tener el espacio de maniobra adecuado, fue elegido como el dispositivo para ser utilizado en la confección de la experiencia docente.

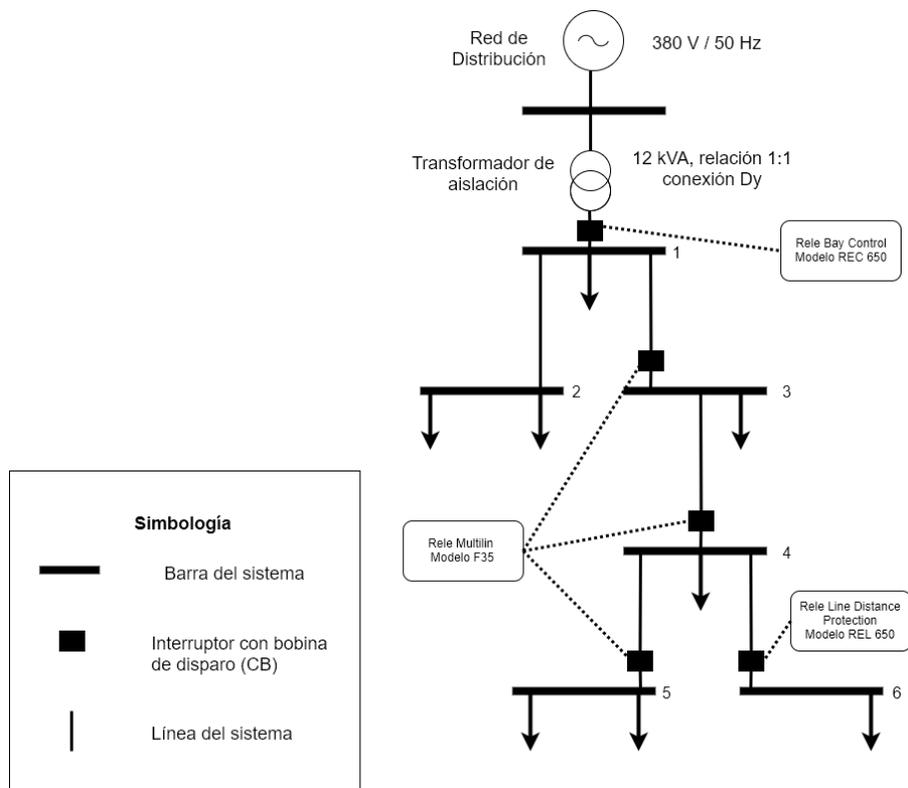


Figura 4.1: Topología micro-red presente en Laboratorio de Energía y Accionamientos.

Con la finalidad de tener una buena comprensión del material y herramientas disponibles, es que se realizó en esta parte del trabajo el desglose de tareas que se presentarán en las siguientes secciones:

4.1.1. Levantamiento micro-red

Este primer paso consistió en la familiarización de los elementos que componen la micro-red, sus características y funcionalidades. Para ello, fue necesaria la lectura de toda bibliografía pertinente que permitiese entender el estado del arte en el que se encuentran las actividades prácticas que toman lugar dentro del laboratorio hoy en día. Para el caso de los componentes de la micro-red que no correspondieran a los relés, se procedió a la revisión del material entregado en el curso EL-5203, “Laboratorio de Energía” [7]. En la figura 4.2 se puede apreciar el diagrama unilineal de los elementos que conforman una barra, en donde K2 es el contactor de alimentación de las cargas, el cual es activado por una bobina de disparo controlada por los medidores PM los cuales, a su vez, son controlados remotamente por el computador SCADA presente en el laboratorio, el cual posee un servidor OPC client que permite dicha acción.

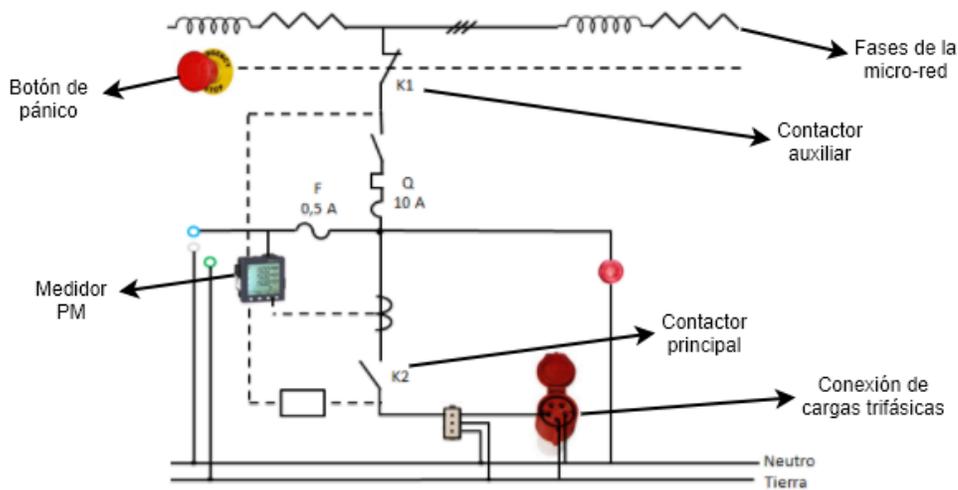


Figura 4.2: Diagrama unilineal de las barras de la micro-red.

4.1.2. Familiarización de equipos de protección

Tal como se mencionó en el inicio de este capítulo, se seleccionó el relé F35 de marca General Electric por sobre los relés REL y REC de marca ABB, debido a que el primero se encuentra monitoreando las barras interiores del sistema que se encuentran en cascadas, por lo que facilitaría la coordinación. Así, para obtener una buena familiarización del equipo, se procedió con la lectura del manual e instructivo (figura 8.1), logrando profundizar los conocimientos del software Enervista con el fin de realizar un primer acercamiento a la programación del relé.

GE
Digital Energy

F35 Multiple Feeder Protection System

UR Series Instruction Manual

F35 Revision: 7.1x

Manual PIN: 1601-0106-22 (GEK-119516A)



Figura 4.3: Portada del manual de instrucciones para relé universal F35.

Dentro de este marco, es importante destacar la gran cantidad de funciones y gran capacidad con las que cuenta este relé, las cuales requieren un análisis adecuado para comprender la utilidad que pueden tener las funciones de protección, entre las que destacan:

- Sobre corriente.
- Sobre tensión.
- Baja tensión.
- Sobre corriente instantánea en secuencia negativa y tierra.
- Señales de activación.

4.1.3. Definición de funciones

Parte esencial del trabajo es definir las funciones de protección del relé universal, las cuales serán utilizadas en la planificación del laboratorio. Tomando en cuenta que la experiencia esta planificada para realizarse en el Laboratorio de Energía y Accionamientos (donde la red eléctrica es pequeña y esta conectada a una red principal) es que las protecciones de sobre corriente y baja tensión surgen como candidatos. Lo anterior, producto de la facilidad con que estas variables pueden ser influenciadas con toma y desconexión de carga, a diferencia de la frecuencia que es impuesta por la red principal.

Para una mejor comprensión de lo anterior, en la tabla 4.1 se realiza una comparación cruzada de las funciones de sobre corriente y baja tensión. Como se puede apreciar, por un lado la protección de sobre corriente no tiene cabida en escenarios con bajas corrientes de falla, a diferencia del relé de baja tensión. Por otro lado, el relé de baja tensión es de difícil coordinación y vulnerable a accidentes transitorios, a diferencia de la protección de sobre corriente que se ajusta a la condición de operación. Así, se puede apreciar la complementariedad de estas funciones.

Tabla 4.1: Comparación entre funciones de sobre corriente y baja tensión.

Esquema de Protección	Ventajas	Desventajas
Protección de Baja Tensión	Independiente de magnitud de corriente de falla	Vulnerable a incidentes transitorios y difícil de coordinar
Protección de Sobre Corriente	Ajusta sensibilidad según condiciones de operación	Depende del nivel de corrientes de falla

A continuación, se presentarán las funciones de protección que serán utilizadas en la composición de la actividad docente, con sus ecuaciones, capacidades y descripciones correspondientes.

Sobre corriente

La protección de sobre corriente posee diversos tipos de curvas, entre las que se encuentran:

- IEEE
- IEC
- GE Type IAC
- Otras a formar

Con el fin de ceñirse a lo que utiliza la industria, se utilizarán las curvas IEC, las cuales se rigen por la ecuación 4.1, en donde los parámetros “K” y “E” definen el tipo de curva IEC es la que será utilizada, y por otro lado, los parámetros TDM e I_{pickup} pueden ser variados para sincronizar el tiempo de disparo.

$$T = TDM \times \frac{K}{(I/I_{pickup})^E - 1} \quad (4.1)$$

En donde:

- TDM: Corresponde al multiplicador de la curva. El tiempo de activación “T” es directamente proporcional a este parámetro.
- K, E: Constantes que linealizan el comportamiento termomagnético en forma digital. Se fijan según el tipo de curva IEC que se desea conseguir.
- I: Corresponde a la corriente que está midiendo el transformador de corriente de la protección.
- I_{pickup} : Corresponde a la corriente límite en donde la curva de tiempo inverso comienza a actuar.

En la imagen 4.4 se puede apreciar la curva típica de una función de sobre corriente de tiempo inverso, en donde la recta vertical roja representa (en este caso) el valor pick up de corriente definida. Como puede observarse, el valor TDM genera un desplazamiento vertical hacia valores menores de tiempo cuando dicho valor toma valores más pequeños.

Cabe destacar que para esta función de sobre corriente el usuario puede definir dos tipos de curvas: tiempo definido y tiempo inverso. En la primera se debe restringir a 0 el valor de la variable "TDM" y definir el valor pick up, el cual al ser alcanzado activa de forma inmediata la protección liberando la carga, a diferencia de la segunda, en donde el valor de la variable TDM debe ser distinta y mayor a 0. Una vez sobrepasado el valor pick up existirá un tiempo de retardo en la respuesta de activación de la protección, en donde dicho retardo es menor mientras mayor sea el valor de la corriente medida por sobre el valor de corriente pick up.

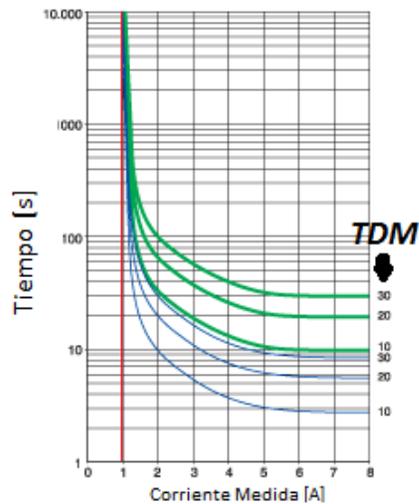


Figura 4.4: Curva de sobre corriente típica.

Baja tensión

A diferencia de la protección de sobre corriente, la protección de baja tensión que posee el relé es una de tipo convencional de tiempo inverso, sin capacidad de variación, cuya fórmula se puede apreciar en la ecuación 4.2. Los parámetros D y V_{Pickup} pueden ser variados con el fin de sincronizar el tiempo de disparo.

$$T = \frac{D}{\left(1 - \frac{V}{V_{Pickup}}\right)} \quad (4.2)$$

En donde:

- D : Valor de retardo para la curva.
- V : Corresponde al voltaje que los equipos de medición toman del sistema.
- V_{Pickup} : Corresponde al límite de tensión en donde la curva de tiempo inverso comienza a actuar.

En la imagen 4.5 se puede observar variadas curvas de baja tensión de tiempo inverso con diversos valores de “ D ”, en donde se puede apreciar que para un mismo valor de fracción de pick-up, el tiempo de activación de la protección aumenta si también lo hace dicha variable. Para este caso, la recta vertical de color celeste representa el valor pick-up definido.

Cabe destacar que para esta función, al igual que la función de sobre corriente, también se puede configurar tanto la curva se tiempo definido como de tiempo inverso. El procedimiento es análogo al descrito anteriormente.

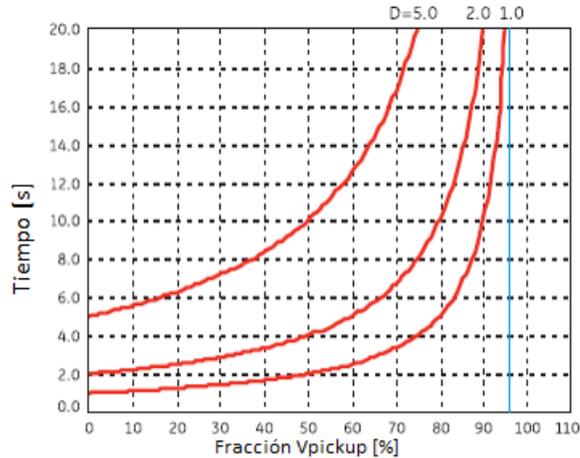


Figura 4.5: Curva de baja tensión típica.

4.1.4. Pruebas de funcionamiento para relé F35

Para determinar el correcto funcionamiento de las protecciones a programar, se realizó un conjunto de pruebas previo al trabajo con los alumnos, en donde se buscaba:

- Correcta sincronización entre configuración de protección y accionamiento físico.
- Correcta adquisición de datos a partir de los dispositivos de medición.
- Tomar conciencia del estado en que se encontraba la estructura de la micro-red.
- Posibles fallas en el accionamiento del sistema de protección de la micro-red.
- Factibilidad de posibles pruebas físicas realizables por estudiantes.

Con lo anterior en mente, se probaron cinco posibles configuraciones de protección, las cuales serían candidatos a ser utilizados en la experiencia de laboratorio.

Sobre corriente - ANSI 51

Para la protección de sobre corriente se realizó tanto la activación de la función de tiempo definido como de tiempo inverso. Para ello, se utilizó la carga trifásica variable presente en las dependencias del laboratorio, la cual será conectada a la barra N° 5 del sistema.

Los pasos más importantes a seguir en cada actividad son los siguientes:

- Ajustar el relé de protección con función de sobre corriente con un valor pick-up de 2 [A] (0.1 [p.u.]), y un marcador de tiempo (TDM) según la función que se vaya a utilizar (tiempo definido o tiempo inverso).
- Llevar corriente de carga a un valor menor a la corriente pick-up para verificar que no haya disparo del interruptor.
- Aumentar la corriente por encima del valor pick-up y verificar disparo del interruptor.

- Verificar en el software enervista el reporte de falla y oscilografía pertinente.

Baja tensión - ANSI 27

Al igual que para la protección anterior, para la protección de baja tensión se realizó la activación de la función de tiempo definido y tiempo inverso. Para ello, se utilizó la carga trifásica variable presente en las dependencias del laboratorio, la cual se conectó a la barra N° 5 del sistema.

Los pasos más importantes a seguir en cada actividad son los siguientes:

- Ajustar el relé de protección con función de baja tensión con un valor pick-up de 392 [V] (0.98 [p.u.]), y un marcador de tiempo (TDM) según la función que se vaya a utilizar (tiempo definido o tiempo inverso).
- Llevar a la carga a un valor menor a la tensión pick-up para verificar que no haya disparo del interruptor.
- Aumentar la carga por encima del valor pick-up y verificar disparo del interruptor.
- Verificar en el software enervista el reporte de falla y oscilografía pertinente.

Protección combinada

Como un proceso de innovación en actividades prácticas, con el fin de que los estudiantes puedan comprender las nuevas exigencias y dificultades que presentan los SEP en el ámbito de las protecciones producto de la fuerte presencia de micro-redes y GD, los cuales generarán niveles de acción más veloces y precisos, es que en esta actividad se realizará la conexión de un motor de inducción trifásica en la barra N° 5 para ambas configuraciones: conexiones delta y estrella, generando así grandes sobre corrientes en los primeros mili-segundos del encendido.

En el contexto anterior, los estudiantes deben realizar la combinación de las dos protecciones presentadas anteriormente, coordinando los parámetros presentados en las ecuaciones 4.1 y 4.2 para los niveles de tensión y corriente que se generen en la conexión del motor, con el fin de presentar una protección mas robusta según lo expuesto en la tabla 4.1. La combinación es configurada en el software Enervista en forma previa al trabajo con los estudiantes y su diagrama se presenta en la figura 4.6, en donde cada una de las funciones de protección será activada en forma independiente de la otra. Esto se realiza para que no existan falsos disparos en el sistema, por lo que únicamente existirá señal de disparo de la protección cuando tanto la función de protección como la señal de contactor (cerrado) entreguen un TRUE a la primera compuerta lógica AND. Es importante realizar una diferencia entre ambos tipos de conexiones, ya que la conexión en "delta" será presentada como una situación anormal producto de sus altos niveles de corriente y profundas caídas de tensión, a diferencia de la conexión en "estrella".

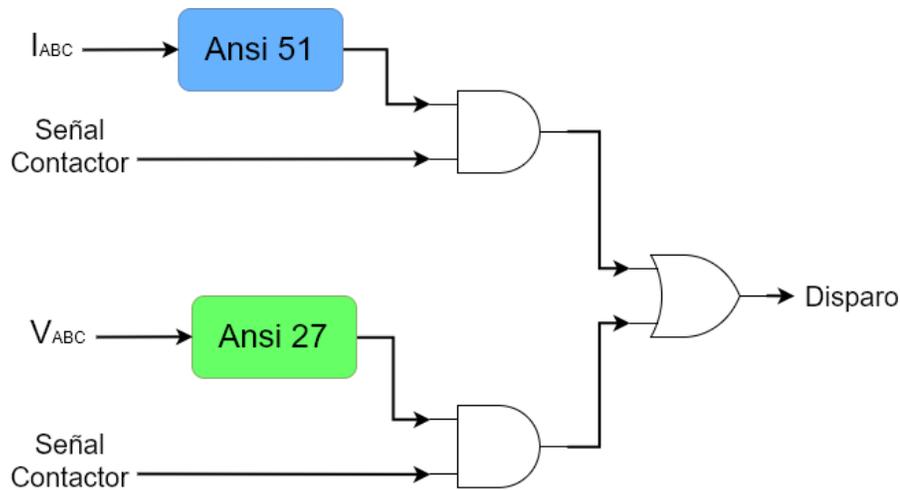
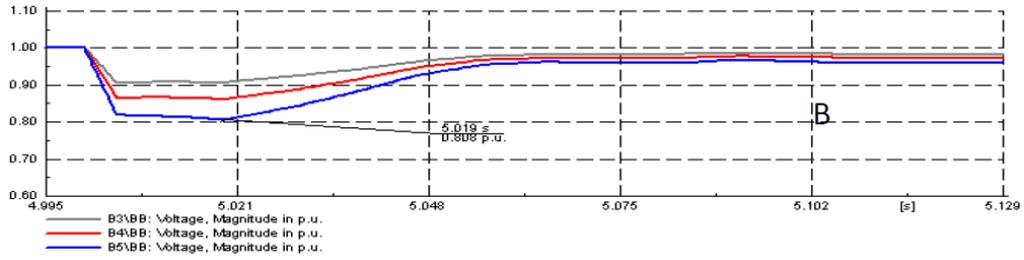


Figura 4.6: Diagrama lógico de la protección combinada.

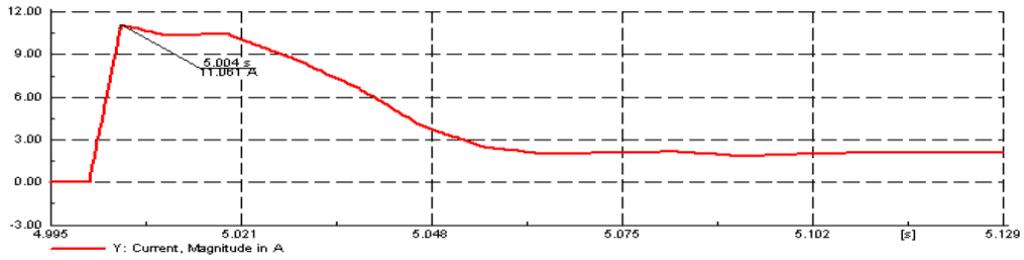
Posterior a la coordinación de ambas funciones, los alumnos deben ser capaces de configurar un sistema de protección coordinado para las barras 3, 4 y 5 del sistema (imagen 4.2), con el fin de que cada protección aguas arriba sea un soporte en caso de falla de aquella que le precede.

Para que los estudiantes establezcan el comportamiento de las variables del sistema, deben utilizar a elección algún software de simulación que les entregue en forma gráfica y numérica el cambio en dichas variables. Los resultados gráficos que se obtuvieron previo al trabajo con los alumnos y que es a lo que deben apuntar obtener los alumnos en esta etapa de simulación se presenta en las imágenes 4.7, cuyos valores se encuentran tabulados en las guías prácticas presentadas en las secciones 8.4, 8.6 y 8.8 del Anexos. Los pasos mas importantes a seguir en esta actividad son los siguientes:

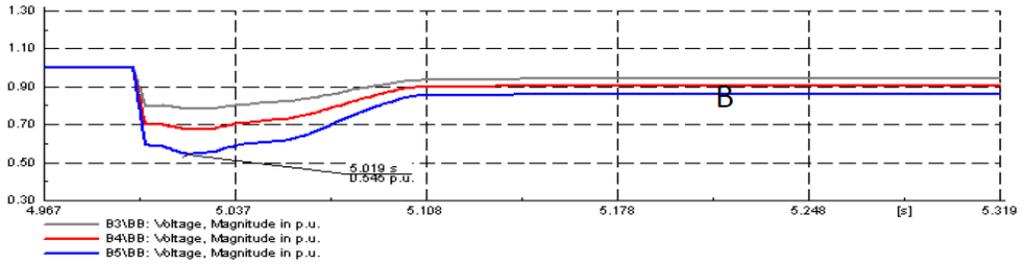
- Realizar la conexión pertinente (delta o estrella).
- Encender motor y verificar el correcto disparo del sistema de protección.
- Verificar en el software Enervista el reporte de falla y oscilografía pertinente.



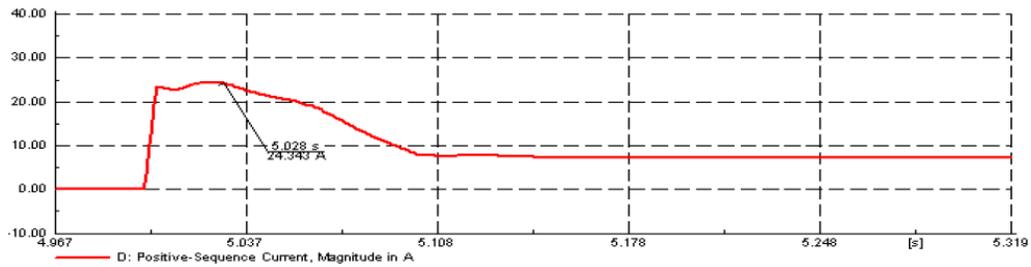
(a) Voltaje conexión estrella.



(b) Corriente conexión estrella.



(c) Voltaje conexión delta



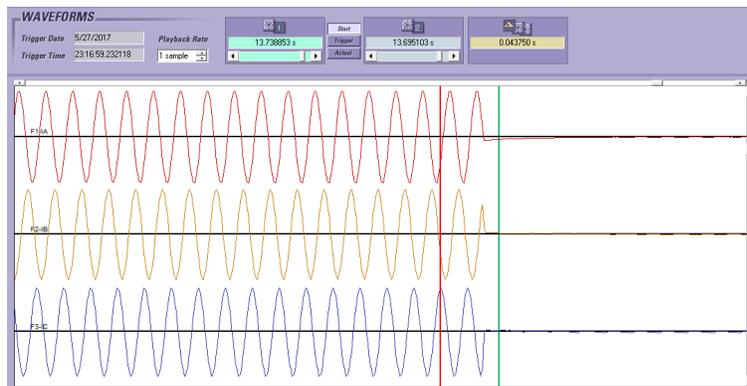
(d) Corriente conexión delta

Figura 4.7: Simulación RMS de las variables en conexión estrella y delta.

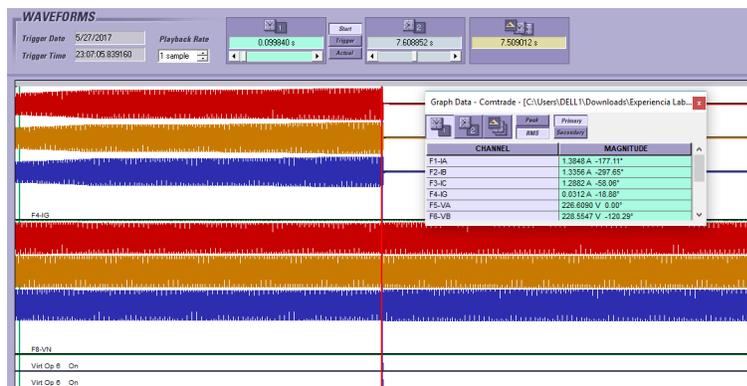
4.1.5. Resultados de las pruebas de funcionamiento

A partir de las pruebas de funcionamiento, no solamente se obtiene resultados físicos como lo es el accionamiento de los contactores producto de la activación de las funciones de protección y con ello un análisis de su correcto funcionamiento, sino que también resultados gráficos de las variables del sistema a partir del software Enervista. Estos últimos serán los principales resultados que obtendrán los estudiantes, con los cuales pueden trabajar analizando igualdades y diferencias entre teoría y práctica en temáticas de protección.

Para realizar las dos primeras experiencias, se deben seguir las instrucciones presentadas en la sección 4.1.3, donde los resultados a obtener se muestran en las imágenes 4.8 y 4.9. En el primer set de imágenes se tiene un ejemplo de la oscilografía a obtener por parte del software Enervista cada vez que se active una protección. La recta roja corresponde al momento en que se envía la señal de disparo hacia la bobina, y las rectas verdes y azules son marcadores que permiten obtener una diferencia de tiempo y los datos según donde se sobrepongan en la curva. El software también permite obtener los reportes de falla, los cuales se pueden observar en el segundo set de imágenes. Aquí se puede extraer directamente la información, tal como la función que se activó, la salida por la cual se envió la señal de disparo y la magnitud de las variables en los momentos previos y durante la falla.



(a) Corrientes por fase.



(b) Conexión delta.

Figura 4.8: Oscilografía de las variables.

Fault Report Data:				
Fault Number	231	ActiveSettingGroup	1	
Relay Name	Relay-1	EventNumberAtTrigger	3920	
FirmwareRevision	7.11	FaultType	--	
DateAndTime	2017/05/17 18:47:57.49	Location	n/a	
TriggerOperand	Virt Op 6 On	LocationUnits		
LineID	Barra5	ShotCount	0	
Operated Elements:				
Element 1	PHASE TOC3			
Prefault and Fault Phasors:				
Signal	Prefault Magnitude	Prefault Angle	Fault Magnitude	Fault Angle
Ia	3.468 A	181.3 deg	3.469 A	181.4 deg
Ib	3.354 A	61.7 deg	3.357 A	61.7 deg
Ic	3.332 A	300.7 deg	3.328 A	300.7 deg
In	0.000 A	0.0 deg	0.000 A	0.0 deg
Va	221.960 V	358.8 deg	222.189 V	358.8 deg
Vb	222.736 V	238.6 deg	222.806 V	238.6 deg
Vc	221.367 V	118.5 deg	221.500 V	118.6 deg

(a) Sobre corriente.

Fault Report Data:				
Fault Number	234	ActiveSettingGroup	1	
Relay Name	Relay-1	EventNumberAtTrigger	3995	
FirmwareRevision	7.11	FaultType	--	
DateAndTime	2017/05/17 19:25:48.36	Location	n/a	
TriggerOperand	Virt Op 6 On	LocationUnits		
LineID	Barra5	ShotCount	0	
Operated Elements:				
Element 1	PHASE UV3			
Prefault and Fault Phasors:				
Signal	Prefault Magnitude	Prefault Angle	Fault Magnitude	Fault Angle
Ia	1.538 A	183.0 deg	1.537 A	182.8 deg
Ib	1.485 A	61.5 deg	1.484 A	61.6 deg
Ic	1.446 A	299.9 deg	1.444 A	300.0 deg
In	0.000 A	0.0 deg	0.000 A	0.0 deg
Va	230.012 V	359.3 deg	230.362 V	359.3 deg
Vb	231.342 V	239.2 deg	231.107 V	239.1 deg
Vc	230.097 V	119.0 deg	230.149 V	119.0 deg

(b) Baja tensión.

Figura 4.9: Reportes de falla.

Para realizar la experiencia de protección combinada, es necesario obtener el comportamiento de las variables según el tipo de conexión del motor de inducción, las cuales se presentaron en la imagen 4.7. Con esto, más la ayuda de las curvas 4.1 y 4.2, en las cuales es posible obtener los tiempos de cambio de las variables, es posible obtener un valor para cada uno de los parámetros de cada ecuación mediante un proceso de prueba y error. Es así como se obtienen las variables presentadas en las tablas 4.2 y 4.3.

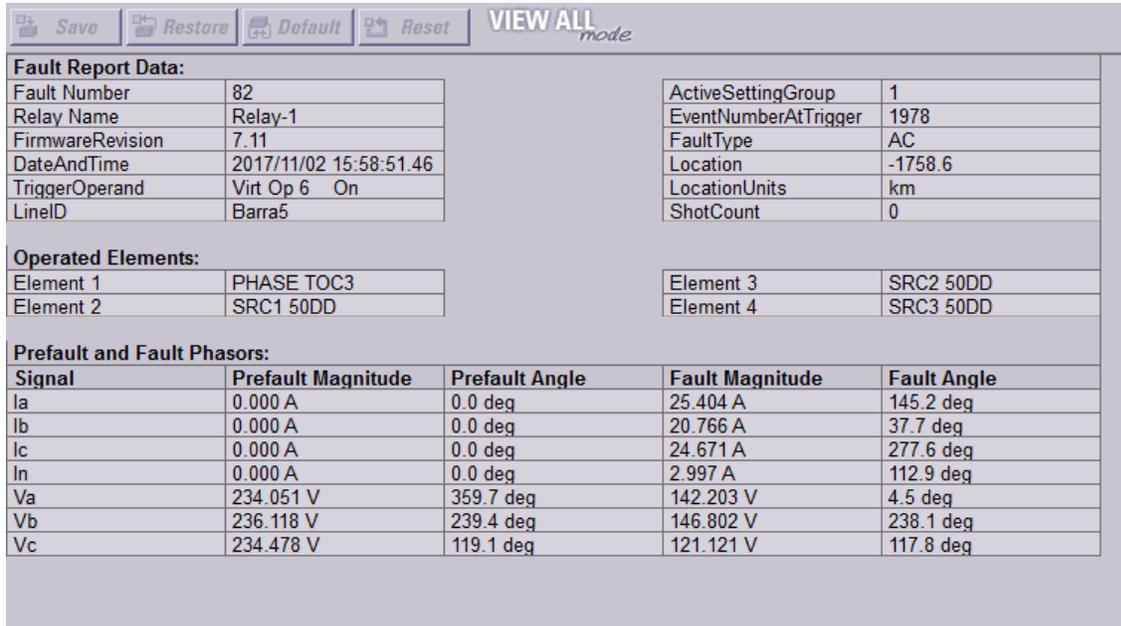
Tabla 4.2: Parámetros utilizados en la prueba de sobre corriente.

Tipo	K	E	TDM	I_{pickup} [p.u.]	Tiempo [s]
Instantánea	-	-	0	0.1	~0.04
Inversa	0.14	0.02	1	0.1	2.8

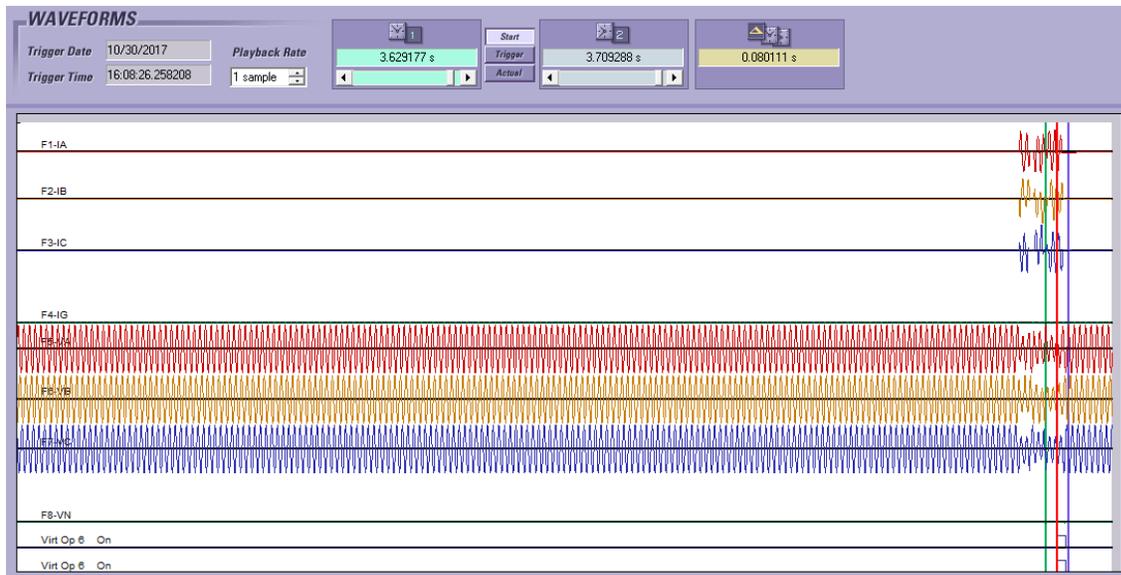
Tabla 4.3: Parámetros utilizados en la prueba de baja tensión.

Tipo	D	V_{pickup} [p.u.]	Tiempo [s]
Instantánea	0	0.98	~0.04
Inversa	1	0.98	10

Teniendo los parámetros a utilizar, se procede a realizar el encendido del motor en conexión delta, obteniendo los resultados que se observan en las imágenes 4.10 y 4.11. Como es posible observar, la oscilografía presenta discontinuidades en su forma, producto de que la velocidad de cambio de las variables durante el arranque del motor esta al límite con la tasa de muestreo que posee el relé F35.

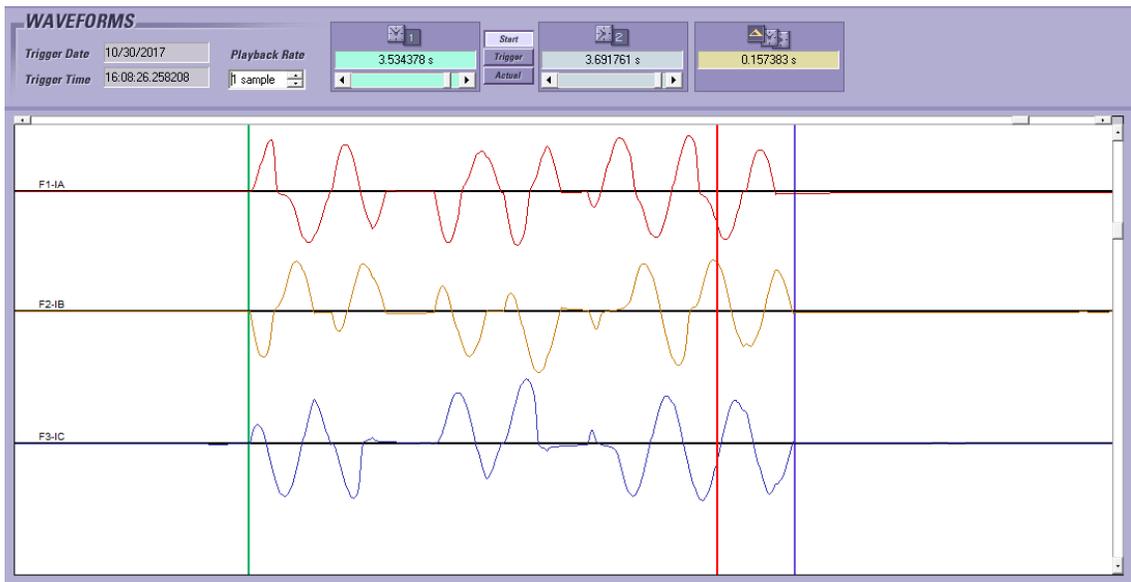


(a) Reporte de falla.

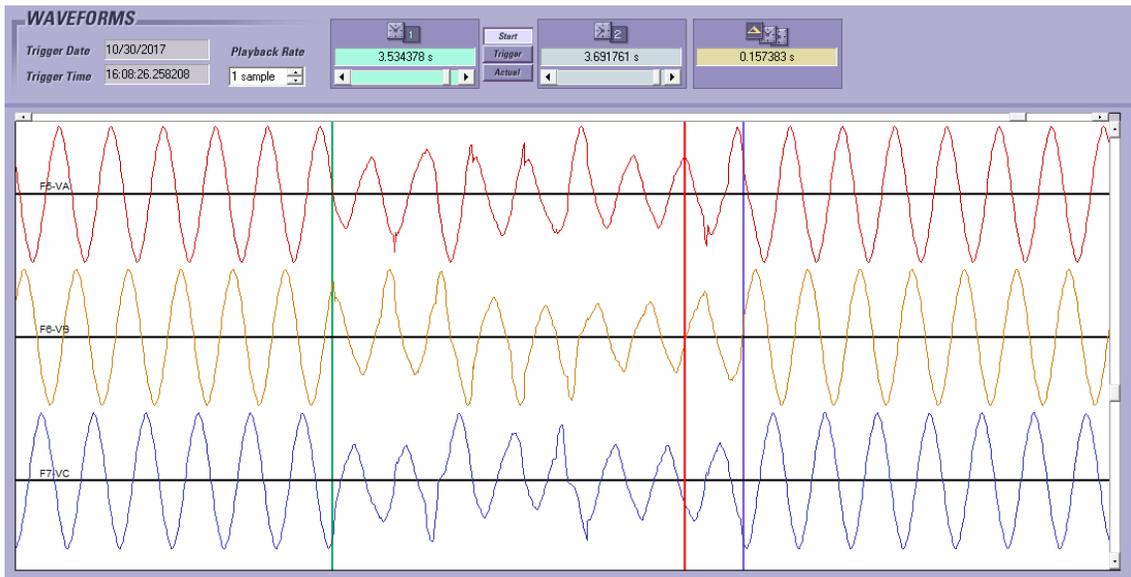


(b) Oscilografía completa.

Figura 4.10: Resultados de protección combinada.



(a) Corriente.



(b) Tensión.

Figura 4.11: Comportamiento variables en protección combinada durante conexión motor de inducción.

Capítulo 5

Resultados de la aplicación de la experiencia de laboratorio

En este capítulo se expondrá el trabajo que fue realizado en las experiencias docentes y los resultados obtenidos de las encuestas posteriores a ella, cuyo formato se puede encontrar en anexos, en la sección 8.3. Además, se realizará un análisis de la encuesta y sus resultados, logrando la validez de dichos resultados a partir del coeficiente “alfa de Cronbach”.

5.1. Primera aplicación

La primera experiencia tuvo lugar en el curso El 7045 - Micro-redes y generación distribuida, durante el semestre otoño 2017. Para esta oportunidad, se contó con una cantidad de 24 estudiantes, los cuales se agruparon en grupos de 5 alumnos para realizar la experiencia en distintos bloques horarios de una hora y treinta minutos.

En dicho curso, se espera que el alumno finalice siendo capaz de:

- Aplicar y evaluar técnicas relacionadas con el diseño, análisis y evaluación de micro-redes.
- Desarrollar soluciones de integración de generación distribuida mediante micro-redes a nivel de distribución.
- Comprender y evaluar el impacto de micro-redes tanto en aspectos técnicos y económicos, como sociales y ambientales.

Dentro de la unidad 3 del curso, existe un contenido de protección en mirco-redes enfocado en relés inteligentes. En este punto, la presente actividad de laboratorio propuesta puede ser fácilmente implementada, complementando dicho contenido desde un punto de vista práctico. Además, se lograría desarrollar las habilidades que se espera que el alumno obtenga, a partir de este mismo punto de vista.

En esta oportunidad, se le entregó a los alumnos una guía de laboratorio (imagen 5.1), cuyo contenido consistía en una pequeña introducción, explicación de los dispositivos, información relevante para realizar cálculos y una lista de los pasos a seguir para realizar la experiencia; la cual se puede encontrar en anexos 8.4.

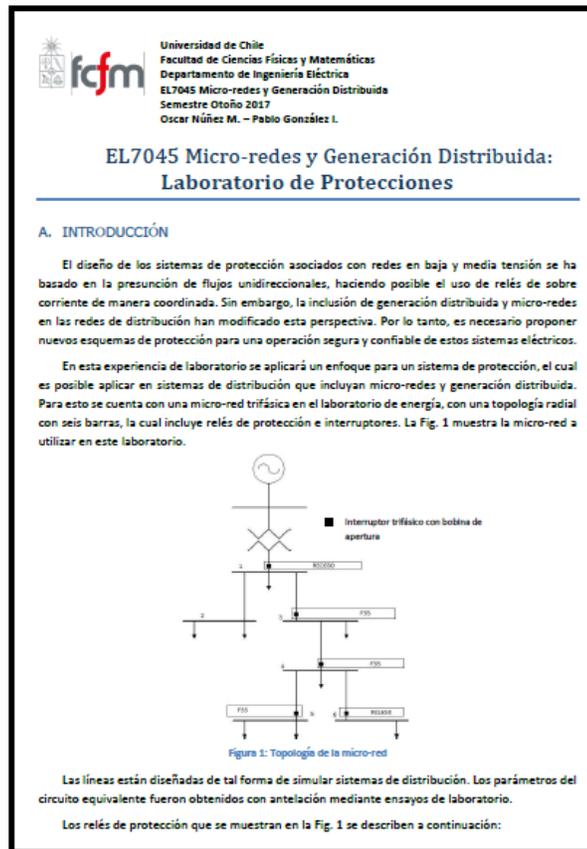


Figura 5.1: Primera guía confeccionada para experiencia de protecciones.

5.1.1. Resultados de la primera aplicación

Durante el desarrollo de la experiencia, los estudiantes presentaron algunas dificultades, dentro de las que se repetían:

- Dificultad en la comprensión de las ecuaciones de ambas protecciones.
- Complicaciones durante la práctica para la coordinación de la protección mixta.
- Falta de tiempo para la correcta realización de la experiencia.

Frente a lo anterior, los alumnos idearon novedosas ideas para sortear las dificultades, dentro de las que destacan:

- Para la experiencia de coordinación de las tres barras en cascada con la conexión del motor de inducción, los alumnos definieron protecciones de tiempo definitivo con un valor de pick up entre la corriente máxima alcanzada en conexión estrella y la máxima en delta.

- A pesar de que suele trabajar con el marcador de tiempo para desplazar la curva de activación, algunos alumnos dejaron un marcador de tiempo bajo para trabajar con el valor pick-up y con ello, variar en forma más precisa el tiempo de activación.

Producto de lo anterior, fue necesario que durante la experiencia práctica se brindara una mayor ayuda guiada, dando señales de que la presente guía requería fuertes cambios para una mejor comprensión de la experiencia y las funciones de protección, las cuales incidirían directamente en la disminución del tiempo de realización.



(a) Trabajando en el sistema SCADA.

(b) Analizando topología física.

Figura 5.2: Alumnos durante primera experiencia de protecciones.

5.1.2. Primera encuesta

Posterior a la experiencia, se procedió a entregar una encuesta estandarizada a los alumnos, con el propósito de rescatar observaciones y opiniones que aporten a un mejor desempeño de futuras experiencias de laboratorio. Dicha encuesta contaba con cuatro secciones y para aquellas preguntas que requirieran asignación de nota, una escala tipo Likert (1 al 5), donde el 5 es estar totalmente de acuerdo con la afirmación y 1 en total desacuerdo. Las secciones que lo componen son las siguientes:

1. Opinión general sobre lo más destacable y difícil de la experiencia.
2. Evaluación de aspectos técnicos de la experiencia.
3. Evaluación de la conformidad de los alumnos frente a la experiencia.
4. Opinión general o recomendación de aspectos a mejorar en la experiencia o guía.

De la evaluación a partir de la escala de Likert, los resultados se presentan en las tablas 5.1 y 5.2. Dentro de la opinión general sobre lo más destacable y difícil de la experiencia, los alumnos encuestados mostraron su agrado por tener un primer encuentro en forma práctica al mundo de las protecciones, pero destacando lo complicado que resulta realizar dicha experiencia, por sobre todo la coordinación con el motor de inducción, producto de que no han tenido un curso que se dedique a la enseñanza de estos elementos y la complejidad de la lectura.

Alguna de las recomendaciones expresadas por los estudiantes y que se vieron reflejadas en la mayoría de estas encuestas, son las siguientes:

- Reducir los grupos de trabajo y aumentar el tiempo de realización. Esto, producto que, durante la experiencia, cinco alumnos por actividad generaba dejar a alguno solamente como mero observador, sin capacidad de poder poner en práctica los parámetros obtenidos para la actividad III; además de no poder generar una buena comunicación revia entre grupos de trabajo con el fin de llevar tan solo una configuración para dicha actividad.
- Aumentar marco teórico presente en las guía, con el fin de tener una mayor comprensión del marco en donde se desarrollará la experiencia.
- Mejorar la explicación de las funciones de protección, los parámetros de sus curvas y sus capacidades. Lo que presentó mayor dificultad en los alumnos fue la forma de determinar los parámetros de las curvas para la última actividad.
- Separar la guía utilizada en dos: una teórica, con una explicación que abarque desde los dispositivos de protección más simples (como lo son los fusibles o interruptores termomagnéticos), hasta aquellos relés inteligentes capaz de programar múltiples funciones de protección; Y otra guía práctica, con los pasos en el laboratorio, cálculos y recomendaciones para la experiencia.

Tabla 5.1: Resultados de la sección II de la encuesta.

Aspecto	Ponderación				
	5	4	3	2	1
1. El laboratorio cumplió con los objetivos planteados.	55 %	45 %	0 %	0 %	0 %
2. El material del laboratorio es claro y de fácil entendimiento.	25 %	30 %	25 %	20 %	0 %
3. El nivel de profundización de los contenidos fue adecuado.	30 %	40 %	15 %	10 %	5 %
4. Logré comprender claramente los contenidos impartidos.	40 %	35 %	20 %	5 %	0 %
5. Los contenidos teóricos son aplicables en forma experimental.	65 %	20 %	15 %	0 %	0 %
6. Es claro el rol que cumplen las protecciones en un SEP.	80 %	20 %	0 %	0 %	0 %
7. Comprendí qué elementos componen un sistema de protección y la forma en que interactúan.	50 %	45 %	5 %	0 %	0 %
8. La actividad permite un acercamiento al mundo real de los sistemas eléctricos de potencia y sus aplicaciones.	65 %	35 %	0 %	0 %	0 %
9. La experiencia es un aporte a mi desempeño como profesional.	65 %	35 %	0 %	0 %	0 %

Tabla 5.2: Resultados de la sección III de la encuesta.

Aspecto	Ponderación				
	5	4	3	2	1
1. ¿Fue de su interés la experiencia?	55 %	45 %	0 %	0 %	0 %
2. ¿Se encuentra satisfecho con la experiencia?	25 %	60 %	15 %	0 %	0 %
3. ¿El nivel de dificultad de la experiencia es adecuada?	45 %	35 %	20 %	0 %	0 %
4. ¿El profesor auxiliar tuvo un buen desempeño?	75 %	25 %	0 %	0 %	0 %
5. ¿El laboratorio cuenta con buenas condiciones de trabajo? (orden, material, equipos y seguridad).	35 %	55 %	5 %	0 %	5 %
6. ¿Calificaría como excelente la actividad en forma global?	30 %	50 %	15 %	5 %	0 %

5.2. Segunda aplicación

La segunda experiencia tuvo lugar en el curso EL 5203 - Laboratorio de energía, durante el semestre primavera 2017. Para esta oportunidad, el curso contaba con experiencias semanales, donde los alumnos deben formar grupo de 3 estudiantes para realizar dichas prácticas. Producto de este contexto, la experiencia propuesta de protecciones se enmarcó dentro del curso como una experiencia extra de carácter voluntaria. En total, 15 alumnos realizaron la experiencia y posteriormente contestaron la encuesta en su totalidad.

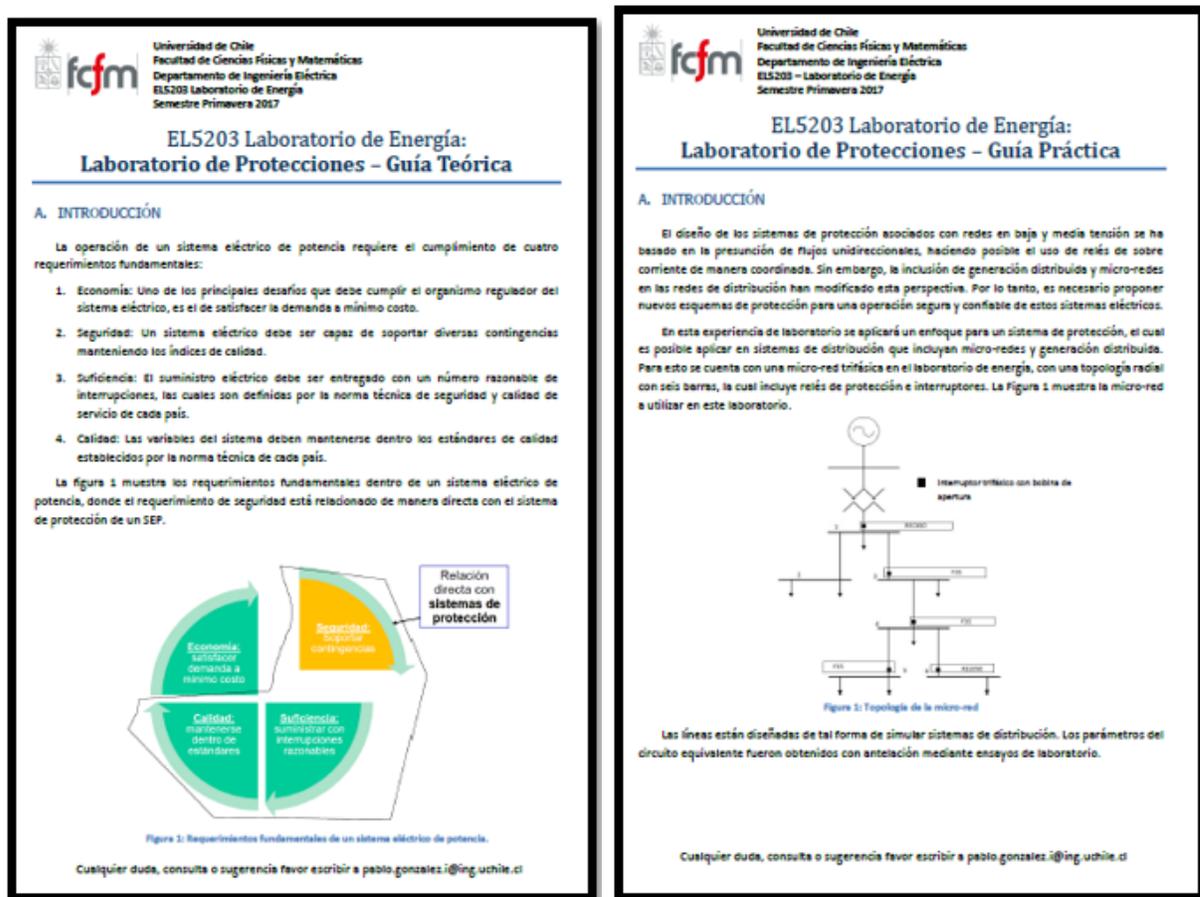
En dicho curso, se espera que el alumno finalice siendo capaz de:

- Analizar y clasificar las condiciones de operación de un sistema eléctrico y de una línea de transmisión, bajo distintas condiciones de operación normal y en situación de falla.
- Comprender, a través de la experimentación y con un enfoque sistémico, distintos sistemas y esquemas de conversión de la energía y de generación de energía eléctrica.
- Verificar la teoría, validez y limitaciones de los modelos desde un enfoque sistémico, de máquinas y dispositivos eléctricos estudiados y de las relaciones de ellos obtenidas.

La presente actividad de laboratorio puede complementar de buena manera todos los puntos anteriormente mencionados. Por un lado, los esquemas de protección permiten verificar las condiciones de operación de un SEP, logrando discernir una operación normal de una situación de falla. Por otro lado, permitiría comprender desde la experimentación las problemáticas y desafíos actuales de los sistemas de generación de energía eléctrica. Finalmente, permitiría verificar la teoría, validez y limitaciones de la temática de protecciones desde un enfoque de máquinas y dispositivos eléctricos, poniendo a prueba los conocimientos de los alumnos a través de una novedosa experiencia.

5.2.1. Resultados de la segunda aplicación

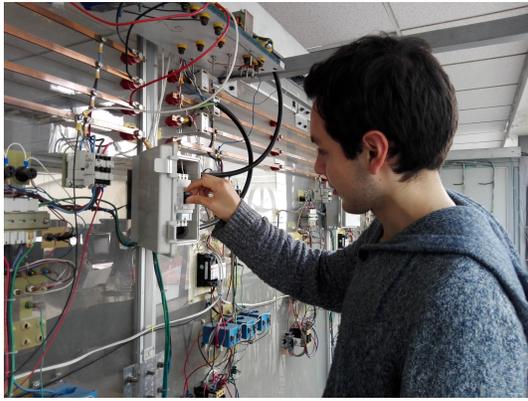
Para el desarrollo de esta segunda experiencia, se tomaron en consideración los resultados obtenidos de la primera encuesta. Como primera medida, se confeccionaron dos guías: una teórica y otra práctica (figura 5.3), las cuales se pueden encontrar en las secciones 8.5 y 8.6 de anexos. La guía práctica por un lado, posee una pequeña introducción al tema de protecciones, exigencias básicas de los equipos de protección, el objetivo que busca la coordinación de protecciones, los equipos de protección más utilizados y finalmente las funciones de protección a utilizar con sus respectivas ecuaciones y curvas. En cambio, la guía teórica contiene los pasos a seguir por los alumnos (figura 5.4) tanto para la propia actividad, como para la configuración de los dispositivos. Además, cuenta con advertencias y comentarios útiles para un buen desempeño de la actividad. Como anexo se entregan los datos y las gráficas de comportamiento de las variables del sistema para ambos tipos de conexiones.



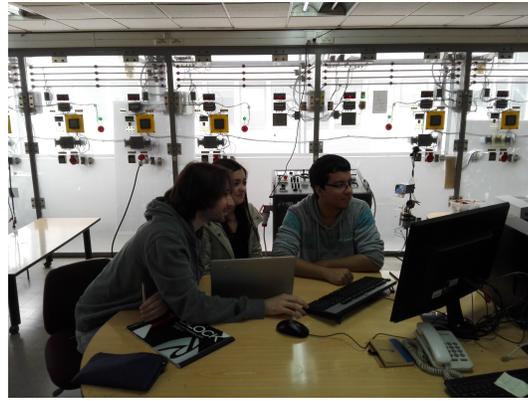
(a) Guía teórica.

(b) Guía práctica

Figura 5.3: Guías preparadas para segunda experiencia.



(a) Reactivando protección.



(b) Trabajando en SCADA.

Figura 5.4: Alumnos durante segunda experiencia de protecciones.

5.2.2. Segunda encuesta

Posterior a la experiencia, se procedió a entregar a cada grupo participante la misma encuesta estandarizada que se entregó en el marco de la primera experiencia de laboratorio. En esta ocasión, se obtuvieron los resultados presentados en las tablas 5.3 y 5.4. Dentro de la opinión general sobre lo más destacable y difícil de la experiencia, los alumnos encuestados nuevamente mostraron un agrado por la actividad, de poder estudiar y comprender el uso de los elementos de protección dentro de un marco práctico y la simplicidad con que se puede realzar la experiencia. Lo anterior, producto de que este no es un tema que se trate en cursos básicos e introductorios de la carrera, teniendo poco trasfondo del tema de protecciones y que constituyen una aplicación importante. En este contexto, la prueba de coordinación y cálculo de parámetros resultó ser la de mayor dificultad para la gran mayoría de los alumnos.

Algunas de las recomendaciones expresadas por los estudiantes para esta ocasión, y que se vieron reflejadas en la mayoría de las encuestas son las siguientes:

- Mejorar explicación teórica para el punto de coordinación de protecciones.
- Mejorar explicación del cálculo a realizar, para obtención de parámetros de curvas. Esto se puede lograr de buena manera a partir de un ejemplo cuantitativo.
- Aclarar el rol que cumplen los anexos en la actividad de cálculo de los parámetros en la actividad de protección para el motor de inducción.

Tabla 5.3: Resultados de la sección II de la encuesta.

Aspecto	Ponderación				
	5	4	3	2	1
1. El laboratorio cumplió con los objetivos planteados.	87 %	13 %	0 %	0 %	0 %
2. El material del laboratorio es claro y de fácil entendimiento.	40 %	46 %	7 %	7 %	0 %
3. El nivel de profundización de los contenidos fue adecuado.	67 %	33 %	0 %	0 %	0 %
4. Logré comprender claramente los contenidos impartidos.	67 %	33 %	0 %	0 %	0 %
5. Los contenidos teóricos son aplicables en forma experimental.	93 %	7 %	0 %	0 %	0 %
6. Es claro el rol que cumplen las protecciones en un SEP.	93 %	7 %	0 %	0 %	0 %
7. Comprendí qué elementos componen un sistema de protección y la forma en que interactúan.	53 %	40 %	7 %	0 %	0 %
8. La actividad permite un acercamiento al mundo real de los sistemas eléctricos de potencia y sus aplicaciones.	93 %	7 %	0 %	0 %	0 %
9. La experiencia es un aporte a mi desempeño como profesional.	93 %	0 %	7 %	0 %	0 %

Tabla 5.4: Resultados de la sección III de la encuesta.

Aspecto	Ponderación				
	5	4	3	2	1
1. ¿Fue de su interés la experiencia?	80 %	20 %	0 %	0 %	0 %
2. ¿Se encuentra satisfecho con la experiencia?	67 %	33 %	0 %	0 %	0 %
3. ¿El nivel de dificultad de la experiencia es adecuada?	60 %	33 %	7 %	0 %	0 %
4. ¿El profesor auxiliar tuvo un buen desempeño?	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
5. ¿El laboratorio cuenta con buenas condiciones de trabajo? (orden, material, equipos y seguridad).	60 %	33 %	0 %	7 %	0 %
6. ¿Calificaría como excelente la actividad en forma global?	67 %	33 %	0 %	0 %	0 %

5.3. Análisis resultados

Para validar la confiabilidad de la satisfacción de los alumnos en ambas experiencias, se utilizó un coeficiente llamado “alfa de Cronbach” [21]. Este coeficiente sirve para calcular la confiabilidad (confianza que conceden los datos) y validez (grado con que el instrumento mide lo que se pretende medir) del instrumento. La fórmula con que se obtiene este parámetro es:

$$\alpha = \frac{K}{K - 1} \cdot \left(1 - \frac{\sum S_i^2}{S_{sum}^2} \right) \quad (5.1)$$

Donde:

- K es el número de ítems.
- $\sum S_i^2$ corresponde a la suma de las varianzas de cada ítem.
- S_{sum}^2 corresponde a la varianza de la prueba total.

Así, con los datos entregados por los estudiantes para ambas secciones de evaluación, se procedió a calcular el alfa de Cronbach para ambas experiencias de la siguiente manera:

- Evaluar la confiabilidad de la experiencia, a partir de los ítems II y III en forma independiente.
- El punto anterior debe ser realizado para ambas experiencias.
- Comparación en los resultados obtenidos.

Los coeficientes obtenidos se observan en la tabla 5.5. Para evaluar el desempeño de la experiencia de protecciones, se utilizará el criterio utilizado por los autores George y Mallery [21], que sugieren las siguientes recomendaciones para evaluar el alfa de Cronbach:

- Coeficiente $\alpha \geq 0.9 \rightarrow$ Excelente
- Coeficiente $\alpha \geq 0.8 \rightarrow$ Bueno
- Coeficiente $\alpha \geq 0.7 \rightarrow$ Aceptable
- Coeficiente $\alpha \geq 0.6 \rightarrow$ Cuestionable
- Coeficiente $\alpha \geq 0.5 \rightarrow$ Pobre
- Coeficiente $\alpha < 0.5 \rightarrow$ Inaceptable

Tabla 5.5: Coeficiente alfa de Cronbach según secciones.

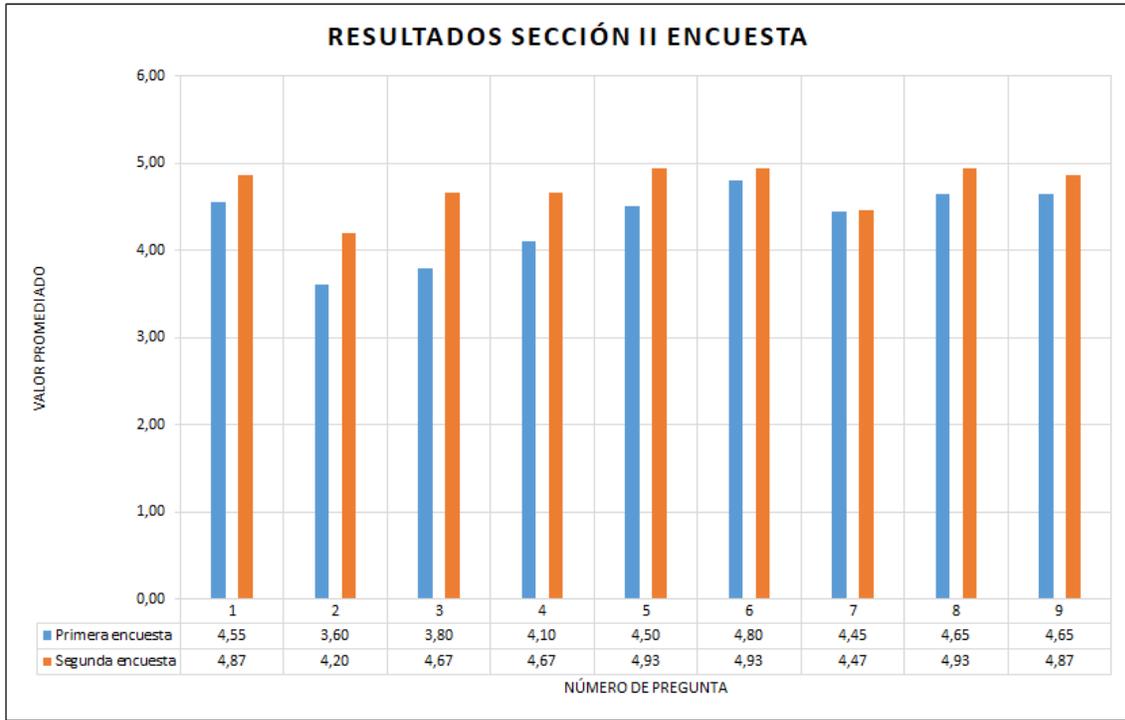
Experiencia	α Sección 2	α Sección 3
Primera aplicación	0.97	0.95
Segunda aplicación	0.91	0.84

Con los resultados presentados en la tabla 5.5, se obtiene que, a partir del criterio de anteriormente nombrado, la encuesta tiene validez en los aspectos que se están midiendo. Los aspectos corresponden a aquellos de índole técnico, presente durante la experiencia y el nivel de conformidad de los alumnos. Dicha encuesta obtiene un grado de “excelente” para una primera instancia, y un grado de “bueno” para la instancia posterior, logrando obtener un nivel de validez adecuada para los resultados que se obtendrán. Cabe destacar, que existen factores que afectan al grado de confiabilidad, tales como:

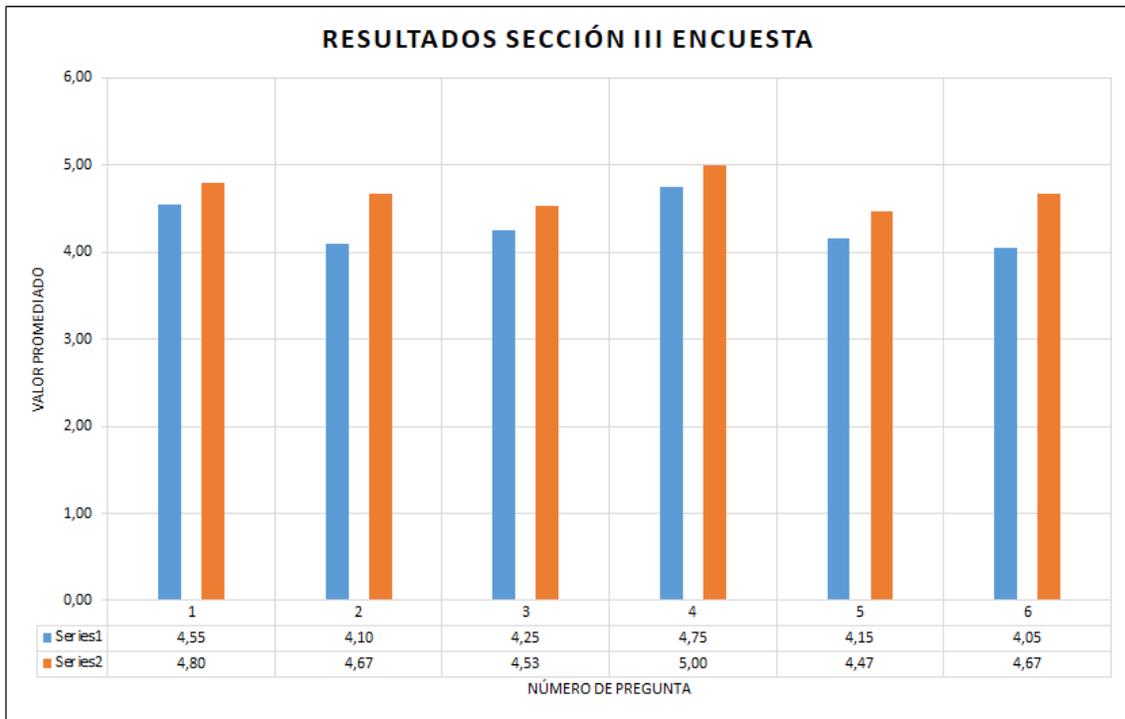
1. Homogeneidad del grupo: El coeficiente de confiabilidad se afecta por la diferencia entre los sujetos. Mientras mayor es la dispersión de las puntuaciones, mayor es la confiabilidad, por lo que una población homogénea implica un coeficiente menor.
2. Tiempo: La rapidez con que se deba contestar una encuesta trae consigo dificultad para algunos sujetos, por lo que es una variable que debe ponerse en duda.
3. Tamaño del cuestionario: Mientras más largo es el instrumento, mayor es la confiabilidad que posee producto de que con un mayor número de ítems el universo es mejor representado y la varianza aumenta.
4. Objetividad del proceso: Mientras mayor objetividad tengan los sujetos al determinar la puntuación de un instrumento, mayor confiabilidad trae.

Así, la disminución en el coeficiente alfa de Cronbach puede deberse a los factores 1 y 4 presentados en esta misma sección, puesto que los cursos en que se impartió el laboratorio son distintos y los alumnos poseían una relación distinta con el ayudante a cargo de la experiencia. Lo anterior es reforzado al observar que para la sección III de la encuesta, la ponderación que se le entrega al desempeño del profesor auxiliar es de las más altas, logrando un nivel de 4,75 y 5 para cada experiencia.

En la figura 5.5 se presenta cómo varió la ponderación de los resultados obtenidos para ambas experiencias. Es claro ver un aumento en los logros obtenidos en todas las secciones de ambas encuestas, en donde en la sección II los tres ponderadores que más se incrementaron (de mayor a menor) fueron el 3, 2 y 5, que se relacionan con el nivel de profundización adecuado, la claridad del material para su entendimiento y la capacidad de implementar en forma experimental los contenidos teóricos respectivamente. Por otro lado, en la sección III los tres ponderadores que más se incrementaron (de mayor a menor) fueron el 2,6 y 3, los cuales se relacionan con la satisfacción de la experiencia, la posibilidad de calificar la experiencia como “excelente” y el nivel de dificultad respectivamente. Así, se comprueba la efectividad de tener en consideración la opinión de los estudiantes para mejorar la experiencia, logrando mejoras significativas que se ven reflejadas en la satisfacción de los estudiantes al realizar la experiencia y la facilidad de comprensión en los contenidos.



(a) Sección II.



(b) Sección III.

Figura 5.5: Resultados promediados según escala de Likert según encuesta.

Capítulo 6

Conclusiones

A partir de lo expuesto, es posible verificar el cumplimiento del objetivo general del presente trabajo, el cual es la obtención de una nueva experiencia en el laboratorio de energía y accionamientos del DIE para el estudio de nuevos esquemas de protecciones, a partir del uso de dispositivos modernos. Esta propuesta obtuvo una gran aceptación por parte del estudiantado que llevó a cabo la actividad, obteniendo una propuesta final a partir del conjunto de experiencias iniciales. Todo el material generado se encuentra en las secciones 8.4, 8.5, 8.6, 8.7 y 8.8 de anexos.

A partir de la metodología propuesta, se utiliza una encuesta para medir la satisfacción de los estudiantes y el cumplimiento de objetivos. Para ello, se obtiene el grado de validez de esta herramienta de cuantificación a partir del coeficiente de alfa de Cronbach, logrando en ambas experiencias de laboratorio las dos ponderaciones más altas de validación. En este contexto, los resultados obtenidos presentan una clara mejora en su ponderación, obteniendo para todos los items un aumento significativo. Lo anterior, producto de la retroalimentación que pueden entregar los alumnos a partir de dicha encuesta y que son utilizados como mejoras futuras a partir de lo propuesto en la metodología.

En el contexto anterior, es posible verificar la importancia que presenta la consideración de la opinión de los estudiantes para la inclusión de mejoras futuras. Además, con los resultados obtenidos se logra validar la metodología propuesta para la creación de una nueva experiencia práctica, la cual es aplicable no solo para la temática presente, sino que puede ser utilizada para la creación de una nueva experiencia de laboratorio con temas totalmente diversos. Cabe destacar, que de los resultados se puede observar que aquellos estudiantes que realizaron la experiencia afirman que ésta es una aporte a su desempeño profesional.

De esta forma se formula una nueva experiencia de laboratorio en temática de protecciones a partir de experiencias previas, las cuales fueron actividades de prueba y fueron realizadas en los cursos EL7045 - Micro-redes y Generación Distribuida y EL5203 - Laboratorio de Energía. Dicha experiencia es capaz de acercar a los estudiantes a un área dentro de la malla curricular del Departamento que será reforzada por esta experiencia. Además, dicha experiencia presenta una contribución al perfil de egreso al aportar a las competencia de los estudiantes, en donde dicha contribución es confirmada por éstos a partir de las encuestas

realizadas.

Trabajo futuro

Si bien la metodología propuesta y el trabajo realizado entrega una novedosa experiencia de protecciones, aun queda mucho potencial por explotar de la variada gama de dispositivos presente en el Laboratorio de Energía y Accionamientos.

Por un lado, se tienen los dispositivos de protección REC y REL marca ABB, los cuales se encuentran monitoreando las barras 1 y 6 respectivamente. Si dichos dispositivos logran ser coordinados con el relé F35 de la marca General Electric, el laboratorio lograría poseer una micro-red con tecnología de protección de punta al incluir temáticas de comunicación, siendo capaz de generar actividades de coordinación para una gran cantidad de barras a partir de un mayor número de dispositivos. Así, se lograría ampliar el alcance actual de la experiencia y podría generar una actividad con una mayor cercanía a la realidad del mundo laboral en esta área.

Por otro lado, un aspecto interesante sería el de lograr la creación de una experiencia de protecciones para una micro-red en modo isla, en donde se logren incluir diversas unidades de generación distribuida a la red actual. Para ello, alguno de los equipos presentes en el laboratorio, tales como el generador eólico y los terminales del arreglo de paneles solares presente en el techo, podrían ser incorporados a la micro-red. Además, la inclusión de un sistema de almacenamiento y la conexión del grupo electrógeno presente en las dependencias del DIE lograrían una buena representación este tipo de red, obteniendo diversos esquemas de funcionamiento y acercando al estudiantado a problemáticas más contingentes y actuales, ampliando la misma experiencia de protecciones a una segunda, la cual puede basarse en sistemas de protección adaptativos.

Finalmente, de lo anterior nace una tremenda posibilidad de explotar este elemento para diversas temáticas, yendo más allá del área de potencia. Dentro de éstas se pueden encontrar el área de control y sus esquemas de regulación para las variables de la micro-red y el área de telecomunicación con sus desafíos en comunicación veloz y robusta de diversos dispositivos.

Capítulo 7

Bibliografía

1. V. F. Pires, L. S. Martins, T. G. Amaral, R. Marçal, R. Rodrigues, and M. M. Crisóstomo, “Distance-learning power-system protection based on testing protective relays,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2433–2438, 2008.
2. K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, “A Fault Clearing Method in Converter-Dominated Microgrids with Conventional Protection Means,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 6, pp. 4628–4640, 2016.
3. O. Núñez, R. Palma Behnke, F. Valencia P. Mendoza A, “Integrated Protection and Monitoring System Operation of Isolated Microgrids”, working paper.
4. Sakumar M. Brahma, J. Trejo J. Stamp, “Insight into Microgrid Protection”, *IEEE ISGT Europe*, 2014.
5. O. Nunez, F. Valencia, P. Mendoza-Araya, R. Palma-Behnke, G. Jimenez, and J. Cotos, “Microgrids protection schemes,” in *CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies*, Proceedings of IEEE Chilecon 2015, 2016, pp. 597–602.
6. R. M. Tumilty, M. Brucoli, G. M. Burt T. C. Green, “Approaches to Network Protection for Inverter Dominated Electrical Distribution Systems”, Imperial College London UK, 2006.
7. Guía Operación SEP, laboratorio de energía (EL-5203), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
8. M. Rasheduzzaman, B. H. Chowdhury, and S. Bhaskara, “Converting an old machines lab into a functioning power network with a microgrid for education,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 1952–1962, 2014.
9. Y. Zhangang, C. H. E. Yanbo, and W. Chengshan, “Construction , Operation and Control of a Laboratory-Scale Microgrid,” pp. 1–5.
10. D. J. Cornforth, A. Berry, and T. Moore, “Building a microgrid laboratory,” 8th Int. Conf. Power Electron. - ECCE Asia "Green World with Power Electron. ICPE 2011-ECCE Asia, pp. 2035–2042, 2011.
11. B. A. Vaccaro, M. Popov, D. Villacci, and V. Terzija, “An Integrated Framework for Smart Microgrids Modeling , Communication , and Verification,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 119–132, 2011.

12. S. Mirsaedi, D. Mat Said, M. Wazir Mustafa, M. Hafiz Habibuddin, and K. Ghafari, "An analytical literature review of the available techniques for the protection of micro-grids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 58, pp. 300–306, 2014.
13. A. Pahwa and T. R. Ward, "Teaching power system protection with industry's cooperation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 363–369, 1992.
14. F. Shahnia, M. Moghbel, and H. H. Yengejeh, "Motivating Power System Protection Course Students by Practical and Computer-Based Activities," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 59, no. 2, pp. 81–90, 2016.
15. S. Brahma et al., "The education and training of future protection engineers: Challenges, opportunities, and solutions," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 2, pp. 538–544, 2009.
16. V. Salehi, A. Mohamed, A. Mazloomzadeh, and O. A. Mohammed, "Laboratory-based smart power system, part I: Design and system development," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1394–1404, 2012.
17. L. Trujillo and A. Conde, "Herramienta educativa para la formación de ingenieros en protecciones eléctricas: relevador de distancia", *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XIII, no. 2, México DF, pp. 215-225, 2012.
18. P. Montané, "Protecciones en las Instalaciones Eléctricas. Evolución y Perspectivas", segunda edición, España, Boixareu Editores, 1991.
19. S. de E. y Combustible, "Electricidad instalaciones de consumo en baja tensión," *Oct.* 2003, p. 175, 2003.
20. GE Digital Energy, F35 Multiple Feeder Protection System, UR Series Instruction Manual, Ontario, Canadá, September 2013.
21. George D. and Mallery P. , *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference. 11.0 update (4th ed.)*. Boston: Allyn Bacon, vol. 11.0 updat, no. 1365–2141 (Electronic) LA-eng PT–Journal Article SB–IM. 2003.

Capítulo 8

Anexos

8.1. Manual Rele Multilin F35



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

DOCUMENTO LABORATORIO DE ENERGÍA Y ACCIONAMIENTOS

Manual Relé Multilin F35

Guía rápida

Profesor:
Patricio Mendoza A.

Alumno:
Pablo González I.

Índice general

Índice general	1
1. Introducción	2
2. Topología	3
3. Configuración F35 Multiple Feeder Protection System	7
3.1. Enervista	8
3.1.1. Settings	8
3.1.2. Actual Values	10
3.2. Programación del F35	11
4. Bibliografía	14

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) están en constantes cambios producto de los avances tecnológicos que se dan en variadas áreas. En particular, la inclusión de energías renovables no convencionales (ERNC) si bien traen grandes beneficios, también es claro que imponen desafíos a la operación de los SEP. Estos desafíos se ven acentuados por la inserción gradual de micro-redes y generación distribuida (GD).

En el contexto de las micro-redes, los esquemas de protección se han instaurado como un tema relevante de investigación. En este marco, la coordinación de protecciones dentro de éstas se ha vuelto una de las problemáticas más desafiantes producto de los bajos niveles de corrientes de cortocircuito y cambios significativos de topología durante el día.

El presente documento corresponde a una guía rápida para entender cómo configurar de una manera sencilla el relé multilin modelo F35 de la marca General Electric, presente en las dependencias del Laboratorio de Energía y Accionamientos del Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica de la Universidad de Chile. De esta forma, se desarrolla un paso a paso que va desde la presentación de los softwares necesarios para su accionamiento y configuración, como los pasos a seguir para cada una de las posibles configuraciones que se pueden realizar.

Sin embargo, cabe destacar que para tener una comprensión más profunda de las capacidades del dispositivo y su configuración, es necesario dirigirse al manual oficial del dispositivo. Éste puede ser descargado en forma gratuita desde <https://www.gegridsolutions.com/app/ViewFiles.aspx?prod=f35type=3> y presenta una detallada descripción.

Capítulo 2

Topología

Dentro de laboratorio de energía y accionamientos, ubicado en el cuarto piso del DIE, se encuentra la micro-red de 5 barras, cuya topología se puede apreciar en la imagen 2.1, en donde se aprecian 3 relés:

- F35 Multiple Feeder Protection System (General Electric), encargado de monitorear las barras 3, 4 y 5.
- REC650 - Bay Control (ABB), encargado de monitorear la barra 1.
- REL650 - Line Distance Proteccion (ABB), encargado de monitorear la barra 6.

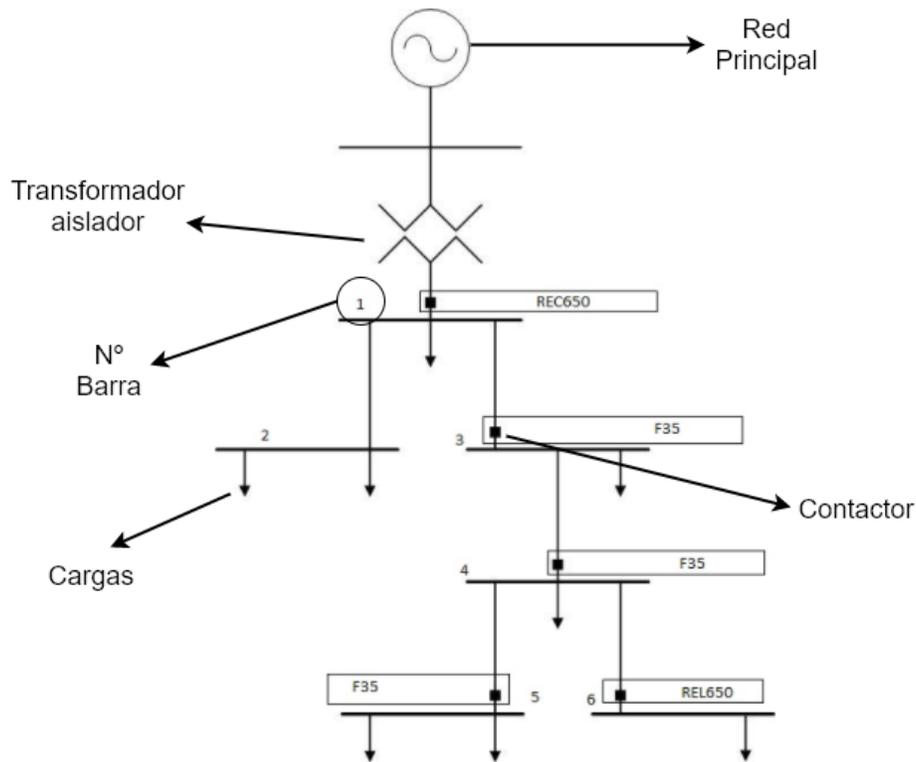


Figura 2.1: Topología microrred.

En la figura 2.2 se puede encontrar la topología que tiene cada una de las barras de la micro-red. El software “OPC Test Client” (figura 2.3) accede al accionamiento del contactor principal “K2” que genera el consumo de una carga trifásica.

El “medidor PM” es una unidad de monitoreo directamente enlazada al software anterior y que realiza la entrega del valor de variables de corriente, tensión, armónicos, frecuencia y potencia activa y reactiva.

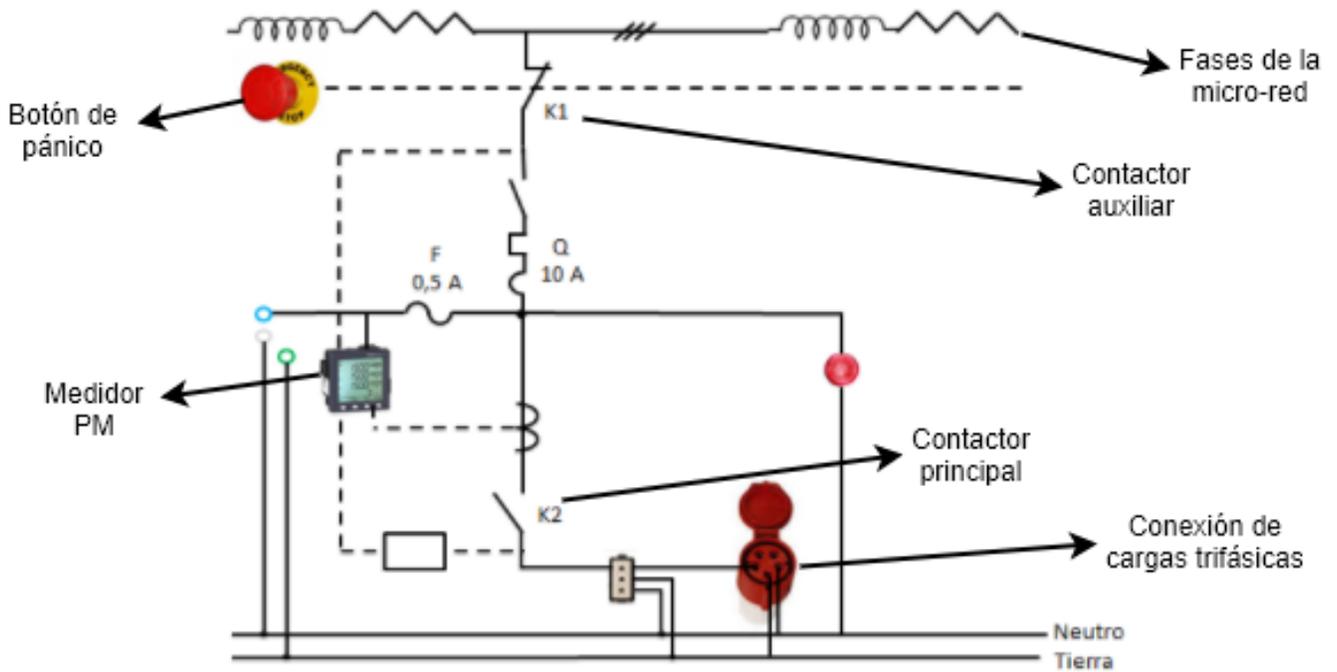
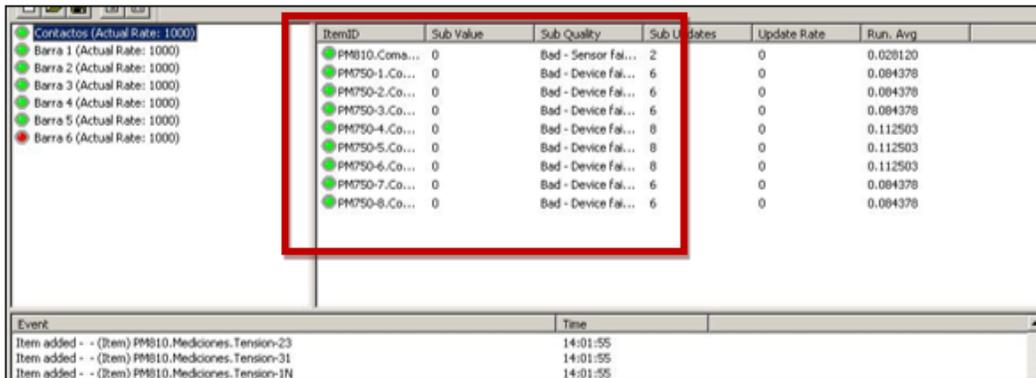


Figura 2.2: Diagrama unilineal barra microrred.

La activación de la toma de carga es accionada mediante el software OPC client, cuya plataforma se puede apreciar en la figura 2.3. Un punto importante a destacar es que este software muestra los datos recibidos por los elementos enlazados a él a partir de los correctos códigos de comando escritos en un archivo txt. En la imagen 2.4, se puede apreciar el formato en que el software puede leer los datos provenientes de los PM.



ItemID	Sub Value	Sub Quality	Sub I...	Update Rate	Run. Avg
PM810.Coma...	0	Bad - Sensor fai...	2	0	0.028120
PM750-1.Co...	0	Bad - Device fai...	6	0	0.084378
PM750-2.Co...	0	Bad - Device fai...	6	0	0.084378
PM750-3.Co...	0	Bad - Device fai...	6	0	0.084378
PM750-4.Co...	0	Bad - Device fai...	8	0	0.112503
PM750-5.Co...	0	Bad - Device fai...	8	0	0.112503
PM750-6.Co...	0	Bad - Device fai...	8	0	0.112503
PM750-7.Co...	0	Bad - Device fai...	6	0	0.084378
PM750-8.Co...	0	Bad - Device fai...	6	0	0.084378

Event	Time
Item added - (Item) PM810.Mediciones.Tension-23	14:01:55
Item added - (Item) PM810.Mediciones.Tension-31	14:01:55
Item added - (Item) PM810.Mediciones.Tension-IN	14:01:55

Figura 2.3: Software OPC client ya abierto.

```
[PM810(ALIASES)]
Mediciones.Corriente-F1=R1100
Mediciones.Corriente-F2=R1101
Mediciones.Corriente-F3=R1102
Mediciones.Corriente-Neutro=R1103
Mediciones.Corriente-Media=R1105

Mediciones.Tension-12=R1120
Mediciones.Tension-23=R1121
Mediciones.Tension-31=R1122
Mediciones.Tension-Media-FF=R1123

Mediciones.Tension-1N=R1124
Mediciones.Tension-2N=R1125
Mediciones.Tension-3N=R1126
Mediciones.Tension-Media-FN=R1128

Mediciones.Potencia-Activa-F1=R1140
Mediciones.Potencia-Activa-F2=R1141
Mediciones.Potencia-Activa-F3=R1142
Mediciones.Potencia-Activa-Total=R1143

Mediciones.FP_Real-Total=R1163
Mediciones.FP_Real_Alterno-Total=R1167
Mediciones.FP_Desplazamiento-Total=R1171
Mediciones.FP_Desplazamiento_Alterno-Total=R1175

Mediciones.Frecuencia=R1180

Salidas.Estado_Digital-1=R4005
Entradas.Estado_Digital-1=R4000

Comandos.Ejecutar=R8000
Comandos.Parametro1=R8001
Comandos.Parametro2=R8002
Comandos.Puntero_Comandos=R8017
Comandos.Puntero_Resultados=R8018
Comandos.Puntero_Datos=R8019

[PM750-9(ALIASES)]
Mediciones.Corriente-Media=R4012
Mediciones.Corriente-F1=R4020
Mediciones.Corriente-F2=R4021
Mediciones.Corriente-F3=R4022
Mediciones.Corriente-Neutro=R4023
```

Figura 2.4: Archivo txt. para ingreso de datos a OPC client.

Capítulo 3

Configuración F35 Multiple Feeder Protection System

Este dispositivo (figura 3.1) es un relé tipo universal, programable, capaz de proteger múltiples puntos según las necesidades del usuario y la configuración de elementos de entrada/salida. Este modelo, tiene una capacidad máxima de protección de sobre corriente de tres puntos. Para su configuración, se utiliza el software “Enervista”, el cual es libre y puede ser descargado en forma gratuita siguiendo los siguientes pasos:

1. Ingresar a www.gegridsolutions.com
2. Crear un usuario.
3. En el buscador que aparece escribir “Enervista”.
4. Seleccionar el software “Viewpoint Engineer”.

GE
Digital Energy

F35 Multiple Feeder Protection System

UR Series Instruction Manual

F35 Revision: 7.1x

Manual PIN: 1601-0106-ZZ (GEX-119516A)



Figura 3.1: Manual de instrucciones del relé F35.

3.1. Enervista

El software se encuentra en el escritorio del computador N° 5 del Laboratorio de Energía y Accionamientos, frente a la micro-red. Se debe abrir el icono llamado “Viewpoint UR Engineer”, en donde una vez abierto aparecerá la ventana de la figura 3.2. Al lado izquierdo aparecerá una pestaña con el nombre “LabEnergia”, que posee la configuración de enlace para realizar la configuración de protección para las barras 3, 4 y 5.

Una vez expandida la pestaña anterior, aparecerán tres pestañas extra, en la cual se encontrará una con el nombre “F35Red”. Al expandirla comenzará el proceso de enlace entre el computador y el relé, en caso de no realizarse dicha conexión, se debe revisar el enlace por cable de ambos dispositivos. Así, aparecerán diversas subpestañas, en donde a continuación, se explicarán las más relevantes para la configuración del sistema de protección.



Figura 3.2: Ventana software Enervista

3.1.1. Settings

Es la pestaña más importante del software, pues en ella se pueden configurar las entradas y salidas, la oscilografía resultante de la activación de la protección, las curvas a utilizar, etc. A continuación se describen las subsecciones y lo que se puede encontrar dentro de cada una de ellas.

Product Setup

- **Communications:** Aquí se pueden configurar la comunicación de los equipos. Dentro de las herramientas se pueden visualizar los puertos seriales, los protocolos utilizados y el mapeo utilizado.
- **Fault Report:** Es donde se pueden acceder a la configuración de los reportes de fallas, es decir, se pueden seleccionar la fuente de accionamiento (en este caso la barra) y el “Trigger”, que corresponde a la salida virtual que manda la señal de disparo y que equivale a la salida de la protección configurada que se explicará más adelante.

- **Oscillography:** Accede a la configuración de la oscilografía, la cual entrega en forma gráfica la variación de la corriente y tensión por fase. Los parámetros son los siguientes:
 - **Number Of Records:** Entrega el número máximo de pruebas que puede almacenar el equipo. Un mayor número de grabaciones implica menor capacidad de resolución.
 - **Trigger position:** Corresponde al punto en donde se genera la señal de disparo. Un mayor porcentaje de esta variable implica un menor almacenamiento de datos después de la señal de disparo. Se recomienda variarla según conveniencia, con el percance de eliminar todas las oscilografías almacenadas.
 - **Trigger Source:** Se selecciona la salida virtual que activará el comienzo de la grabación de los datos. En caso de no sincronizar este parámetro con la barra donde se espera accionar la protección, el software no procederá a guardar los datos.
 - **Disc Channel:** Se selecciona todas las señales que deseen ser grabadas.

System Setup

- **AC Inputs:** Se configura la razón de los transformadores de corriente y la razón de las tensiones de entrada al equipo.
- **Flex Curves:** Se pueden configurar hasta cuatro curvas de protección en forma manual, o bien, acceder a una curva comúnmente utilizada y realizar variación a libre elección.

FlexLogic

En la opción “FlexLogic Equation Editor” uno accede a la ventana donde se configura la protección que se desea utilizar. Cabe destacar que debe utilizarse lógica booleana, tal como se presenta en la figura 3.5.

Grouped Elements

Corresponde a la opción donde se configura la elección de protección a utilizar en cada barra del sistema. Existen 6 grupos de configuración, en donde por defecto siempre es el grupo 1 el que tiene la activación predefinida. Si se desea activar otro grupo, esto debe realizarse en la sección “Control Elements” → “Setting Groups”.

Dentro de cada grupo se encuentran los siguientes elementos de configuración:

- **Phase Current:** Se pueden configurar curvas de sobre corriente de tiempo inverso “TOC” y curvas de sobre corriente instantánea “IOC”.
- **Neutral Current:** Se pueden configurar curvas de sobre corriente de tiempo inverso y sobre corriente instantánea pero por neutro.
- **Ground Current:** Se pueden configurar curvas de sobre corriente de tiempo inverso y sobre corriente instantánea pero por tierra.
- **Negative Sequence Current:** Se pueden configurar curvas de sobre corriente de tiempo inverso y sobre corriente instantánea pero por fase negativa de secuencia.
- **Voltage Elements:** Se configuran las protecciones de baja tensión (UV) y sobre tensión (OV), tanto para acción primaria como auxiliar.

Inputs/Outputs

Esta opción entrega todas las opciones para configurar las entradas y salidas que tomarán un papel importante en el funcionamiento del relé F35. Se pueden configurar tanto las puertas virtuales (Virtual Inputs y Virtual Outputs) como las puertas físicas (Contact Inputs y Contact Outputs).

3.1.2. Actual Values

Esta sección entrega las herramientas para observar simulaciones, ver los estados de las salidas y entradas, además de ver el valor numérico de las variables monitoreadas.

Status

Se puede monitorear las variables y el estado en el que están (On/Off). Por ejemplo, se puede monitorear el estado de las variables virtuales ,contactos, estado de conexiones de transmisión de datos, etc.

Metering

En esta sección al dirigirte a “Source”, se pueden monitorear los valores de las variables que estan siendo analizados desde la red. Por ejemplo, se pueden obtener los valores actuales de las corrientes por fase, voltaje por fase, frecuencia, nivel de armónicos, etc.

Records

Se tiene acceso a los reportes de fallas en la sección “Fault Reports” y a las oscilografías en “Oscillography”. De estos se puede extraer datos como: magnitud de la variable antes y durante la falla, tipo de protección que se activo, salida virtual activada y la toma de datos en forma gráfica. Como se explicará más adelante, es posible guardar estos documentos y utilizarlos a partir del mismo software en cualquier otro computador gracias a que el software es de libre acceso.

3.2. Programación del F35

La parte más importante corresponde a la programación de las protecciones, y lo fundamental es entender que todo el sistema es programado a partir de lógica booleana tal como se puede apreciar en la figura 3.5, por lo que toda entrada al sistema se ve reflejado a partir de un bit (1 ó 0), o bien, una entrada TRUE o FALSE. Los pasos para la realización de un sistema de protección son los siguientes:

- Ubicar la pestaña para ingresar los comandos. Para ello dirigirse a: LabEnergía → F35Red → Settings → FlexLogic → FlexLogic Equation Editor
- Aparecerá una ventana como la de la imagen 3.5.
- Se ingresan los elementos de protección (que tipo de protección se utilizará). Existen protecciones de baja tensión, sobrecorriente, baja frecuencia, entre los más conocidos.
- Se eligen los contactores físicos sobre los cuales se actuará la protección.
- Toda la programación se hace en base a lógica booleana, por lo que las entradas que accionan la protección deben pasar por una compuerta lógica (and,or, etc).
- La compuerta lógica final se debe asociar a una salida virtual, la cual a su vez se asocia a un contactor según los siguientes pasos: LabEnergía → F35Red → Settings → Inputs/Outputs → Contact Outputs.
- Se activa el contactor de la barra con su salida virtual correspondiente como se muestra en la imagen 3.3.

SETTING	PARAMETER
[H1] Contact Output 1 ID	Cont Op 1
[H1] Contact Output 1 Operate	Virt Op 4 On (V04)
[H1] Contact Output 1 Seal-In	OFF
[H1] Contact Output 1 Events	Enabled
[H2] Contact Output 2 ID	Cont Op 2
[H2] Contact Output 2 Operate	Virt Op 5 On (V05)
[H2] Contact Output 2 Seal-In	OFF
[H2] Contact Output 2 Events	Enabled
[H3] Contact Output 3 ID	Cont Op 3
[H3] Contact Output 3 Operate	Virt Op 6 On (V06)
[H3] Contact Output 3 Seal-In	OFF
[H3] Contact Output 3 Events	Enabled
[H4] Contact Output 4 ID	Cont Op 4
[H4] Contact Output 4 Operate	OFF
[H4] Contact Output 4 Seal-In	OFF
[H4] Contact Output 4 Events	Enabled

Figura 3.3: Cuadro Contactores/Salidas Virtuales.

- Se puede activar los eventos para el contactor correspondiente asignando "enabled" en el último cuadro de la asignación.
- Finalmente apretando "view" en la imagen 3.5, se puede visualizar el diagrama de bloques con las compuertas lógicas correspondientes de la protección programada (imagen 3.4).

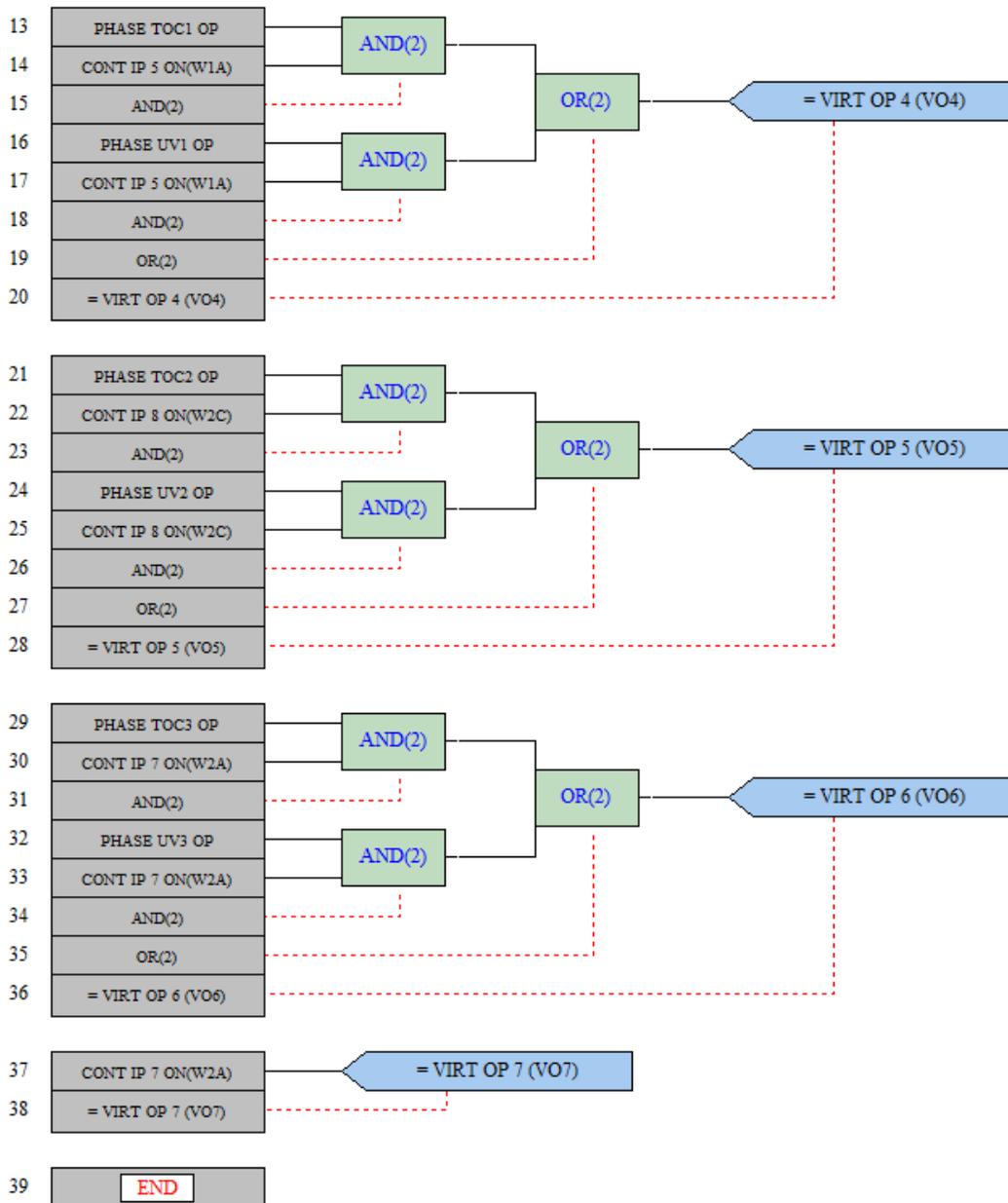


Figura 3.4: Cuadro con diagramas de bloques programados.

Cabe destacar que las funciones de sobre corriente y baja tensión activadas en la imagen 3.5, son:

- PHASE TOC OP: Al menos una fase de la curva de tiempo de sobre corriente fue operada.
- PHASE UV1 OP: Al menos una fase de la curva de tiempo de baja tensión fue operada.

FlexLogic Entry 13	Protection Element	PHASE TOC1 OP
FlexLogic Entry 14	Contact Inputs On	Cont Ip 5 On(W1a)
FlexLogic Entry 15	AND	2 Input
FlexLogic Entry 16	Protection Element	PHASE UV1 OP
FlexLogic Entry 17	Contact Inputs On	Cont Ip 5 On(W1a)
FlexLogic Entry 18	AND	2 Input
FlexLogic Entry 19	OR	2 Input
FlexLogic Entry 20	Assign Virtual Output	= Virt Op 4 (V04)
FlexLogic Entry 21	Protection Element	PHASE TOC2 OP
FlexLogic Entry 22	Contact Inputs On	Cont Ip 8 On(W2c)
FlexLogic Entry 23	AND	2 Input
FlexLogic Entry 24	Protection Element	PHASE UV2 OP
FlexLogic Entry 25	Contact Inputs On	Cont Ip 8 On(W2c)
FlexLogic Entry 26	AND	2 Input
FlexLogic Entry 27	OR	2 Input
FlexLogic Entry 28	Assign Virtual Output	= Virt Op 5 (V05)
FlexLogic Entry 29	Protection Element	PHASE TOC3 OP
FlexLogic Entry 30	Contact Inputs On	Cont Ip 7 On(W2a)
FlexLogic Entry 31	AND	2 Input
FlexLogic Entry 32	Protection Element	PHASE UV3 OP
FlexLogic Entry 33	Contact Inputs On	Cont Ip 7 On(W2a)
FlexLogic Entry 34	AND	2 Input
FlexLogic Entry 35	OR	2 Input
FlexLogic Entry 36	Assign Virtual Output	= Virt Op 6 (V06)
FlexLogic Entry 37	Contact Inputs On	Cont Ip 7 On(W2a)
FlexLogic Entry 38	Assign Virtual Output	= Virt Op 7 (V07)
FlexLogic Entry 39	End of List	

Figura 3.5: Ventana para redactar comandos de creación para protecciones.

Capítulo 4

Bibliografía

- F35 Multiple Feeder Protection System, UR Series Instruction Manual.
- Infraestructura de Hardware y Software para Desarrollo de Sistemas de Protección en Microredes de Baja Tensión, Mauricio Jorge Neut Santos, Memoria para optar al título de ingeniero civil electricista.
- Guía Operación SEP, laboratorio de Energía (EL 5203), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

8.2. Paper conferencia CHILECON

Development of a Microgrid Protection Laboratory Experiment for the Study of Overcurrent and Undervoltage Functions

Oscar Nuñez-Mata
Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Universidad de Chile
Santiago, Chile
oscar.nunezmata@gmail.com

Pablo González-Inostroza
Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Universidad de Chile
Santiago, Chile
pablo.gonzalez.i@ing.uchile.cl

Patricio Mendoza-Araya
Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Universidad de Chile
Santiago, Chile
pmendoza@ing.uchile.cl

Guillermo Jiménez-Estévez
Centro de Energía FCFM,
Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Universidad de Chile
Santiago, Chile
gjimenez@centroenergia.cl

Abstract—Today, power systems face new challenges in different fields, such as economic, social, environmental and technical. In the technical field, a number of issues related to protection systems are recognized, due to the inclusion of distributed generation and microgrids, among other aspects. This paper presents a novel laboratory experience aimed at university students, with the objective of understanding the operation and limitations that traditional protection systems face today. This is part of the learning process of the Micro-grid and Distributed Generation course, of the Department of Electrical Engineering, University of Chile, where the requirement of complementing the class of electrical protections with a laboratory experience was detected. In this paper, the methodology for the design of the experience, including all its stages, is presented. A practical application to a group of students was included as part of the pre-assessment, with a view to including improvements to the laboratory guide. During the evaluation it was possible to verify the degree of difficulty that the students had, assess their performance, and receive comments after their completion. With all the information gathered, improvements for future instances of the experience in the coming semesters are proposed.

Keywords—Distributed power generation, microgrids, laboratories, power system protection, relays.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son parte vital para el desarrollo actual y futuro de la sociedad. Contar con un suministro eléctrico que cumpla los requerimientos de calidad, confiabilidad y seguridad es fundamental para un país. Sin embargo, hoy en día los SEP enfrentan nuevos desafíos en distintos campos, como el económico, social, ambiental y técnico [1]. Por ejemplo, en el ámbito técnico, se reconocen una serie de temas por resolver relacionados con los sistemas de protección, entre otros aspectos por la inclusión de unidades de generación distribuida (GD) y micro-redes (uR) [2]. Se requiere de un abordaje amplio para atender estos desafíos en el campo de las protecciones eléctricas. Uno de estos temas tiene que ver con el desarrollo de nuevas experiencias de formación para los futuros profesionales en ingeniería eléctrica, de forma que se comprenda el origen de los problemas y las posibles soluciones [3]. En este trabajo se presenta una novedosa experiencia de laboratorio dirigida a estudiantes universitarios, con el objetivo de conocer el funcionamiento y limitaciones que los sistemas de protección enfrentan hoy día. Lo anterior, no solo por ser una

materia fundamental en su formación, sino que, además, para que sirva de base para encarar los nuevos desafíos en este campo.

En el proceso de enseñanza y aprendizaje del curso de Micro-redes y Generación Distribuida, del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Chile, se detectó el requerimiento de complementar la clase de protecciones eléctricas con una experiencia de laboratorio. Por tal razón, el primer paso fue trabajar con distintas empresas del rubro de la fabricación de dispositivos de protección para acceder a equipos modernos. El objetivo fue renovar y actualizar el Laboratorio de Energía y Accionamientos del DIE con una plataforma que permitiera a los estudiantes programar y operar distintos esquemas de protección, y realizar pruebas de desempeño. Fue así como entre los años 2016 y 2017 se desarrolló la etapa de modernización de los equipos del laboratorio, para luego seguir con el diseño y preparación de la experiencia.

En la literatura es posible encontrar reportes de prácticas de laboratorio de protecciones desarrolladas en universidades de distintos países. Por ejemplo, en [4] se reconoce la importancia del estudio de este tema en los programas de ingeniería eléctrica, ya que, el adquirir conocimientos por medio de experiencias prácticas, tendrá un mayor impacto en los estudiantes. Se explica también, que la evaluación de un relé de protección a nivel de su operación y desempeño en un sistema eléctrico, únicamente mediante simulaciones en computador, es poco recomendado. Por lo tanto, el laboratorio es una instalación importante en el proceso de estudio de los sistemas de protección. Sin embargo, muchos centros universitarios tienen que lidiar con la limitación del equipamiento adecuado. Así, en [5] se menciona la importancia de la cooperación entre las empresas privadas y universidades, como una alternativa para dotar a estas últimas de los equipos necesarios que se utilicen en los cursos de protecciones en SEP.

En [6] y [7] se enfatiza en la necesidad de abordar los temas modernos de los sistemas eléctricos, que cada vez más incorporan infraestructura de comunicaciones y tecnologías de información para crear redes inteligentes en términos de su operación. Con el paso del tiempo van a ser menos los dispositivos de protección empleados que operan de manera autónoma y aislada. A medida que se introduzcan nuevos equipos, la función de protección se integrará más con los

sistemas de control y operación. Esto gracias a la capacidad de comunicación de los dispositivos actuales, como uno de sus beneficios potenciales, que les permitirá conectarse no sólo con un centro de control, sino también entre sí de manera bidireccional. Por lo tanto, se sugiere que las experiencias de laboratorio incluyan el tema de las redes de comunicación y la posibilidad de control y monitoreo remoto de estos dispositivos.

Finalmente, en [3] se recomienda que, dentro de las actividades incluidas en las prácticas de protecciones, se utilicen distintos recursos computacionales para el análisis de los eventos, para que sean medios de visualización de las condiciones anormales evaluadas.

Fue así como, a partir de los objetivos educativos establecidos en el curso de Micro-redes y Generación Distribuida, el equipamiento disponible en el laboratorio y la revisión de la literatura, se diseñó la experiencia de protecciones en Micro-redes y SEP presentada en este trabajo. Entre las consideraciones seguidas para su diseño están las siguientes: i) incluir las tareas de simulación previas a la experiencia, para evaluar el comportamiento que se verificará en el laboratorio; ii) centrarse en las funciones de protección de sobre corriente y baja tensión, por ser de amplio uso, y dado que no es posible cubrir la totalidad de funcionalidades de los dispositivos utilizados en una sola experiencia; iii) utilizar herramientas computacionales para la programación y visualización de los dispositivos de protección, y no hacerlo directamente en los paneles de éstos, para acercarse a la realidad del acceso remoto; finalmente, iv) utilizar herramientas computacionales para el análisis de los eventos de falla evaluados.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en el Capítulo II se presenta la metodología seguida para el diseño de la experiencia, así como el detalle de la misma. En el Capítulo III se muestran los resultados experimentales obtenidos como prueba inicial. En el Capítulo IV se presentan los resultados de la evaluación realizada por los estudiantes. Finalmente, en el Capítulo V se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

II. PROPUESTA DE EXPERIENCIA DE LABORATORIO

A. Metodología propuesta

La metodología seguida para el diseño de una experiencia de laboratorio de protecciones en SEP se presenta en la Fig. 1. En la etapa I de la Fig. 1 se definió el objetivo de la experiencia, establecido como: aplicar y probar distintas funciones de protección que actúen en caso de presentarse perturbaciones en la red eléctrica del laboratorio, y evaluar su desempeño por medio del tiempo de operación y la coordinación de protecciones. Luego, al completar la etapa II, se definen los alcances y actividades experimentales del laboratorio. Específicamente, los estudiantes deberán determinar los ajustes de las funciones de protección de sobre corriente y baja tensión. Además, se analizaron las posibles perturbaciones que se podían incluir. Se determinó que las condiciones de falla serán de tipo: sobre corriente y baja tensión. Para esto se usará la conexión de los siguientes elementos en la red:

- Una carga programable RLC trifásica variable.
- Un motor de inducción trifásico.

Al finalizar la etapa IV de la Fig. 1 se espera contar con un laboratorio de protecciones aplicable a los estudiantes del curso de Micro-redes y Generación Distribuida.

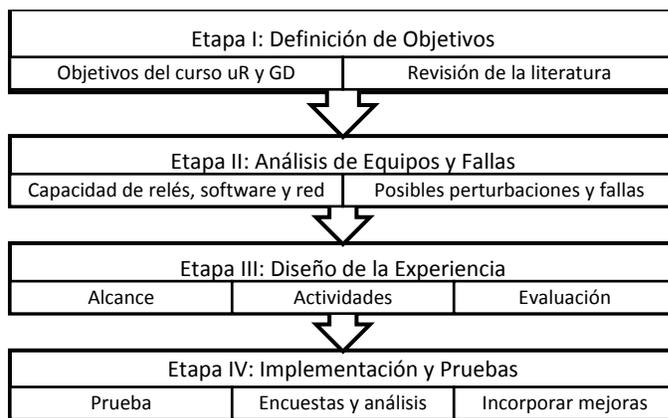


Fig. 1 Metodología para el diseño del laboratorio de protecciones en SEP

B. Experiencias de laboratorio

El trabajo de laboratorio se dividirá en tres experiencias, basadas en las funciones de protección, a saber:

- I. Uso de la función de protección de sobre corriente.
- II. Uso de la función de protección de baja tensión.
- III. Uso de las funciones de I y II combinadas.

En cada una se utilizarán curvas de tiempo inverso y de tiempo definido. A continuación, se explica cada una de ellas.

1) Función de sobre corriente

Es aquella función de protección que actúa frente a corrientes fuera de un rango de funcionamiento normal esperado. En este caso se define como umbral de falla una corriente de 2[A]. Los estudiantes programarán una función de sobre corriente de tiempo definido y de tiempo inverso. La curva inversa utilizada es de tipo estándar (curva IEC A), la cual está definida en la ecuación (1) [8].

$$T = TDM \cdot \left[\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^E - 1} \right] \quad (1)$$

donde:

T es el tiempo de operación del relé en [s].

TDM es el ajuste del marcador de tiempo.

K y E son las constantes que definen el tipo de curva.

I es la corriente medida en el secundario del transformador de corriente.

I_{pickup} es el ajuste del umbral de corriente.

Para pasar de una curva de tiempo inverso a una de tiempo definido, se deberá ajustar el marcador de tiempo TDM en un valor de 0[s]. Así, al sobre pasar el valor de corriente de pickup, la protección se activará instantáneamente. Por el contrario, cuando el relé utiliza la curva de tiempo inverso, el tiempo de

operación depende de la corriente de falla, esto es: será menor conforme mayor sea la corriente de falla, y viceversa.

Para comprobar el funcionamiento de la protección de sobre corriente, los estudiantes deben aumentar la carga variable hasta poco antes de llegar a un valor de 2[A], esperar unos segundos para corroborar que no exista disparo del interruptor. Luego, se aumenta la carga por encima del umbral de corriente para provocar el disparo. Finalmente, los estudiantes deberán comparar los tiempos de operación en los dos casos evaluados.

2) Función de baja tensión

Es aquella función de protección que actúa frente a caídas o alzas de tensión fuera de un rango de funcionamiento esperado. En este caso se utilizará una protección de baja tensión, tanto con curva inversa, como con tiempo definido. Se usará la misma carga variable de la Sección 2.B.1 para provocar una caída de tensión, lo cual será considerado como una falla. El umbral de la tensión se establece en 0,98[p.u.]. La curva de tiempo inverso de baja tensión es propia del relé utilizado, y está definida en la ecuación (2) [8].

$$T = \frac{D}{\left(1 - \frac{V}{V_{pickup}}\right)} \quad (2)$$

donde:

T es el tiempo de operación del relé en [s].

D es el ajuste del marcador de tiempo.

V es la tensión medida en el secundario de los transformadores de potencial.

V_{pickup} es el ajuste del umbral de tensión.

Para pasar de una curva de tiempo inverso a una de tiempo definido, se deberá ajustar el marcador de tiempo D en un valor de 0[s]. Así, cuando se sobrepase el valor de tensión pickup, la protección se activará instantáneamente. Por el contrario, en una curva de tiempo inverso, el tiempo de operación varía con la caída de tensión, esto es: a mayor caída de tensión, menor el tiempo de operación. Se debe señalar que la función de baja tensión tiene un ajuste mínimo de operación, en el cual, por debajo de éste, el relé no actuará. Esto es conveniente para evitar disparos erróneos cuando, por ejemplo, el sistema se energiza en primera instancia.

Para comprobar el funcionamiento de ambos tipos de protección de baja tensión, los estudiantes deben aumentar la carga variable hasta poco antes de alcanzar una caída de tensión de 0,98[p.u.], y esperar unos segundos para corroborar que no exista disparo por parte del interruptor. Finalmente, deben aumentar la carga para generar caídas por debajo de la tensión pickup, para alcanzar el disparo del interruptor. Los estudiantes deberán comparar los tiempos en los dos casos evaluados.

3) Función de protección mixta

En este caso, los estudiantes deberán configurar una protección combinando las dos funciones anteriormente estudiadas, esto es: sobre corriente y baja tensión. Cualquiera de las dos tendrá la posibilidad de generar la señal de disparo del interruptor de la barra.

La perturbación será provocada por la conexión de un motor de inducción trifásico. El motor tiene un devanado diseñado en

estrella, y los ajustes de las protecciones deben ser realizados según esta condición, es decir: si el motor parte en estrella, no debería ocurrir ningún disparo. Sin embargo, para provocar la anomalía, se hará partir el motor en conexión triángulo, provocando una sobre corriente y caída de tensión anormales. La finalidad de esta sección es combinar ambas funciones de protección alcanzando redundancia, en donde la protección de baja tensión será considerada como respaldo de la función de sobre corriente, que es la primaria.

Para realizar los ajustes de los dispositivos de protección, los estudiantes deberán realizar análisis de la red previamente, utilizando un software adecuado. Para esto, deben hacer simulaciones que establezcan los niveles de sobre corriente y caída de tensión durante el arranque del motor, para ambas conexiones. Esto servirá para establecer los parámetros del relé. Para lo anterior, se entregarán los datos de la red del laboratorio, junto con los datos del motor utilizado. Una vez definidos los ajustes, se programarán en el relé para corroborar el funcionamiento del esquema de protecciones. Los estudiantes utilizarán las ecuaciones (1) y (2) para realizar los ajustes y la coordinación de protecciones, incorporando un intervalo de tiempo de coordinación, sugerido entre 150-200[ms].

C. Descripción del equipo del laboratorio

Para realizar la experiencia diseñada en la Sección 2.B, el Laboratorio de Energía cuenta con una red de distribución según lo presenta el diagrama unilineal de la Fig. 2. Esta red incluye un punto de acople a la red principal, a través de un transformador de aislamiento de 12[kVA], 380/380[V] y 50[Hz]. La red tiene seis barras conectadas en topología radial, conectadas por medio de líneas de distribución. Los datos de la red se presentan en las tablas I, II y III.

Para la experiencia se utilizará la secuencia de barras 3, 4 y 5, las cuales son protegidas por un relé universal marca General Electric, modelo Multilin F35 [8]. Las barras 1 y 6 son protegidas por relés de la marca ABB, modelos REC650 y REL650, que no serán utilizados por ahora. Según la Fig. 2, cada barra incluye un interruptor al cual llegará la señal de disparo proveniente del relé. La señal activará una bobina de apertura remota.

En la ejecución de esta experiencia, los estudiantes utilizarán distintas herramientas computacionales. En primer lugar, se cuenta con un sistema SCADA básico, basado en un cliente OPC, utilizado para accionar los contactores de maniobra de las cargas. Además, se utiliza para visualizar las variables eléctricas en las barras de consumo. En segundo lugar, se utilizará un software de programación y visualización del relé F35, llamado Enervista, de la compañía General Electric. La Fig. 3 presenta una vista de la red del Laboratorio de Energía.

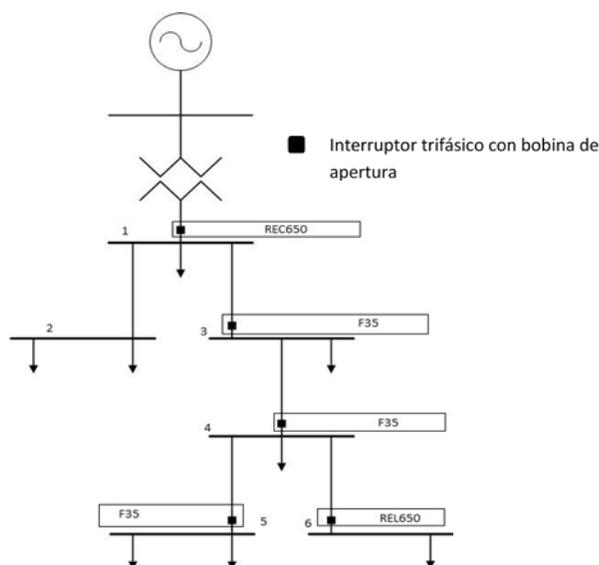


Fig. 2 Unilineal de la red utilizada en el laboratorio de protecciones

TABLA I
PARÁMETROS DE LAS LÍNEAS DE LA RED DEL LABORATORIO

Línea	R [Ω]	X [Ω]
L12	0,786	0,375
L23	0,886	0,728
L34	1,001	0,489
L45	1,271	0,552
L46	0,837	0,357

TABLA II
DATOS DEL MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO

Tipo de Conexión	Potencia [kW]	Velocidad [RPM]	Corriente nominal [A]	Corriente en vacío [A]
Estrella	1,3	1.440	3	1,4
Triángulo	4,0	1.440	9	4,5

TABLA III
DATOS BASE DEL SISTEMA EN POR UNIDAD

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia base	10.000	[VA]
Voltaje base	400	[V]
Corriente base	20	[A]

TABLA IV
PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE SOBRE CORRIENTE Y RESULTADOS DE LA SECCIÓN 2.B.1

Tipo	K	E	TDM	I_{pickup} [p.u.]	Tiempo [s]
Instantánea	-	-	0	0,1	~0,04
Inversa	0,14	0,02	1	0,1	2,8

TABLA V
PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE BAJA TENSIÓN Y RESULTADOS DE LA SECCIÓN 2.B.2

Tipo	D	V_{pickup} [p.u.]	Tiempo [s]
Instantánea	0	0,98	~0,04
Inversa	1	0,98	10



Fig. 3 Vista del Laboratorio de Energía

III. EVALUACIÓN DE LA EXPERIENCIA Y DISCUSIÓN

Para evaluar el diseño de la experiencia de laboratorio se hizo una comprobación práctica. Esta evaluación se realizó previamente al trabajo con un grupo de estudiantes. La idea fue confirmar que las actividades planeadas eran realizables, y se podían alcanzar los resultados esperados en un tiempo cercano a una hora. Los resultados experimentales más importantes se muestran en este capítulo.

En primer lugar, en las Tablas IV y V se presentan los valores de los parámetros utilizados para las dos primeras actividades (Ver Secciones 2.B.1 y 2.B.2). Además, se muestra el tiempo de operación de las funciones de protección evaluadas. En la Tabla IV se presenta la función de sobre corriente, y en la Tabla V la de baja tensión. Los datos de las bases del sistema en por unidad se muestran en la Tabla III.

De las Tablas IV y V se puede confirmar que la función de protección instantánea presentó tiempos de operación menores a 40[ms], mientras que al usar la función de tiempo inverso los tiempos fueron mayores.

Para la tercera parte de la experiencia (Ver Sección 2.B.3), es necesario hacer simulaciones previas por medio de algún software de análisis de redes. El objetivo es establecer el comportamiento de la tensión y la corriente en las barras del sistema durante la partida del motor. Los estudiantes pueden utilizar el software de su conveniencia. Para ilustrar esta situación, en la Fig. 4 se presenta el comportamiento transitorio de las tensiones de las barras 3, 4 y 5 obtenidas con el software Power Factory de DIgSILENT, con simulación RMS. Con esta información se deberán coordinar de forma correcta los ajustes del esquema de protección. Los datos del motor eléctrico se presentan en la Tabla II.

Los valores de las variables del esquema de protección y los valores de las tensiones y corrientes por las barras estarán fuertemente ligados a la ubicación en donde se conecte el motor de inducción. En la experiencia de laboratorio, esta carga se conectó a la barra 5 (Ver Fig. 2), por lo tanto, los valores presentados a continuación son válidos para esta barra.

Basándose en los resultados de las simulaciones, los estudiantes deberán ajustar los parámetros de ambas funciones de protección. La idea es que el motor logre partir en conexión estrella sin que se produzca el disparo (condición normal). Sin embargo, para la partida en conexión triángulo, el esquema de

protección deberá considerarlo como una falla, y abrirá el interruptor. Según el ajuste de la protección de sobre corriente, ésta función será más o menos sensible a esta situación, comparado con la función de baja tensión. Así, por medio del ajuste de la protección de baja tensión se deberá detectar esta condición anormal en menor tiempo.

Los valores de los parámetros para las curvas de tiempo inverso en ambas protecciones se muestran en la Tabla VI y VII. Con los parámetros mostrados en las Tablas VI y VII, el motor logró partir en conexión estrella sin presentarse disparo de la protección. Como se ve en la Tabla VI, al proteger el motor exclusivamente con la protección de sobre corriente, el tiempo de apertura del motor al partir en triángulo fue de 400[ms]. Mientras que, al proteger el motor con una función combinada, incluyendo ambas protecciones, el motor se desconectó a los 170[ms] cuando partió en triángulo. Esto es, un 42,5% del tiempo utilizando únicamente la función de sobre corriente.

Los resultados alcanzados son visibles por medio de una oscilografía, la cual es obtenida con el software Enervista. Las Figs. 5 y 6 muestran los resultados de la corriente y tensión en la barra 5, durante el arranque del motor en conexión triángulo (considerada como una falla). Con esta herramienta se puede comparar la rapidez de la protección de baja tensión al despejar la falla, respecto de la protección de sobre corriente.

IV. RESULTADOS DE LA EXPERIENCIA CON LOS ESTUDIANTES Y ENCUESTA DE EVALUACIÓN

Una validación práctica se realizó con los estudiantes del curso EL7045 Micro-redes y Generación Distribuida, del DIE, semestre otoño 2017. En primera instancia, se formaron grupos de cinco personas para hacer la práctica, estableciendo un horario específico para cada uno. Posteriormente, se les entregó la guía de laboratorio para que realizaran los cálculos y análisis de la red, previos al trabajo en el laboratorio. Dentro de las mayores dificultades que mostraron los estudiantes fue el uso de (1) y (2), correspondientes a las curvas de tiempo inverso de las protecciones. Frente a esta dificultad, los estudiantes aplicaron algunas ideas particulares, como las siguientes:

- Si es tan solo una barra la que se debe proteger, usar una protección instantánea con valores intermedios para ambas funciones.
- Ajustar la corriente y tensión de pickup para la configuración estrella, y darle un tiempo de operación suficientemente mayor para poder arrancar en triángulo.

Para rescatar todas estas observaciones y opiniones de los estudiantes, se realizó una encuesta de salida, y los resultados se presentan en esta sección. De un total de 24 estudiantes, 20 completaron la encuesta. La mayoría de estudiantes respondió que la experiencia fue de su agrado y era la primera instancia práctica y teórica en el campo de las protecciones. Además, la consideraron como de gran aporte para entender la operación y configuración de este tipo de elementos. Por otra parte, se considera que la experiencia sería mejor desarrollada con grupos más pequeños y con más tiempo de realización. Cabe destacar que, al preguntar sobre la mayor dificultad de la actividad, la mayoría apuntó al entendimiento de las curvas inversas y sus parámetros.

Dentro de la encuesta, se incluyeron cuatro secciones, definidas como: i) opinión general sobre lo más destacable y difícil; ii) evaluación de aspectos técnicos de la experiencia, utilizando una escala de ponderación de 1 a 5; iii) evaluación de aspectos de procedimiento, utilizando una escala de ponderación de 1 a 5; finalmente, iv) una opinión general para que el alumno recomiende cualquier aspecto por mejorar. Los resultados de los puntos ii) y iii) se presentan en las Tablas VIII y IX. Los porcentajes que aparecen corresponden a las respuestas obtenidas en cada ponderación. De las Tablas VIII y IX, se comprueba que la experiencia alcanzó una aprobación positiva mayoritaria. Fue de la opinión de la mayoría de estudiantes que se logró complementar el proceso de enseñanza de la teoría de protecciones vista en clase.

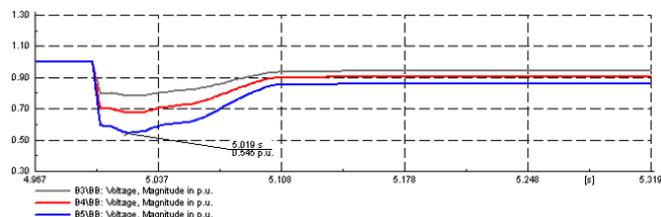


Fig. 4 Tensiones en barras durante partida en triángulo según simulación RMS

TABLE VI
PARÁMETROS DE LA PROTECCIÓN DE SOBRE CORRIENTE Y RESULTADO DE LA SECCIÓN 2.B.3 PARA LA PARTIDA EN TRIÁNGULO

K	E	TDM	I_{pickup} [p.u.]	Tiempo [s]
0,14	0,02	0,01	0,25	0,40

TABLE VII
PARÁMETROS DE LA PROTECCIÓN DE BAJA TENSIÓN Y RESULTADO DE LA SECCIÓN 2.B.3 PARTIDA EN TRIÁNGULO PARA PROTECCIÓN COMBINADA

D	V_{pickup} [p.u.]	Tiempo [s]
0,01	0,85	0,17

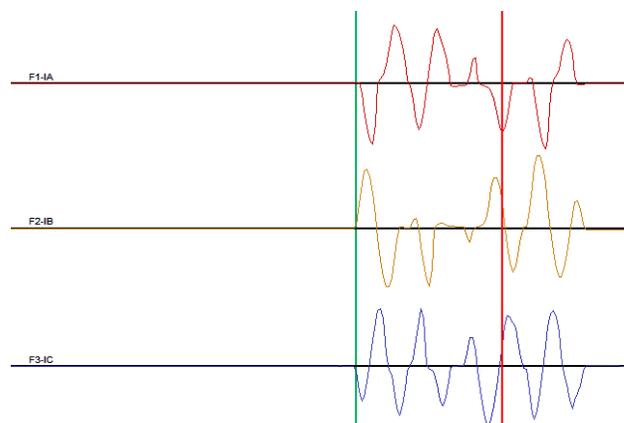


Fig. 5 Corrientes de arranque por fase del motor en conexión triángulo

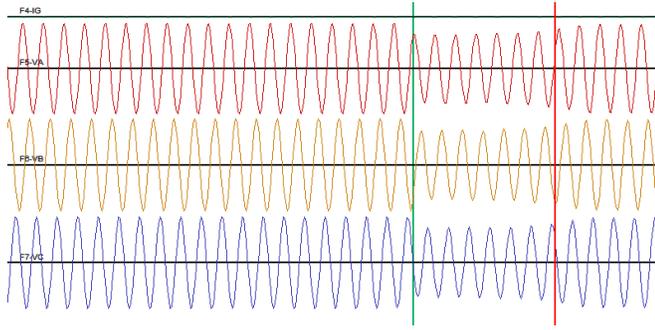


Fig. 6 Tensiones durante el arranque del motor en conexión triángulo

TABLE VIII
RESULTADOS DE LA SECCIÓN II) DE LA ENCUESTA

Aspecto	Ponderación				
	5	4	3	2	1
1. ¿Fue de su interés la experiencia?	55%	45%	0%	0%	0%
2. ¿Se encuentra satisfecho con la experiencia?	25%	60%	15%	0%	0%
3. ¿El nivel de dificultad de la experiencia es adecuada?	45%	35%	20%	0%	0%
4. ¿El profesor auxiliar tuvo un buen desempeño?	75%	25%	0%	0%	0%
5. ¿El laboratorio cuenta con buenas condiciones de trabajo? (orden, material, equipos y seguridad).	35%	55%	5%	0%	5%
6. ¿Calificaría como excelente la actividad en forma global?	30%	50%	15%	5%	0%

TABLE IX
RESULTADOS DE LA SECCIÓN III) DE LA ENCUESTA

Aspecto	Ponderación				
	5	4	3	2	1
1. El laboratorio cumplió con los objetivos planteados.	55%	45%	0%	0%	0%
2. El material del laboratorio es claro y de fácil entendimiento.	25%	30%	25%	20%	0%
3. El nivel de profundización de los contenidos fue adecuado.	30%	40%	15%	10%	5%
4. Logré comprender claramente los contenidos impartidos.	40%	35%	20%	5%	0%
5. Los contenidos teóricos son aplicables en forma experimental.	65%	20%	15%	0%	0%
6. Es claro el rol que cumplen las protecciones en un SEP.	80%	20%	0%	0%	0%
7. Comprendí qué elementos componen un sistema de protección y la forma en que interactúan.	50%	45%	5%	0%	0%
8. La actividad permite un acercamiento al mundo real de los sistemas eléctricos de potencia y sus aplicaciones.	65%	35%	0%	0%	0%
9. La experiencia es un aporte a mi desempeño como profesional.	65%	35%	0%	0%	0%

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se propuso una novedosa experiencia de laboratorio, dirigida al estudio y práctica de los sistemas de protección en SEP, para estudiantes universitarios de ingeniería eléctrica. Se incluyó la metodología seguida para llegar al diseño de la experiencia, incluyendo todas sus etapas. Se incluyó una aplicación práctica a un grupo de estudiantes, como parte de la evaluación previa, con miras a incluir mejoras a la guía de laboratorio.

Durante la evaluación se logró comprobar el grado de dificultad que tuvieron los estudiantes, su desempeño y comentarios posteriores a su realización. Con toda la información recopilada se propone una mejora de la experiencia para ser aplicada en los próximos semestres.

Dentro de los trabajos futuros, se propone integrar el resto de relés de protección disponibles en la red, e incluir condiciones de falla adicionales, para hacer un estudio más completo de los sistemas de protección en SEP.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las siguientes empresas: General Electric, E-Energy, Calimport S.A., Schneider Electric y ABB, que nos entregaron su apoyo desinteresado para lograr la renovación del Laboratorio de Energía del DIE, Universidad de Chile. Este trabajo fue parcialmente financiado por CONICYT/FONDAP 15110019, así como por el Programa U-INICIA VID 2015; código UI0010/15; Universidad de Chile;

REFERENCIAS

- [1] A. Vaccaro, M. Popov, D. Villacci, and V. Terzija, "An Integrated Framework for Smart Microgrids Modeling, Communication, and Verification," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 119–132, 2011.
- [2] S. Mirsaedi, D. Mat Said, M. Wazir Mustafa, M. Hafiz Habibuddin, and K. Ghaffari, "An analytical literature review of the available techniques for the protection of micro-grids," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 58, pp. 300–306, 2014.
- [3] L. Trujillo and A. Conde, "Herramienta educativa para la formación de ingenieros en protecciones eléctricas: relevador de distancia," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XIII, no. 2, México DF, pp. 215–225, 2012.
- [4] V. F. Pires, L. S. Martins, T. G. Amaral, R. Marçal, R. Rodrigues, and M. M. Crisóstomo, "Distance-Learning Power-System Protection Based on Testing Protective Relays," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2433–2438, 2008.
- [5] A. Pahwa and T. Ward, "TEACHING POWER SYSTEM PROTECTION WITH INDUSTRY'S COOPERATION," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 363–369, 1992.
- [6] S. Brahma et al., "The Education and Training of Future Protection Engineers: Challenges, Opportunities, and Solutions," *IEEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 24, no. 2, pp. 538–544, 2009.
- [7] V. Salehi, A. Mohamed, A. Mazloomzadeh, and O. A. Mohammed, "Laboratory-Based Smart Power System, Part I: Design and System Development," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1394–1404, 2012.
- [8] G. Energy, "F35 Multiple Feeder Protection System - Instruction Manual." GE, Markham, Ontario, p. 590, 2013.

8.3. Encuesta

Encuesta Laboratorio Protecciones

1. A partir de la actividad realizada en laboratorio sobre temática de protecciones, describa a continuación lo siguiente
 - a. ¿Qué fue lo que más le agradó y lo que menos le agradó de la experiencia?
 - b. ¿Qué fue lo más difícil de resolver de la experiencia?

a-

b-

2. Para la siguiente sección, por favor considere la siguiente escala conceptual:

Escala	Concepto
5	Totalmente de acuerdo: afirmación válida de manera plena, sin excepciones.
4	De acuerdo: afirmación válida parcialmente, con excepciones relevantes.
3	Ni de acuerdo ni en desacuerdo
2	En desacuerdo: afirmación válida parcialmente, con excepciones relevantes.
1	Totalmente en desacuerdo: afirmación no válida en este caso.

Marque con una X la opción elegida para las siguientes aseveraciones:

Afirmación	5	4	3	2	1
1. El laboratorio cumplió con los objetivos planteados.					
2. El material del laboratorio es claro y de fácil entendimiento.					
3. El nivel de profundización de los contenidos fue adecuado.					
4. Logré comprender claramente los contenidos impartidos.					
5. Los contenidos teóricos son aplicables en forma experimental.					
6. Es claro el rol que cumplen las protecciones en un SEP.					
7. Comprendí qué elementos componen un sistema de protección y la forma en que interactúan.					
8. La actividad permite un acercamiento al mundo real de los sistemas eléctricos de potencia y sus aplicaciones.					
9. La experiencia es un aporte a mi desempeño como profesional.					

3. Para la siguiente sección, por favor considere la siguiente escala conceptual:

Escala	Concepto
5	Totalmente de acuerdo: afirmación válida de manera plena, sin excepciones.
4	De acuerdo: afirmación válida parcialmente, con excepciones relevantes.
3	Ni de acuerdo ni en desacuerdo
2	En desacuerdo: afirmación válida parcialmente, con excepciones relevantes.
1	Totalmente en desacuerdo: afirmación no válida en este caso.

Marque con una X la opción elegida para las siguientes preguntas:

Afirmación	5	4	3	2	1
1. ¿Fue de su interés la experiencia?					
2. ¿Se encuentra satisfecho con la experiencia?					
3. ¿El nivel de dificultad de la experiencia es adecuada?					
4. ¿El profesor auxiliar tuvo un buen desempeño?					
5. ¿El laboratorio cuenta con buenas condiciones de trabajo? (orden, material, equipos y seguridad).					
6. ¿Calificaría como excelente la actividad en forma global?					

4. Señale algún elemento o factor que contribuiría a mejorar el desempeño y resultados de esta actividad de laboratorio.

8.4. Guía primer semestre

EL7045 Micro-redes y Generación Distribuida: Laboratorio de Protecciones

A. INTRODUCCIÓN

El diseño de los sistemas de protección asociados con redes en baja y media tensión se ha basado en la presunción de flujos unidireccionales, haciendo posible el uso de relés de sobre corriente de manera coordinada. Sin embargo, la inclusión de generación distribuida y micro-redes en las redes de distribución han modificado esta perspectiva. Por lo tanto, es necesario proponer nuevos esquemas de protección para una operación segura y confiable de estos sistemas eléctricos.

En esta experiencia de laboratorio se aplicará un enfoque para un sistema de protección, el cual es posible aplicar en sistemas de distribución que incluyan micro-redes y generación distribuida. Para esto se cuenta con una micro-red trifásica en el laboratorio de energía, con una topología radial con seis barras, la cual incluye relés de protección e interruptores. La Fig. 1 muestra la micro-red a utilizar en este laboratorio.

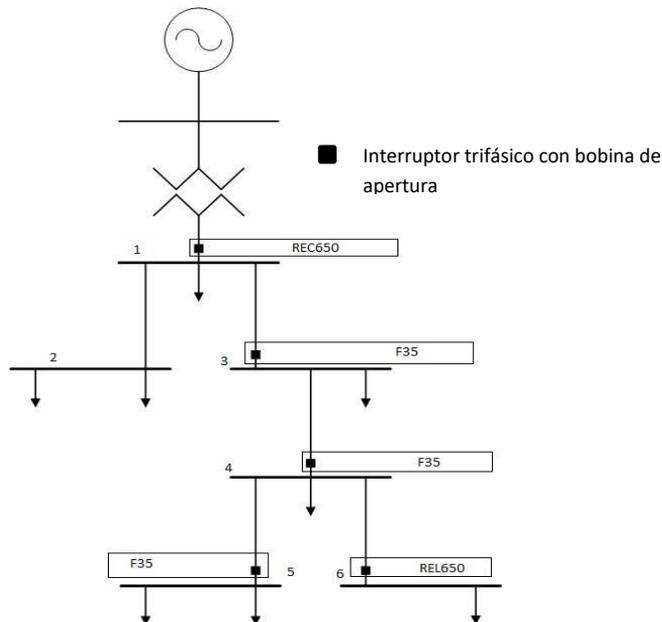


Figura 1: Topología de la micro-red

Las líneas están diseñadas de tal forma de simular sistemas de distribución. Los parámetros del circuito equivalente fueron obtenidos con antelación mediante ensayos de laboratorio.

Los relés de protección que se muestran en la Fig. 1 se describen a continuación:

Barra 1: Relé REC650, marca ABB, para protección de punto de acople común (PCC por sus siglas en inglés), con interruptor de la Fig. 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 2: No incluye relé de protección.

Barra 3: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 3, con interruptor de la Fig. 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 4: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 4, con interruptor de la Fig. 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 5: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 5, con interruptor de la Fig. 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 6: Relé REL650, marca ABB, para protección de la barra 6, con interruptor de la Fig. 2, incluye 3xTC 100:5A.

El esquema de protección a utilizar se puede programar en cada relé por medio del computador del Laboratorio de Energía que se conecta por medio del software de programación respectivo. Los relés ABB utilizan el software Wavewin; mientras que el relé F35 utiliza el software Enervista.

Los relés de protección actuarán sobre una bobina de apertura remota instalada en el interior de los interruptores trifásicos (marca GE, modelo FDE, de 50A y 30A). Los interruptores incluyen protección termo-magnética, sin embargo, para evitar que actúen en caso de falla, el ajuste de ésta se establece al máximo posible.

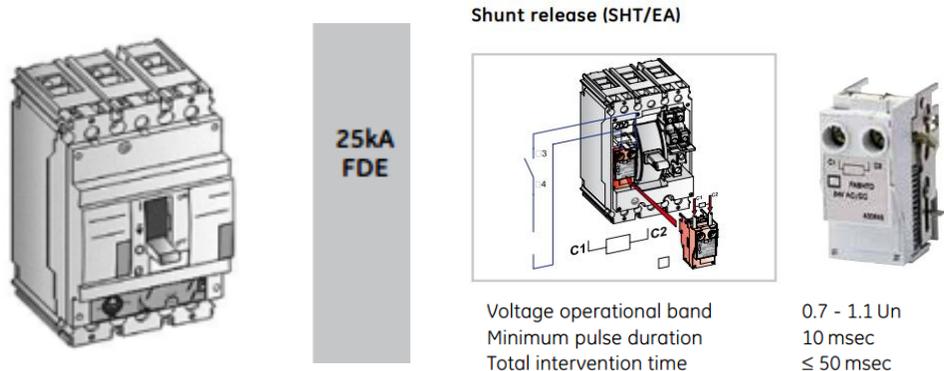


Figura 2: Interruptor utilizado mostrando la bobina de apertura a 220VCA-250VCC

En esta experiencia se utilizará una secuencia de coordinación de las barras 3, 4 y 5, las cuales se protegen por medio del relé F35. Los relés ABB no serán utilizados.

La Fig. 3 presenta la plantilla de trabajo utilizada en este laboratorio, mostrando las tres barras protegidas por el relé F35. Este es un relé tipo universal, programable, capaz de proteger múltiples puntos según las necesidades del usuario, y la configuración de los elementos de entrada/salida. Este modelo tiene una capacidad máxima de protección de sobre corriente de tres puntos. La Fig. 4

presenta el relé F35 en su parte frontal (A), así como el software Enervista (B). Además, en la Fig. 4 (C) se puede ver un diagrama de conexionado típico, incluyendo cinco puntos de medición de corriente, y uno de tensión al lado derecho del relé. Al lado izquierdo están las señales de entrada y salida, así como los puertos de comunicación.

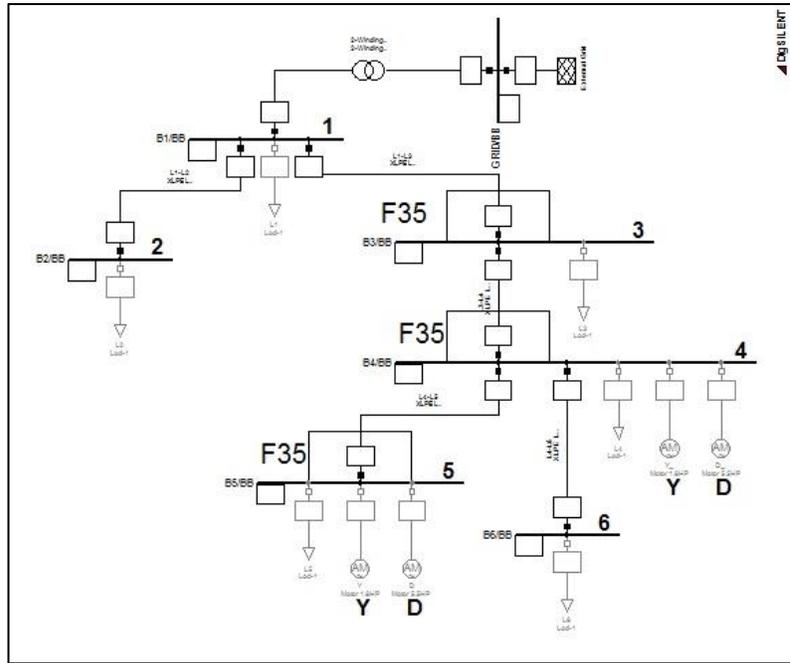


Figura 3: Plantilla de trabajo de la micro-red en el software Power Factory

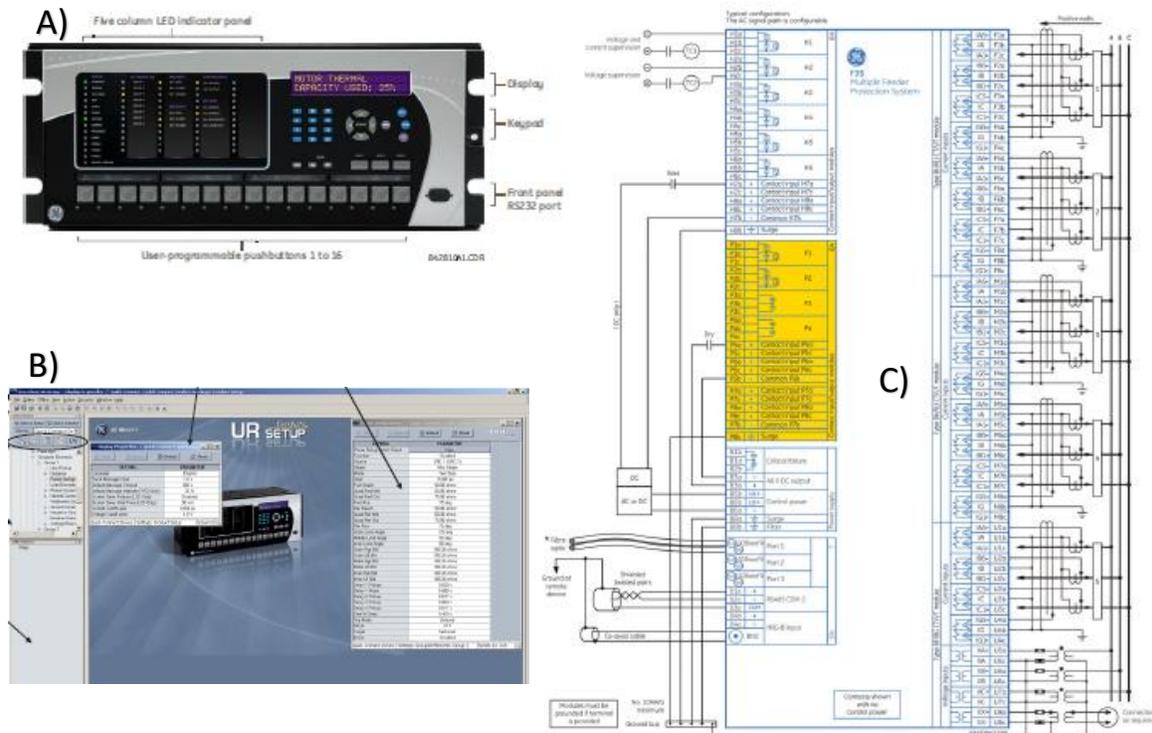


Figura 4: Relé F35: (A) Frente (B) Software ENERVISTA (C) Diagrama conexión

B. OBJETIVOS

- **Objetivos Generales:**
 1. Aplicar en una experiencia real un sistema de protección utilizando un relé programable, considerando una coordinación de tres puntos (barras) de protección en la micro-red.
 2. Determinar el ajuste requerido para los tres puntos de protección, según criterios entregados en la clase de protecciones.
 3. Determinar el ajuste considerando el requerimiento de coordinación de protecciones cronométrica, utilizando un intervalo de coordinación entre 100-200ms.
- **Objetivos Específicos:**
 1. Comparar el uso de una protección de sobre corriente con curva inversa, contra una de tipo tiempo definido, al despejar una falla.
 2. Comparar el uso de una protección de baja tensión con curva inversa, contra una de tipo tiempo definido, al despejar una falla.
 3. Aplicar una protección combinada de sobre corriente y baja tensión en barras donde se arranca un motor eléctrico trifásico en diferentes conexiones, como forma de provocar una perturbación (condición anormal).

C. INFORMACIÓN PARA REALIZAR CÁLCULOS DE AJUSTES Y COORDINACIÓN

Para la actividad D.4, se pide realizar un análisis previo (en casa), para definir los ajustes de las funciones de protección de sobre corriente y baja tensión. Estos ajustes se programarán para probar su respuesta frente a distintas perturbaciones. Estas consisten en arrancar un motor eléctrico trifásico. La información entregada corresponde a datos medidos y simulados en las barras 5, 4 y 3.

C.1. Barra 5

TABLA 1 Datos de arranque del motor en la BARRA 5

<i>Tipo</i>	<i>Variable</i>	Conexión Estrella (Y)			Conexión Triángulo (D)		
		<i>B5</i>	<i>B4</i>	<i>B3</i>	<i>B5</i>	<i>B4</i>	<i>B3</i>
Simulación	Corriente peak (A)	11	11	11	24	24	24

	Caída tensión (V)	323	340	364	220	276	320
Medido	Corriente peak (A)	11	11	11	24.8	24.8	24.8
	Caída tensión (V)	329	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	234	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>

NOTAS:

- B5, B4 y B3: Barras 5, 4 y 3, respectivamente.
- *n.d.*: No datos.
- Voltaje medido antes del arranque: 398V.
- Corriente en vacío (sin carga): 1.4A (Y) y 4.5A (D).
- Datos de placa del motor en ambas conexiones:
Y: 1.3kW, 380V, 1440RPM, 3A, 3 fases (Considerado como la condición normal).
D: 4kW, 380V, 1440RPM, 9.3A, 3 fases (Considerado como la condición anormal-falla).

Información útil para los cálculos:

1. Cálculo del flujo de potencia AC para el motor conectado en Y. Ver Fig. 5.

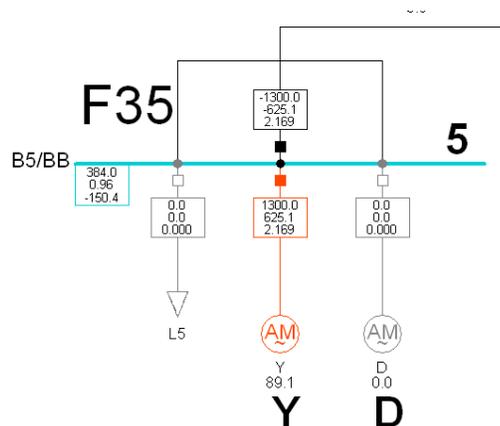


Figura 5: Resultado del flujo de potencia motor en Y – Barra 5

2. Motor con arranque en Y: Ver simulación RMS en Fig. 6.

Esta condición se considera como **normal**. Entonces, las protecciones se deberán ajustar para esta conexión. Usar estos criterios:

Corriente de Pick-up de la protección de sobre carga principal: a 2.5 veces la corriente nominal del motor.

Corriente de Pick-up de la protección de sobre corriente principal sub siguientes:

$$I_{pick-up} = I_{pick-up_motor_mayor} + \sum \text{Corriente nominal del resto de motores}$$

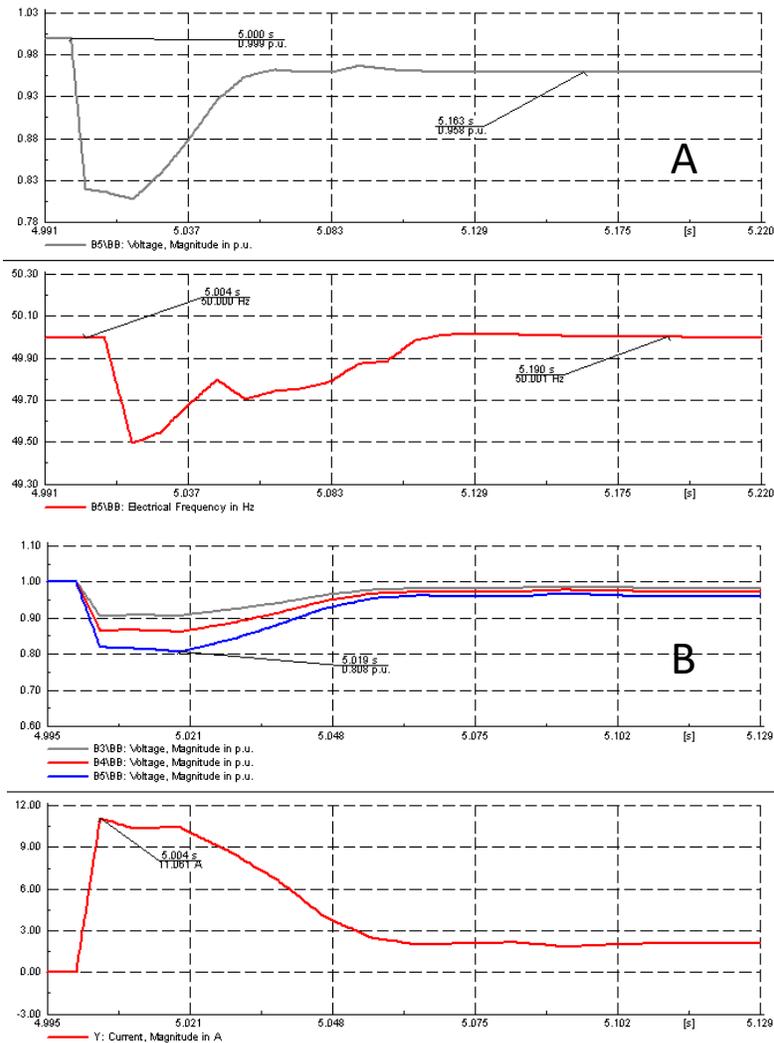


Figura 6: Simulación arranque en Y: (A) Tensión y Frecuencia en B5 (B) Tensión en B5-B4-B3 y Corriente del Motor

3. Motor con arranque en D: Ver simulación RMS en Fig. 7.

Esta condición se considera como **anormal-falla**, al incrementarse la corriente y la caída de tensión durante el arranque, ya que en la conexión delta el motor pasa a ser de 4kW. Para esto, las

protecciones, que se ajustaron para una condición normal en conexión estrella, deberán ser sensibles y despejar la falla, considerándola como una perturbación.

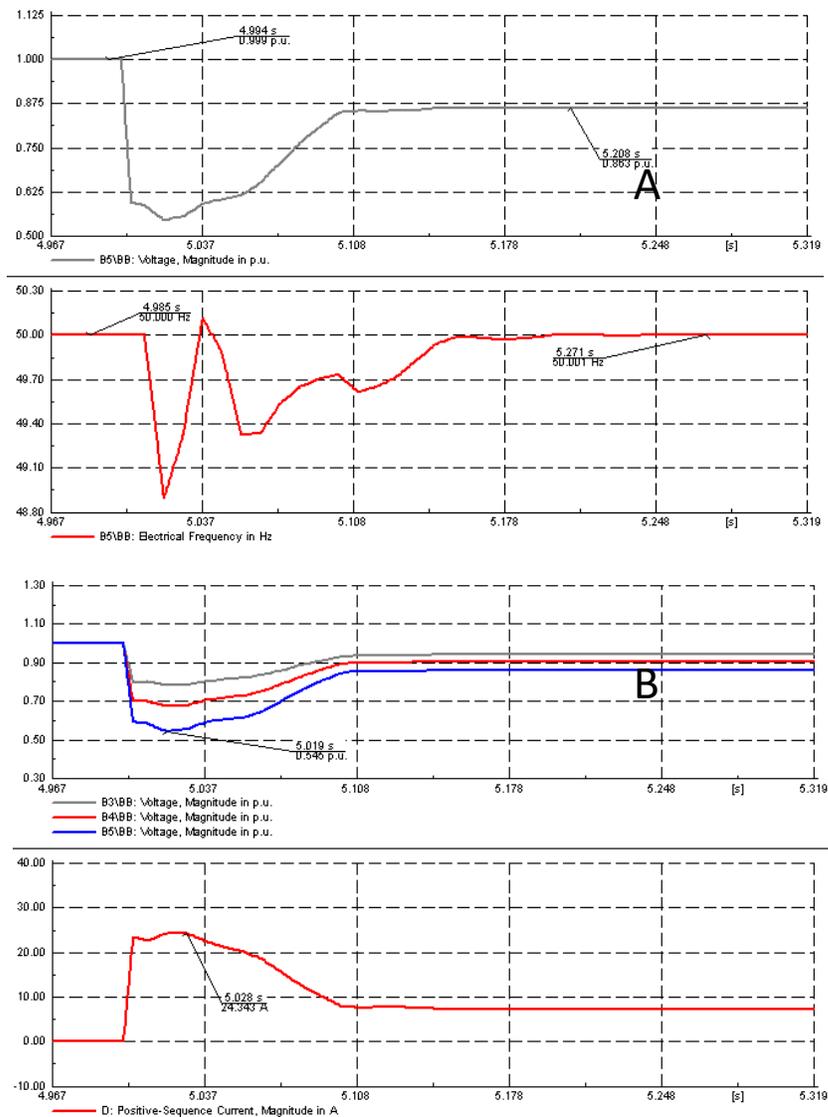


Figura 7: Simulación arranque en D: (A) Tensión y Frecuencia en B5 (B) Tensión en B5-B4-B3 y Corriente del Motor

C.2. Barra 4

Para confirmar los ajustes, se entregan a continuación los datos de simulación del arranque del motor en la barra 4. Verifique que los ajustes permitirán un correcto funcionamiento del relé de protección arrancando ahora el motor en la barra 4.

TABLA 2 Datos de arranque del motor medidos en la BARRA 4

Tipo	Variable	Conexión Estrella (Y)		Conexión Triángulo (D)	
		B4	B3	B4	B3
Simulación	Corriente peak (A)	11.7	11.7	27	27
	Caída tensión (V)	344	360	257	304

Cálculo del flujo de potencia AC para el motor conectado en Y (Ver Fig. 8).

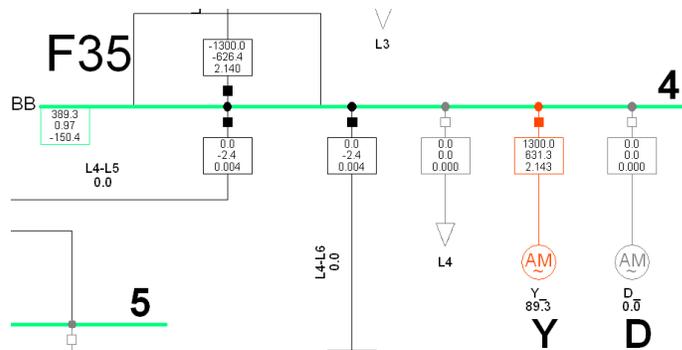


Figura 8: Resultado del flujo de potencia motor en Y - Barra 4

C.3. Curvas de tiempo inverso de las funciones de protección en el relé

C.3.1. Protección de sobre corriente

La protección de sobre corriente utilizará una curva de tiempo inversa IEC tipo A (moderadamente inversa), y sigue la ecuación:

$$T = TDM \times \left[\frac{K}{(I/I_{pickup})^E - 1} \right]$$

Según los parámetros de la ecuación anterior, así será el tipo de curva. La tabla de la Fig. 9 muestra las distintas opciones de curvas según la norma IEC.

IEC (BS) CURVE SHAPE	K	E
IEC Curve A (BS142)	0.140	0.020
IEC Curve B (BS142)	13.500	1.000
IEC Curve C (BS142)	80.000	2.000
IEC Short Inverse	0.050	0.040

Figura 9: Curvas de tiempo inverso IEC

Al ajustar los parámetros K y E, y dejar un valor de corriente de pick-up, el efecto de modificar el marcador de tiempo TDM se observa en la Fig. 10.

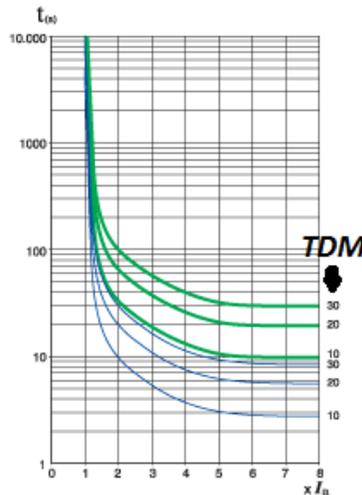


Figura 10: Curvas de tiempo inverso de sobre corriente

C.3.2. Protección de baja tensión

La protección de baja tensión utilizará una curva de tiempo inversa propia del relé F35, y sigue la ecuación:

$$T = \frac{D}{\left(1 - \frac{V}{V_{pickup}}\right)}$$

El efecto de modificar el marcador de tiempo D se observa en la Fig. 11.

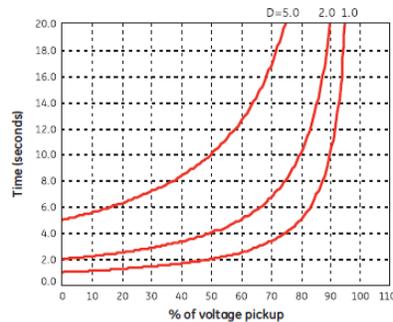


Figura 11: Curvas de tiempo inverso de baja tensión

D. ACTIVIDADES

- ▲ **Siga las instrucciones de los asistentes de la micro-red.**
- ▲ **Revise y siga todas las medidas de seguridad.**
- ▲ **Cada vez que realice un cambio de conexión del motor, accione el pulsador de emergencia.**



D.1. Reconocimiento de la Micro - Red

Reconozca la topología de la micro-red, analizando el transformador de aislamiento, los puntos de conexión, los equipos de medida, la interfaz computarizada de medición, los modelos de líneas de distribución, las cargas para el sistema, y otros.

Configure en la micro-red las líneas del sistema con el modelo de distribución.

NOTA: 1 p.u. de corriente corresponde a 20A y 1 p.u. de tensión corresponde a 400VCA.

D.2. Función de protección de sobre corriente (ANSI 51)

1. Aplicación de la función de tiempo definido (instantánea):

- En la barra 5 conecte la carga variable.
- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja.
- Ajuste el relé de protección para protección de sobre corriente de tiempo definido con un pick-up de 2A (0.1p.u.) y un marcador de tiempo de 0s.
- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una corriente de 1.98-1.99A (verifique la fase mayor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.



- Aumente la carga por encima de 2A y verifique el disparo.
 - Revise el Reporte de Falla en el software Enervista (fault report) y anote la corriente pre-falla y post-falla.
 - Revise en el software Enervista la función de protección activada (que corresponde efectivamente a la sobre corriente instantánea).
2. Aplicación de la función de tiempo inversa (retardada):
- En la barra 5 conecte la carga variable.
 - Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja.
 - Ajuste el relé de protección para protección de sobre corriente de tiempo inverso con un pick-up de 2A (0.1p.u.) y un marcador de tiempo de 1s.
 - Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una corriente mayor de 1.98-1.99A (verifique la fase mayor).
 - Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
 - Aumente la carga por encima de 2.3A (aproximadamente) y verifique el disparo.
 - Revise el Oscilografía en el software Enervista para estimar el tiempo de disparo.
 - Revise en el software Enervista la función de protección activada.

D.3. Ajuste de la función de protección de baja tensión (ANSI 27)

1. Aplicación de la función de tiempo definido (instantánea)
- En la barra 5 conecte la carga variable.
 - Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja.
 - Ajuste el relé de protección para protección de baja tensión de tiempo definido con un pick-up de 0.98p.u. (392VCA) y un marcador de tiempo de 0s.
 - Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una tensión de barra de 402-404VCA (verifique en la fase menor).
 - Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
 - Aumente la carga para provocar una caída bajo los 400VCA y verifique el disparo.
 - Revise el Reporte de Falla en el software Enervista (fault report) y anote la tensión pre-falla y post-falla.



- Revise en el software Enervista la función de protección activada (que corresponde efectivamente a la sobre corriente instantánea).
2. Aplicación de la función de tiempo inversa (retardada)
- En la barra 5 conecte la carga variable.
 - Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja.
 - Ajuste el relé de protección para protección de baja tensión de tiempo inverso con un pick-up de 0.98p.u. (392VCA) y un marcador de tiempo de 1s.
 - Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una tensión de barra de 402-404VCA (verifique la fase menor).
 - Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
 - Aumente la carga para provocar una caída bajo los 400VCA y verifique el disparo.
 - Revise el Oscilografía en el software Enervista para estimar el tiempo de disparo.
 - Revise en el software Enervista la función de protección activada.

D.4. Ajuste de la función de protección combinada por sobre corriente (51) – baja tensión (27)

D.4.1. Barra 5

1. Ajuste las protecciones de sobre corriente según los parámetros calculados previamente, asumiendo que el arranque del motor en triángulo es una falla de corto circuito. Encuentre los ajustes de las protecciones de manera que el motor pueda arrancar en estrella, pero que al hacerse el arranque en triángulo sea sentido como una condición anormal.
 - Asegúrese que las protecciones de baja tensión están desactivadas.
 - Conecte el motor en la barra 5.
 - Haga la conexión estrella (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.



2. Ajuste las protecciones de sobre corriente según las recomendaciones de la sección C para la corriente de pick-up.
 - Asegúrese que las protecciones de baja tensión están desactivadas.
 - Haga la conexión estrella (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
3. Active las protecciones de baja tensión y ajústelas de manera que determinen el arranque en estrella como normal, y el arranque en triángulo como anormal.
 - Haga la conexión estrella (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.

D.4.2. Barra 4

1. Con los ajustes de la sección anterior (punto 3.), conecte el motor en la barra 4 y verifique el desempeño de las protecciones.
 - Asegúrese que la protección de baja tensión de la barra 5 está desactivada.
 - Asegúrese que las protecciones de sobre corriente y baja tensión en las barras 4 y 3 están activadas.
 - Haga la conexión estrella (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver Fig. 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.

E. ADVERTENCIAS & COMENTARIOS

- ⚠ *Tener precaución cuando se use el motor eléctrico.*
- ⚠ *Cada vez que realice un restablecimiento de un interruptor asegúrese que la micro-red se encuentra desenergizada.*
- ⚠ *Todas las conexiones de carga y entre barras deben ser aprobadas por el asistente del laboratorio.*
- ⚠ *Las mediciones de tensión, corriente, potencia activa y reactiva están integradas en el sistema instalado, no se requiere el uso de instrumentos tipo multímetro.*
- ⚠ *Tome en cuenta las siguientes conexiones en el motor eléctrico*

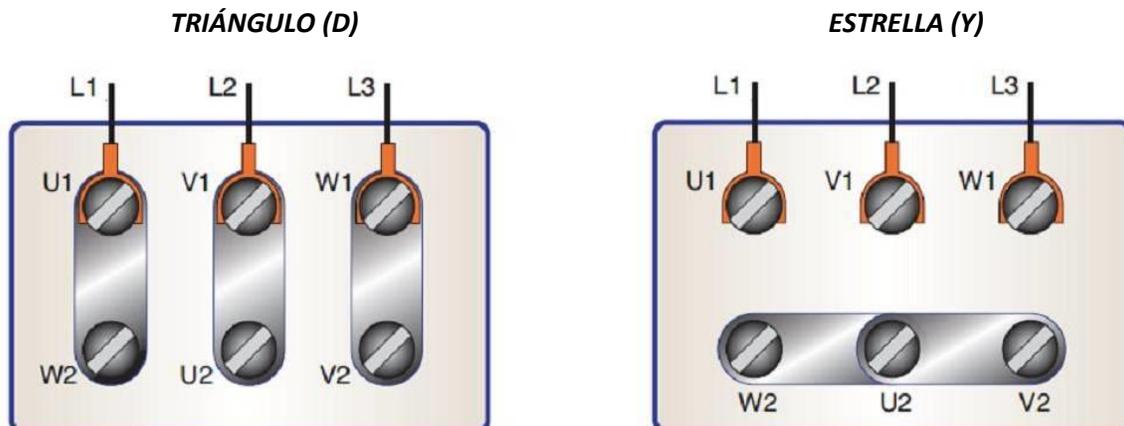


Figura 12: Conexiones del motor eléctrico trifásico

8.5. Guía teórica segundo semestre

EL5203 Laboratorio de Energía: Laboratorio de Protecciones – Guía Teórica

A. INTRODUCCIÓN

La operación de un sistema eléctrico de potencia requiere el cumplimiento de cuatro requerimientos fundamentales:

1. **Economía:** Uno de los principales desafíos que debe cumplir el organismo regulador del sistema eléctrico, es el de satisfacer la demanda a mínimo costo.
2. **Seguridad:** Un sistema eléctrico debe ser capaz de soportar diversas contingencias manteniendo los índices de calidad.
3. **Suficiencia:** El suministro eléctrico debe ser entregado con un número razonable de interrupciones, las cuales son definidas por la norma técnica de seguridad y calidad de servicio de cada país.
4. **Calidad:** Las variables del sistema deben mantenerse dentro los estándares de calidad establecidos por la norma técnica de cada país.

La figura 1 muestra los requerimientos fundamentales dentro de un sistema eléctrico de potencia, donde el requerimiento de seguridad está relacionado de manera directa con el sistema de protección de un SEP.

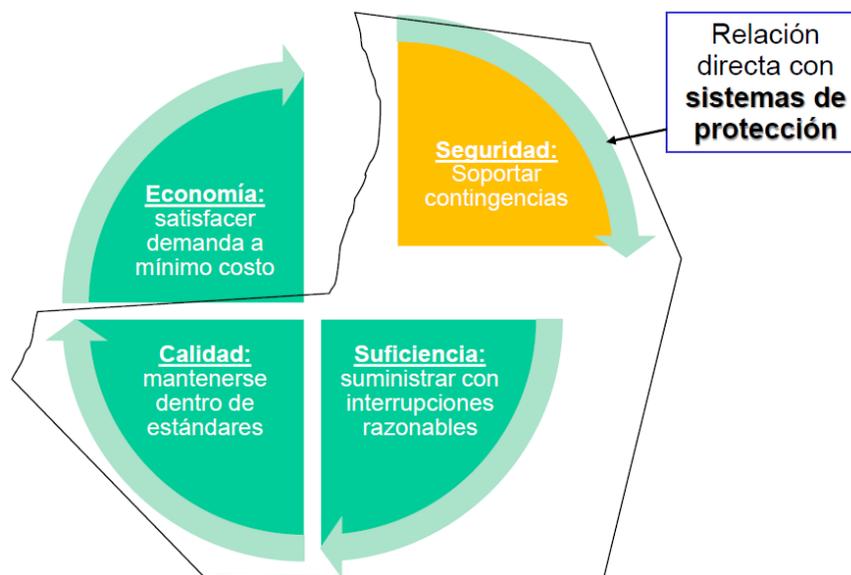


Figura 1: Requerimientos fundamentales de un sistema eléctrico de potencia.



Un requerimiento general dentro de un sistema eléctrico de potencia es el de salvaguardar el sistema con el fin de mantener la continuidad de servicio, minimizar daños y pérdidas en el caso de fallas, junto con asegurar la seguridad de las personas.

Lo anterior se logra con:

- Detección temprana de fallas y anomalías; con la pronta remoción del equipo o zona fallada, donde la falla debe eliminarse en el menor tiempo posible.
- Identificando y aislando los componentes fallados del sistema para garantizar a la mayor cantidad de consumidores posible el servicio. En otras palabras, se debe aislar la zona más pequeña posible.
- El dispositivo de protección más cercano a la falla debe operar primero. En caso de no ser activado, los dispositivos más alejados deben actuar. Lo anterior implica una correcta coordinación de los dispositivos presentes en el sistema.

B. EXIGENCIAS BÁSICAS DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN

La protección ideal sería aquella que actuará frente a diversas anomalías que se presenten en el sistema eléctrico, en el menor tiempo posible y su inversión implique el menor costo posible. Debido a que esto no es posible conseguirlo en la mayoría de los casos, generalmente se valoran diversos aspectos:

1. Seguridad: La probabilidad de no actuación de un sistema o componente cuando no debe hacerlo.
2. Confiabilidad: La probabilidad de actuación de un sistema o componente cuando debe hacerlo.
3. Fiabilidad: La probabilidad de que un sistema o componente actúe única y exclusivamente cuando debe hacerlo. Es producto de la seguridad y confiabilidad.
4. Precisión: La respuesta que tiene el sistema a los valores de entrada.
5. Rapidez: El tiempo invertido desde la aparición del incidente hasta el momento en que cierra sus contactos el relé. El aumento de rapidez implica una disminución en la fiabilidad.
6. Flexibilidad: Capacidad de la protección para adaptarse a cambios funcionales.
7. Simplicidad: En lo que concierne al diseño, se refiere a reducir al mínimo el número de funciones e interacciones.
8. Mantenimiento: Reducción al mínimo de piezas sujetas a desgaste, evitando el mantenimiento periódico.



9. Facilidades de prueba: Se valor que el equipo tenga incorporado dispositivos que faciliten su verificación sin que sea necesario desconectar ningún conductor para realizar las pruebas.
10. Autodiagnóstico: Inclusión de funciones de auto verificación en la protección. Esta ventaja la presentan las protecciones digitales.
11. Modularidad: Las protecciones montadas en módulos facilitan la localización y reparación de averías.
12. Economía: Hacer todo lo anterior al menor costo.

Dentro de las anomalías que pueden sufrir los sistemas eléctricos de potencia son:

1. Fallas: Corresponde a un daño inminente para los equipos, personas o inclusive para el sistema (puede llevar a inestabilidad y efectos cascadas). Su tiempo de acción es crítico y generalmente son menores a 1 segundo, en donde la respuesta automática debe ser la desconexión de parte del sistema eléctrico.
2. Perturbaciones: Corresponde a un potencial daño que puede llevar en el mediano o largo plazo a una falla. Su tiempo de acción no es crítico y se busca el mejoramiento a partir de una acción correctiva. Algunas perturbaciones son: sobrecargas, desequilibrios, calentamientos, sobretensiones moderadas, etc.

C. COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

Cuando se habla de coordinación de protecciones, nos referimos al problema de determinar la secuencia de operación en el tiempo de los relés para cada posible localización de una falla, donde la zona fallada debe ser aislada con suficiente margen y sin excesivo retardo de tiempo.

Cabe destacar que la secuencia seleccionada en cualquier sistema eléctrico depende de la topología de la red (sistema enmallado o radial), la característica de los relés (por ejemplo, cuántos puntos puede observar, si necesita comunicación con otro dispositivo, etc.), y la filosofía que persigue el sistema de protección.

En la figura 2 se aprecia una red con topología radial, en donde la curva de color rojo representa los tiempos de activación de las protecciones (eje y), y las flechas horizontales azules representan la parte del sistema que puede llegar a desconectar la protección en caso de activación (eje x). Por ejemplo, si una falla se presenta en la zona protección de R1 y, si por algún motivo, ésta no se activa en el tiempo para R1, la protección R2 aguas arriba debe reaccionar frente a esto y desconectar la parte del sistema que está bajo su vigilancia, con una diferencia de tiempo denominado CTI1 (intervalo de coordinación).

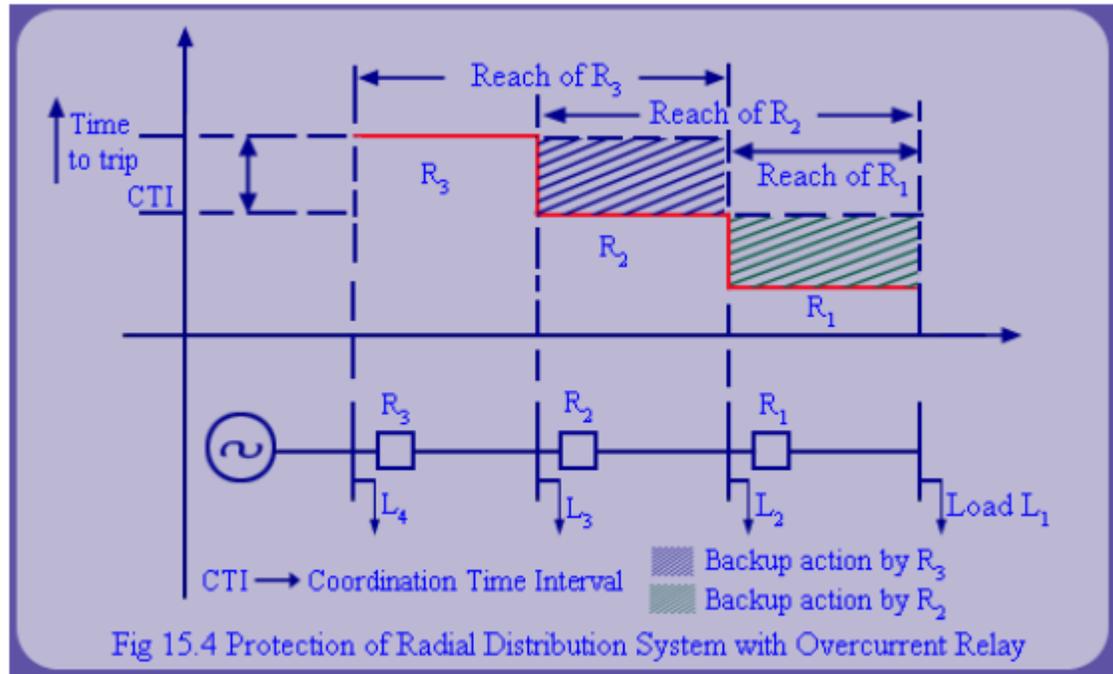


Figura 2: Coordinación para red radial.

Es necesario destacar una sutil diferencia entre lo que se entiende por un sistema de protección y un esquema de protección:

- Esquema de protección: Es la estrategia que se sigue para la selección de los tipos de dispositivos de protección, su disposición en la red y los ajustes necesarios. Se busca cumplir los requisitos establecidos según algún criterio, entre los más comunes se encuentran: rapidez, selectividad, coordinación y confiabilidad.
- Sistema de protección: Es todo el conjunto de partes constitutivas, incluyendo los dispositivos, la red de comunicación, el sistema experto para el ajuste en línea y el esquema de protección.

D. FUNCIONES DE PROTECCIÓN

Desde los primeros sistemas eléctricos hasta los actuales los cambios de estos han sido gigantescos, como así lo han sido las problemáticas que le siguen, y las necesidades auxiliares de nuevos productos dado el rápido crecimiento, dentro de las que destacan los sistemas de protección.

Algunos de los dispositivos de protección más utilizados son:

D.1. Fusible

Es el método de protección más antiguo y que sigue siendo utilizado en la actualidad. Su principio de activación se basa en el incremento de temperatura que sufre el hilo conductor al ser atravesado por un determinado flujo de corriente. El material conductor se calibra de tal manera que se funde cuando la corriente alcanza un nivel predeterminado. Algunas de sus principales desventajas son: baja precisión, bajo poder de corte, rápido envejecimiento. Aunque, por otro lado, tiene una rápida actuación (del orden de los 5 [ms]), reduciendo por lo tanto las oscilaciones térmicas y dinámica de los circuitos.



Figura 3: Imagen de un fusible utilizado en aplicaciones de electrónica y electricidad básica.

D.2. Interruptor termomagnético

Es un método de protección algo más complejo que el anterior, donde su activación puede ser realizada por acción térmica, o bien, acción magnética. El primer fenómeno tiene su origen en una lámina bimetálica (dos metales con distinta composición), que al calentarse producto del paso de la corriente sufre deformación que provoca el accionamiento mecánico de apertura del contacto. Esta protección tiene la función de encargarse de las sobre corrientes de pocas veces el nivel nominal (1 a 3 veces). Por otro lado, el segundo fenómeno tiene su origen en una bobina (electroimán), en donde al circular una determinada corriente produce un campo magnético que atrae al núcleo en su interior. Así, sobrepasando un cierto límite de corriente, se atrae completamente el núcleo, accionando en forma mecánica la apertura. Esta protección tiene la función de encargarse de las sobre corrientes de varias veces el valor nominal (3 a 100 veces), y su rapidez tiene el orden de 25 milésimas de segundos.

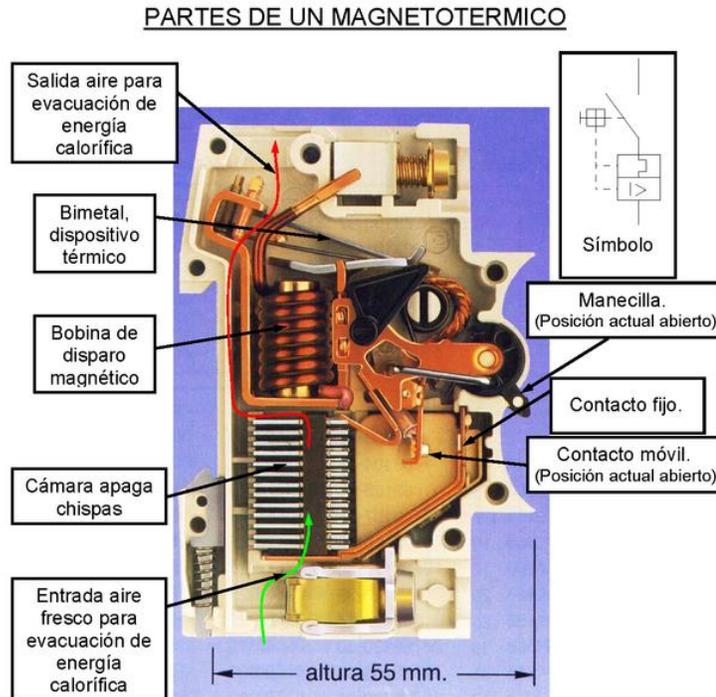


Figura 4: Partes de un interruptor termomagnético.

D.3. Sistemas electrónicos digitales

Desde la aparición de los primeros microprocesadores grandes avances se han realizado en el campo de la energía, en donde los sistemas de protección no se han quedado atrás. Fabricantes han utilizado esta tecnología en conjunto con los adelantos en las tecnologías de comunicación para crear estos nuevos equipos.

El esquema de bloques lógicos que utiliza un relé digital es la que se muestra en la figura 5, en donde cabe destacar que dentro del bloque "utilización de datos" es donde el relé digital utiliza las funciones definidas, entre las que destaca:

- Funciones de protección de sobre corriente de tiempo inverso y tiempo definido (instantánea) por fase, por neutro, secuencia negativa y tierra.
- Funciones de protección de baja tensión de tiempo inverso y tiempo definido (instantánea) por fase.
- Función de sobre voltaje por fase y neutro.
- Protección térmica por sobre carga.
- Protección de alta y baja frecuencia.

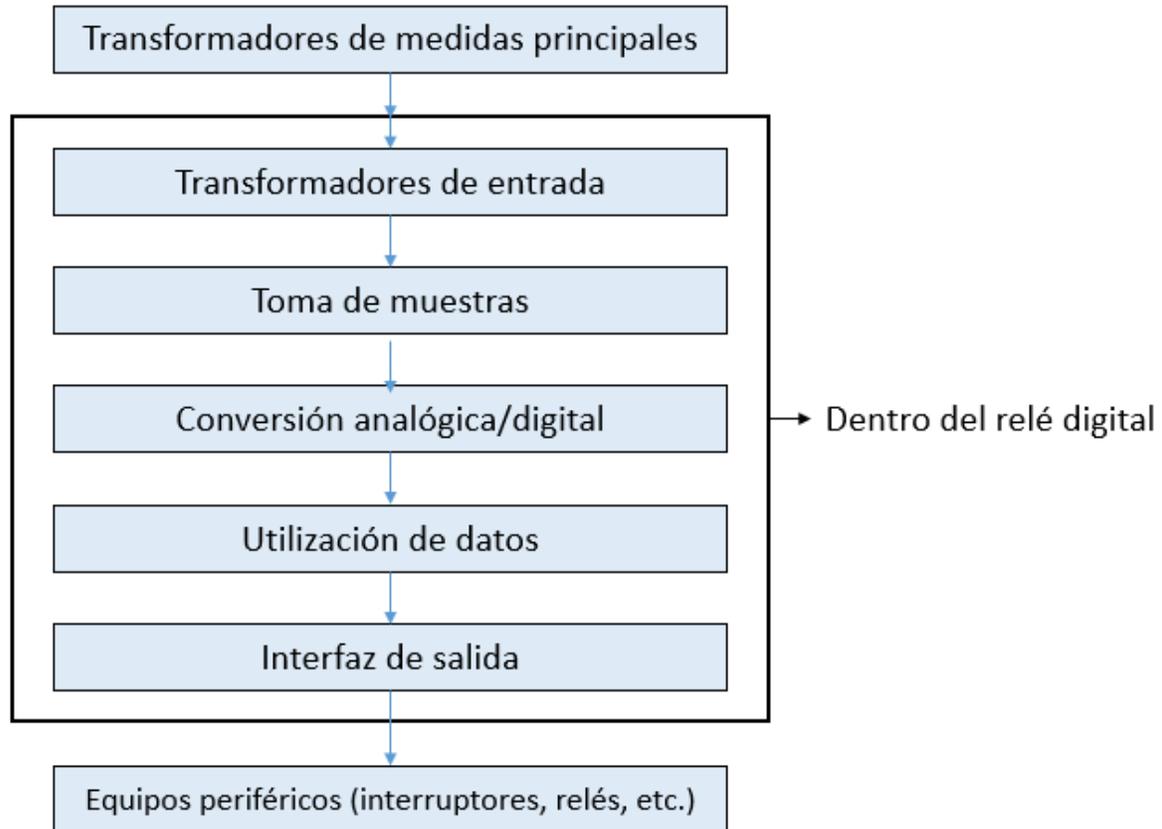


Figura 5: Pasos lógicos de un sistema electrónico digital.

E. CURVAS DE PROTECCIÓN UTILIZADAS

Dentro de la experiencia de laboratorio, se utilizarán dos protecciones que tienen predefinidas sus curvas de accionamiento dentro del dispositivo “F35 Multiple Feeder Protection System”. Estas son las protecciones de sobre corriente y baja tensión.

E.1.1. Protección de sobre corriente

Este tipo de protección utiliza el dato de corriente proveniente de alguna fase en un punto determinado del sistema, con el fin de compararlo con un límite definido con anterioridad. Mientras mayor sea esta razón con mayor rapidez actuará la protección, actuando como un sistema EDAC (esquema de desconexión automática de carga).

La protección de sobre corriente utilizará una curva de tiempo inversa IEC tipo A (moderadamente inversa), donde la tabla 1 muestra las distintas opciones de curvas según la norma IEC. La curva característica se presenta a continuación:

$$T = TDM \times \left[\frac{K}{(I/I_{pickup})^E - 1} \right] \quad (1)$$

En donde se tiene:

- T: Tiempo de operación del relé en [s].
- TDM: Multiplicador de tiempo [S].
- K y E: son constantes que definen el tipo de curva e intenta asemejar el comportamiento físico de un protector termomagnético.
- I: Corresponde a la corriente medida en el transformador de corriente secundario en [A].
- I_{pickup} : corresponde al umbral o límite de corriente pre-definida en [A].

Tabla 1: Curvas de tiempo inverso IEC

IEC (BS) Curve Shape	K	E
IEC Curve A (BS142)	0,14	0,020
IEC Curve B (BS142)	13,500	1,000
IEC Curve C (BS142)	80,00	2,000
IEC Short Inverse	0,050	0,040

En la figura 6 se muestra el efecto de variar el parámetro TDM, cuando el resto de las variables se mantienen fijas, inclusive manteniendo un mismo valor de corriente obtenida de los TTCC. Para fines prácticos, al aumentar el TDM aumenta el tiempo de activación del relé, desplazando la curva en forma ascendente. En la misma figura 6 se aprecia una recta roja, que representa a I_{pickup} .

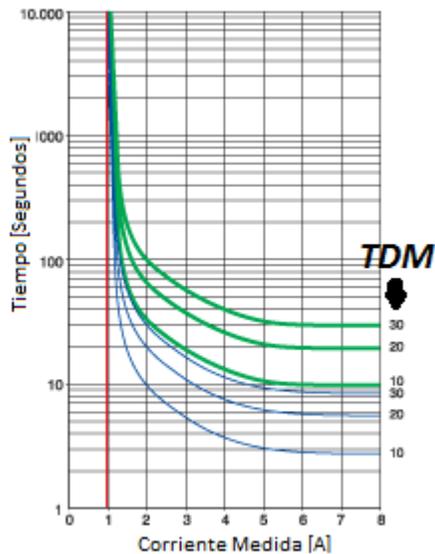


Figura 6: Curvas de tiempo inverso de sobre corriente

Dentro de la función de sobre corriente se pueden manipular tan solo dos variables: TDM e I_{pickup} .

E.1.2. Protección de baja tensión

Este tipo de protección utiliza el dato de tensión proveniente de alguna fase en un punto determinado del sistema, con el fin de compararlo con un límite definido con anterioridad. Mientras mayor sea esta razón con mayor rapidez actuará la protección, actuando como un sistema EDAC (esquema de desconexión automática de carga).

La protección de baja tensión utilizará una curva de tiempo inversa propia del relé F35, y sigue la ecuación:

$$T = \frac{D}{\left(1 - \frac{V}{V_{pickup}}\right)} \quad (2)$$

En donde se tiene:

- T= Tiempo de operación del relé en [s].
- D: Seteo de retardo [S].
- V corresponde a la tensión medida [V].

- V_{pickup} corresponde al umbral o límite de tensión pre-definida [V].

En la figura 7 se muestra el efecto de variar el retardo de la función, en donde la recta azul corresponde al V_{pickup} . Como se puede apreciar, al aumentar esta variable para un mismo valor de razón entre V y V_{pickup} , mayor será el tiempo de activación de la protección.

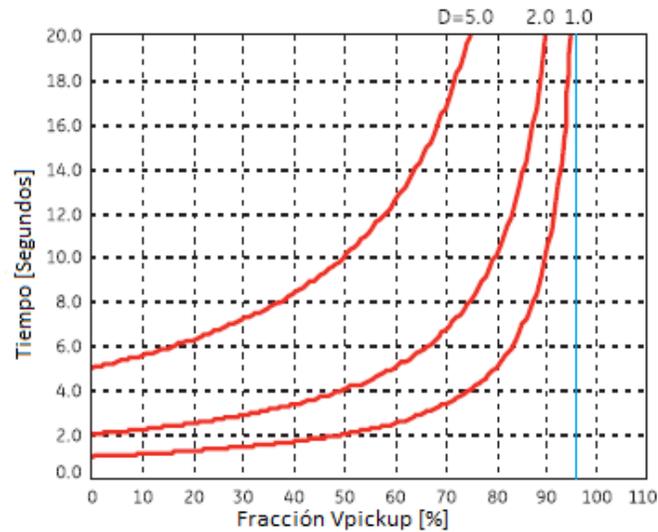


Figura 7: Curvas de tiempo inverso de baja tensión.

Dentro de la función de baja tensión se pueden manipular tan solo dos variables: D y V_{pickup} .

8.6. Guía práctica segundo semestre

EL5203 Laboratorio de Energía: Laboratorio de Protecciones – Guía Práctica

A. INTRODUCCIÓN

El diseño de los sistemas de protección asociados con redes en baja y media tensión se ha basado en la presunción de flujos unidireccionales, haciendo posible el uso de relés de sobre corriente de manera coordinada. Sin embargo, la inclusión de generación distribuida y micro-redes en las redes de distribución han modificado esta perspectiva. Por lo tanto, es necesario proponer nuevos esquemas de protección para una operación segura y confiable de estos sistemas eléctricos.

En esta experiencia de laboratorio se aplicará un enfoque para un sistema de protección, el cual es posible aplicar en sistemas de distribución que incluyan micro-redes y generación distribuida. Para esto se cuenta con una micro-red trifásica en el laboratorio de energía, con una topología radial con seis barras, la cual incluye relés de protección e interruptores. La Figura 1 muestra la micro-red a utilizar en este laboratorio.

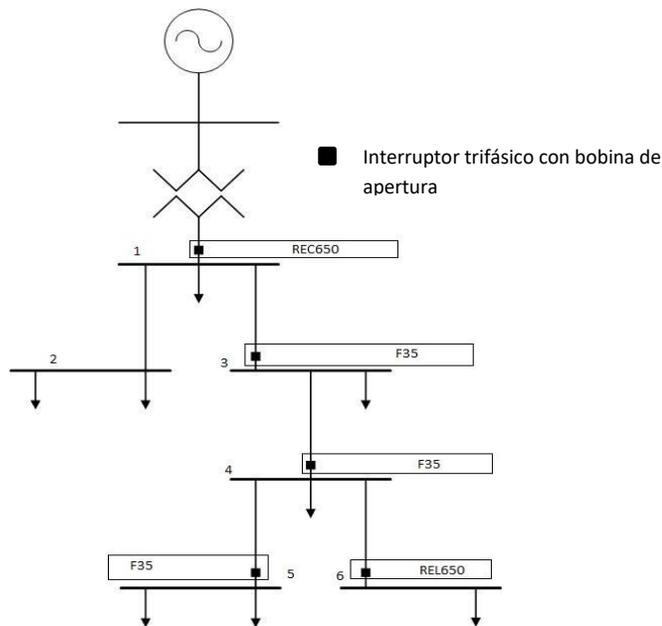


Figura 1: Topología de la micro-red

Las líneas están diseñadas de tal forma de simular sistemas de distribución. Los parámetros del circuito equivalente fueron obtenidos con antelación mediante ensayos de laboratorio.



Los relés de protección que se muestran en la Figura 1 se describen a continuación:

Barra 1: Relé REC650, marca ABB, para protección de punto de acople común (PCC por sus siglas en inglés), con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A. (TC: transformador de corriente).

Barra 2: No incluye relé de protección.

Barra 3: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 3, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 4: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 4, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 5: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 5, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 6: Relé REL650, marca ABB, para protección de la barra 6, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

B. OBJETIVOS

- **Objetivos Generales:**
 1. Aplicar en una experiencia real un sistema de protección utilizando un relé programable, considerando una coordinación de tres puntos (barras) de protección en la micro-red.
 2. Determinar el ajuste requerido para los tres puntos de protección, según criterios entregados en la guía teórica.
 3. Determinar el ajuste considerando el requerimiento de coordinación de protecciones cronométrica, utilizando un intervalo de coordinación entre 100-200ms.
- **Objetivos Específicos:**
 1. Comparar el uso de una protección de sobre corriente con curva inversa, contra una de tipo tiempo definido, al despejar una falla.
 2. Comparar el uso de una protección de baja tensión con curva inversa, contra una de tipo tiempo definido, al despejar una falla.
 3. Aplicar una protección combinada de sobre corriente y baja tensión en barras donde se arranca un motor eléctrico trifásico en diferentes conexiones, como forma de provocar una perturbación (condición anormal).

C. INFORMACIÓN PARA REALIZAR CÁLCULOS DE AJUSTES Y COORDINACIÓN

Para la actividad D.4, se pide realizar un análisis previo (en casa), para definir los ajustes de las funciones de protección de sobre corriente y baja tensión. Estos ajustes se programarán para probar su respuesta frente a distintas perturbaciones, que consisten en arrancar un motor eléctrico trifásico en la barra 5 del sistema. La información entregada en la tabla 1 corresponde a datos medidos y simulados en las barras 5, 4 y 3. En anexos se pueden encontrar las gráficas obtenidas en DigSilent para la simulación de ambas configuraciones.

C.1. Barra 5

TABLA 1 Datos de arranque del motor en la BARRA 5

Tipo	Variable	Conexión Estrella (Y)			Conexión Triángulo (D)		
		B5	B4	B3	B5	B4	B3
	Corriente peak (A)	11	11	11	24	24	24
	Caída tensión (V)	323	340	364	220	276	320
	Corriente peak (A)	11	11	11	24.8	24.8	24.8
	Caída tensión (V)	329	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	234	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>

NOTAS:

- B5, B4 y B3: Barras 5, 4 y 3, respectivamente.
- *n.d.*: No datos.
- Voltaje medido antes del arranque: 398V.
- Corriente en vacío (sin carga): 1.4A (Y) y 4.5A (D).
- Datos de placa del motor en ambas conexiones:
Y: 1.3kW, 380V, 1440RPM, 3A, 3 fases (Considerado como la condición normal).
D: 4kW, 380V, 1440RPM, 9.3A, 3 fases (Considerado como la condición anormal-falla).

Información útil para los cálculos:

1. Cálculo del flujo de potencia AC para el motor conectado en Y. Ver Figura 5.

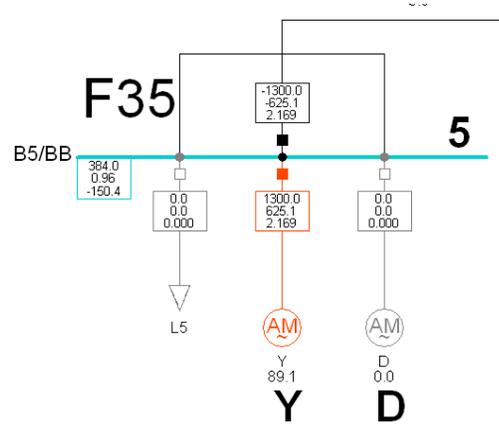


Figura 2: Resultado del flujo de potencia motor en Y – Barra 5

2. Motor con arranque en Y: Ver simulación RMS en Figura 6.

Esta condición se considera como **normal**, por lo tanto, las protecciones se deberán ajustar para esta conexión, es decir, que para una variación marcada en las variables del sistema (fuera del rango de operación normal) se genere la actuación de la protección configurada. Cabe destacar que los datos de encendido del motor están muy por encima de la operación normal, pero el esquema propuesto no puede activarse debido a esto.

Para la configuración del esquema de protección, usarlos siguientes criterios:

- Corriente de Pick-up de la protección de sobre carga principal: a 2.5 veces la corriente nominal del motor.
- Corriente de Pick-up de la protección de sobre corriente principal sub siguientes:

$$I_{pick-up} = I_{pick-up_motor_mayor} + \sum \text{Corriente nominal del resto de motores}$$

3. Motor con arranque en D: Ver simulación RMS en figura 7.

Esta condición se considera como anormal-falla, al incrementarse la corriente y la caída de tensión no solo durante el arranque, sino que también durante la operación normal ya que en la conexión delta el motor pasa a ser de 4kW. Para esto, las protecciones, que se ajustaron para una condición normal en conexión estrella, deberán ser sensibles y despejar la falla, considerándola como una perturbación.

C.2. Barra 4

Para confirmar los ajustes, se entregan a continuación los datos de simulación del arranque del motor en la barra 4. Verifique que los ajustes permitirán un correcto funcionamiento del relé de protección arrancando también el motor en la barra 4. En anexos se pueden encontrar las gráficas obtenidas en DigSilent para la simulación de ambas configuraciones.

TABLA 2 Datos de arranque del motor medidos en la BARRA 4

Tipo	Variable	Conexión Estrella (Y)		Conexión Triángulo (D)	
		B4	B3	B4	B3
	Corriente peak (A)	11.7	11.7	27	27
	Caída tensión (V)	344	360	257	304

Cálculo del flujo de potencia AC para el motor conectado en Y (Ver figura 8).

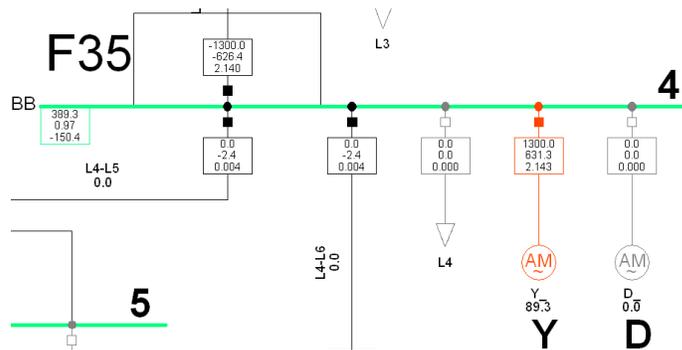


Figura 3: Resultado del flujo de potencia motor en Y - Barra 4

C.3. Curvas de tiempo inverso de las funciones de protección en el relé

C.3.1. Protección de sobre corriente

La protección de sobre corriente utilizará una curva de tiempo inversa IEC tipo A (moderadamente inversa), y sigue la ecuación:

$$T = TDM \times \left[\frac{K}{(I/I_{pickup})^E - 1} \right] \quad (1)$$

Según los parámetros de la ecuación anterior, así será el tipo de curva. La tabla de la figura 9 muestra las distintas opciones de curvas según la norma IEC.

IEC (BS) CURVE SHAPE	K	E
IEC Curve A (BS142)	0.140	0.020
IEC Curve B (BS142)	13.500	1.000
IEC Curve C (BS142)	80.000	2.000
IEC Short Inverse	0.050	0.040

Figura 4: Curvas de tiempo inverso IEC

Al ajustar los parámetros K y E, y dejar un valor de corriente de pick-up, el efecto de modificar el marcador de tiempo TDM se observa en la figura 10.

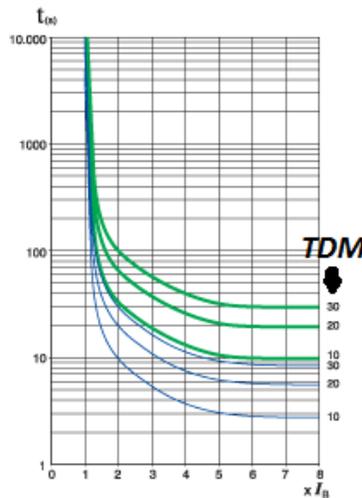


Figura 5: Curvas de tiempo inverso de sobre corriente

C.3.2. Protección de baja tensión

La protección de baja tensión utilizará una curva de tiempo inversa propia del relé F35, y sigue la ecuación:

$$T = \frac{D}{\left(1 - \frac{V}{V_{pickup}}\right)} \quad (2)$$

El efecto de modificar el marcador de tiempo D se observa en la figura 11.

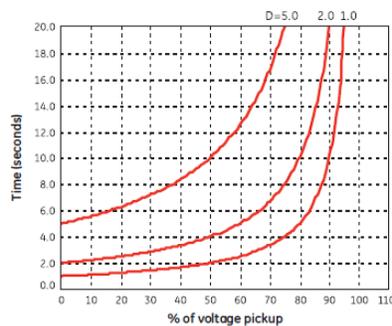


Figura 6: Curvas de tiempo inverso de baja tensión

D. ENERVISTA

El dispositivo “F35 Multiple Feeder Protection System” es un relé tipo universal, programable, capaz de proteger múltiples puntos según las necesidades del usuario y la configuración de elementos de entrada/salida. Este modelo, tiene una capacidad máxima de protección de sobre corriente de tres puntos.

D.1. Descarga de software

Enervista es el software de carácter gratuito que permite realizar toda configuración del dispositivo “F35 Multiple Feeder Protection System”. Puede ser descargado en forma gratuita siguiendo los siguientes pasos:

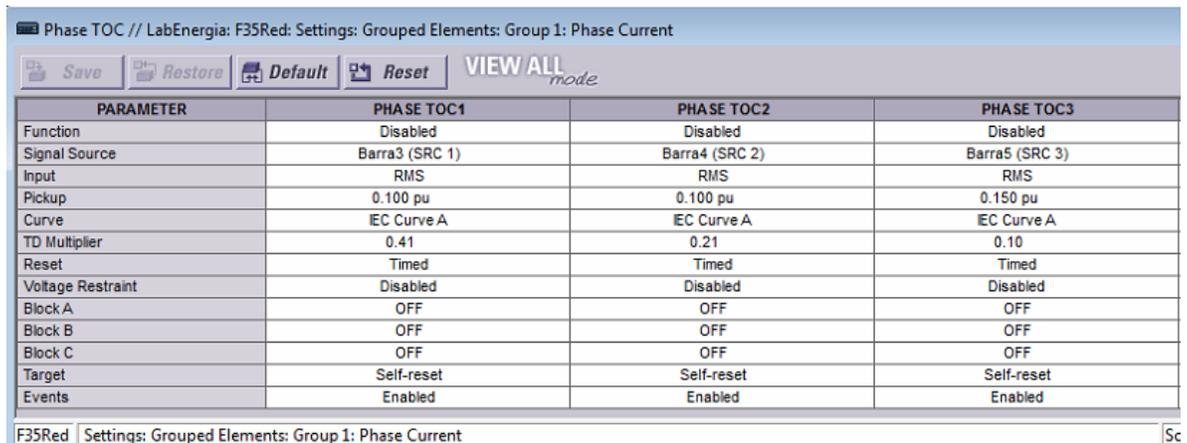
1. Ingresar a www.gegridsolutions.com
2. Crear un usuario.
3. Buscar “Enervista”.
4. Seleccionar el software “Viewpoint Engineer”.

Todo archivo obtenido mediante un sistema de protección se almacena en tipo “COMTRADE”, por lo que todo análisis realizado en la experiencia es capaz de ser almacenado y luego abierto en un computador personal teniendo el software Enervista instalado.

D.2. Configuración

Para realizar las configuraciones propuestas en el presente trabajo dentro del relé universal F35, es necesario tener acceso al software Enervista el cual se encuentra activo en el computador SCADA del laboratorio de energía y accionamientos. Para ingresar las configuraciones, se deben seguir los siguientes pasos:

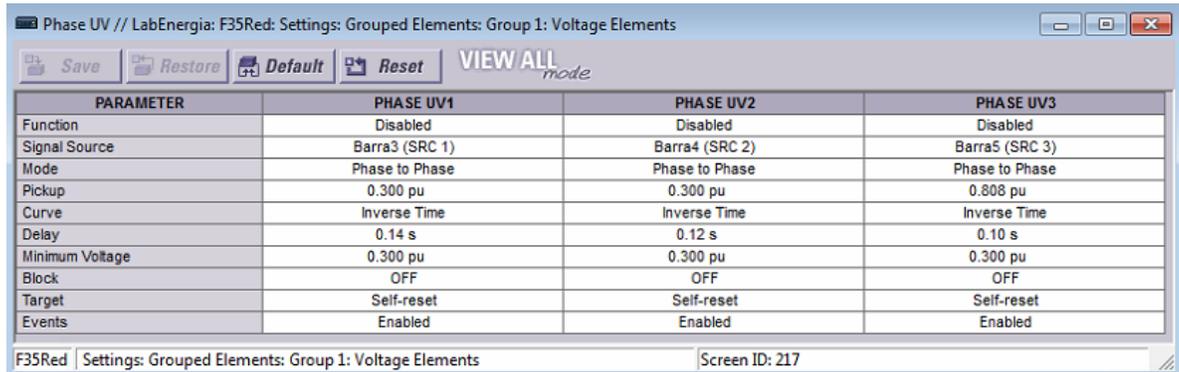
1. Abrir el programa y dirigirse a: LabEnergía → F35Red → Settings → Grouped Elements → Group 1
2. Apareceran dentro de “Group 1” diversas funciones, el alumno debe ingresar a:
 - a. Phase current → Phase TOC: Para configurar la protección de sobre corriente.



PARAMETER	PHASE TOC1	PHASE TOC2	PHASE TOC3
Function	Disabled	Disabled	Disabled
Signal Source	Barra3 (SRC 1)	Barra4 (SRC 2)	Barra5 (SRC 3)
Input	RMS	RMS	RMS
Pickup	0.100 pu	0.100 pu	0.150 pu
Curve	IEC Curve A	IEC Curve A	IEC Curve A
TD Multiplier	0.41	0.21	0.10
Reset	Timed	Timed	Timed
Voltage Restraint	Disabled	Disabled	Disabled
Block A	OFF	OFF	OFF
Block B	OFF	OFF	OFF
Block C	OFF	OFF	OFF
Target	Self-reset	Self-reset	Self-reset
Events	Enabled	Enabled	Enabled

Figura 7: Recuadro de configuración de sobre corriente.

- b. Voltage Elements → Phase UV: Para configurar la protección de baja tensión.



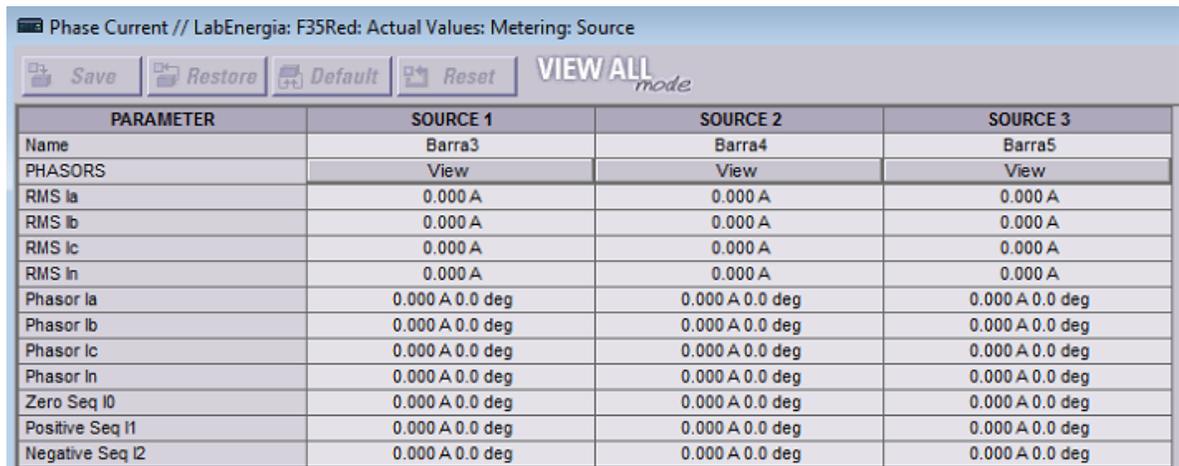
PARAMETER	PHASE UV1	PHASE UV2	PHASE UV3
Function	Disabled	Disabled	Disabled
Signal Source	Barra3 (SRC 1)	Barra4 (SRC 2)	Barra5 (SRC 3)
Mode	Phase to Phase	Phase to Phase	Phase to Phase
Pickup	0.300 pu	0.300 pu	0.808 pu
Curve	Inverse Time	Inverse Time	Inverse Time
Delay	0.14 s	0.12 s	0.10 s
Minimum Voltage	0.300 pu	0.300 pu	0.300 pu
Block	OFF	OFF	OFF
Target	Self-reset	Self-reset	Self-reset
Events	Enabled	Enabled	Enabled

Figura 8: Recuadro de configuración de baja tensión.

D.3. Visualización de variables

El software es capaz de entregar el valor de las variables del sistema en tiempo real, y son dichos valores los que producen el accionamiento de la protección configurada. Para acceder a los valores y visualizarlos mientras se esté variando la carga se deben seguir los siguientes pasos:

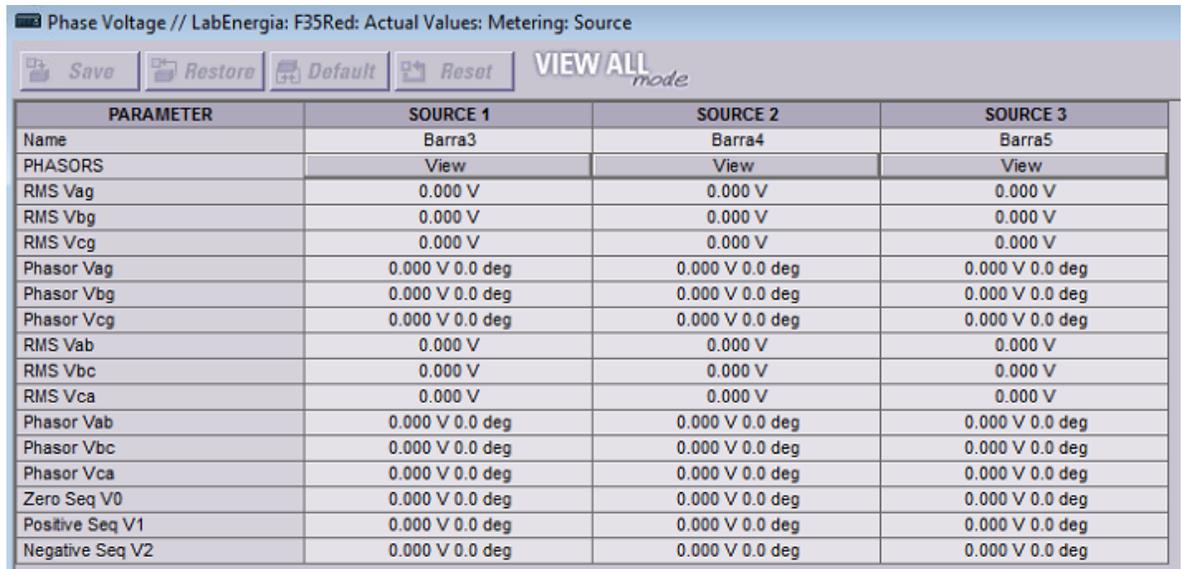
1. Abrir el programa y ubicar pestaña donde se ingresarán dichos comandos. Para ello dirigirse a: LabEnergía → F35Red → Actual Values → Metering → Source
2. Para acceder a las mediciones de corriente entrar a “Phase Current”



PARAMETER	SOURCE 1	SOURCE 2	SOURCE 3
Name	Barra3	Barra4	Barra5
PHASORS	View	View	View
RMS Ia	0.000 A	0.000 A	0.000 A
RMS Ib	0.000 A	0.000 A	0.000 A
RMS Ic	0.000 A	0.000 A	0.000 A
RMS In	0.000 A	0.000 A	0.000 A
Phasor Ia	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Phasor Ib	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Phasor Ic	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Phasor In	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Zero Seq I0	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Positive Seq I1	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Negative Seq I2	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg

Figura 9: Ventana de mediciones en tiempo real de corriente por fase.

3. Para acceder a las mediciones de tensión entrar a “Phase Voltage”.



PARAMETER	SOURCE 1	SOURCE 2	SOURCE 3
Name	Barra3	Barra4	Barra5
PHASORS	View	View	View
RMS Vag	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vbg	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vcg	0.000 V	0.000 V	0.000 V
Phasor Vag	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vbg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vcg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
RMS Vab	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vbc	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vca	0.000 V	0.000 V	0.000 V
Phasor Vab	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vbc	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vca	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Zero Seq V0	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Positive Seq V1	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Negative Seq V2	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg

Figura 10: Ventana de mediciones en tiempo real de tensión por fase.

Para visualizar las variables durante la falla y poder extraer los datos en archivos COMTRADE es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Abrir el programa y dirigirse a: LabEnergía → F35Red → Actual Values → Records
2. Dirigirse a “Fault Reports” si se desean los datos de voltaje y corriente pre y post falla.
3. Dirigirse a “Oscilography” para obtener los datos del oscilograma que muestran el comportamiento de las variables durante la contingencia.
 - a. Hay opciones para abrir diversos archivos según el número de aparición. Usted debe abrir el último.
 - b. Aparecerá el comportamiento en el tiempo de las corrientes y las tensiones antes y después del accionamiento de la protección.

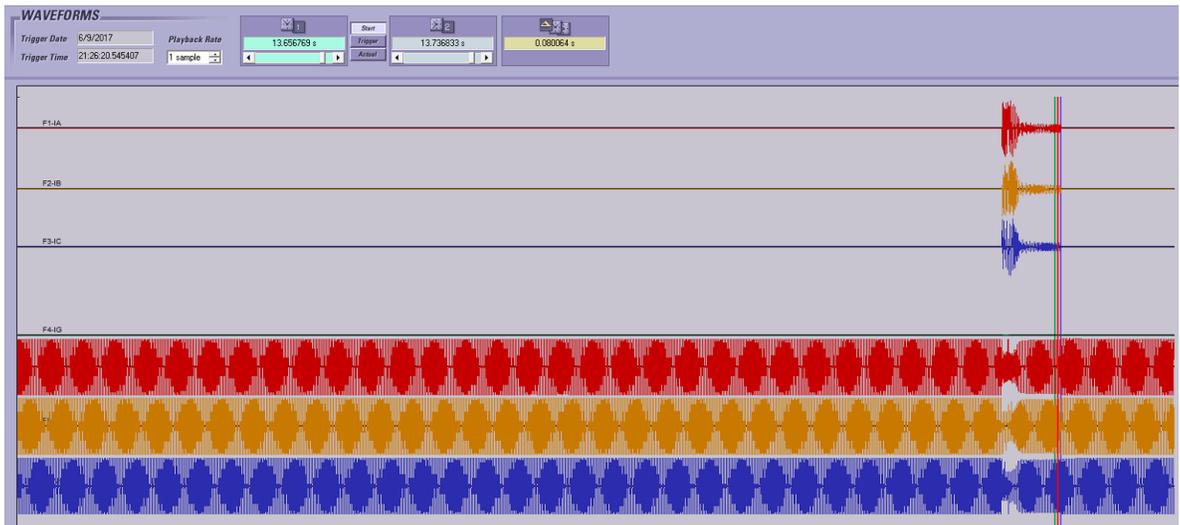


Figura 11: Oscilografía de tensión y corriente otorgado por Enervista.

- c. Para guardar estos archivos, en la esquina superior izquierda aparecerá la opción para almacenar estos datos como archivos COMTRADE y poder abrirlos en cualquier computador personal.

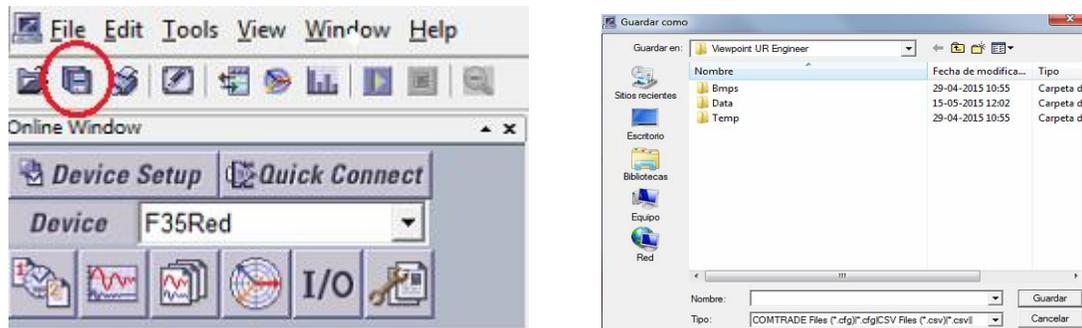


Figura 12: Lugar para activación de guardado de archivos COMTRADE.

D.4. Accionamiento en la micro-red

Los relés de protección actuarán sobre una bobina de apertura remota instalada en el interior de los interruptores trifásicos, los cuales son de la marca GE, modelo FDE, 50A. Los interruptores incluyen protección termo-magnética, sin embargo, para evitar que actúen en caso de falla, el ajuste se define al máximo posible.

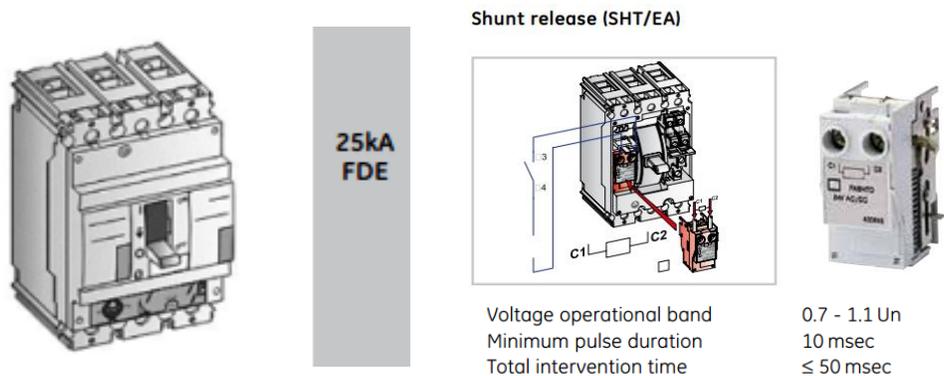


Figura 13: Interruptor utilizado mostrando la bobina de apertura a 220VCA-250VCC

En este laboratorio sólo se utilizará la secuencia de coordinación de los puntos de protección formados por las barras 3, 4 y 5, las cuales se protegen por medio del relé F35. Los relés ABB no serán utilizados en esta oportunidad.

La figura 3 presenta la plantilla de trabajo utilizada en este laboratorio, mostrando las tres barras protegidas por el relé F35. Este es un relé tipo universal, programable, capaz de proteger múltiples puntos según las necesidades del usuario y la configuración de elementos de entrada/salida. Este modelo, tiene una capacidad máxima de protección de sobre corriente de tres puntos. La figura 4 presenta el relé F35, mostrando su parte frontal (A), así como el software Enervista (B). Además, en la figura 4 (C) se puede ver un diagrama de conexionado particular, mostrando cinco puntos de medición de corriente y uno de tensión al lado derecho del relé. Al lado izquierdo están las señales de entrada y salida, así como los puertos de comunicación.

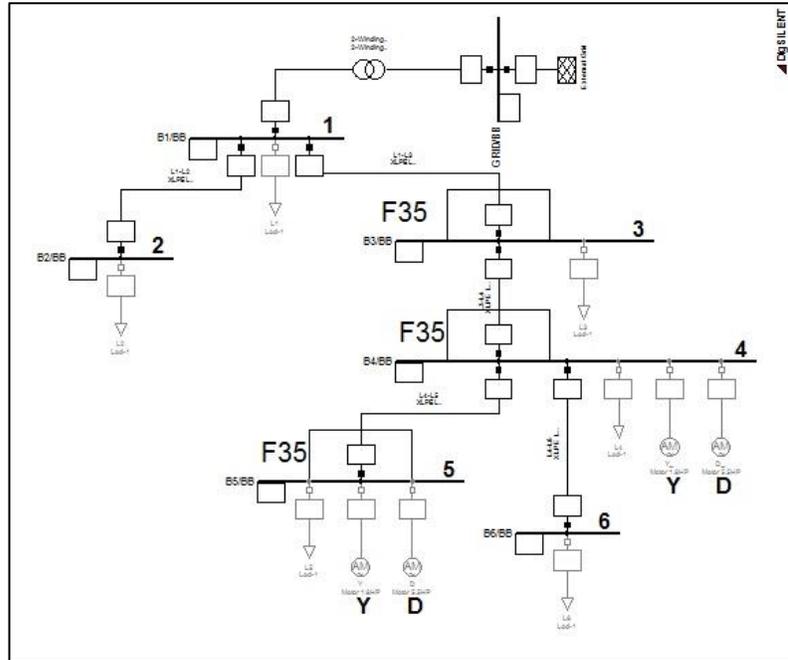


Figura 14: Plantilla de trabajo de la micro-red en el software Power Factory

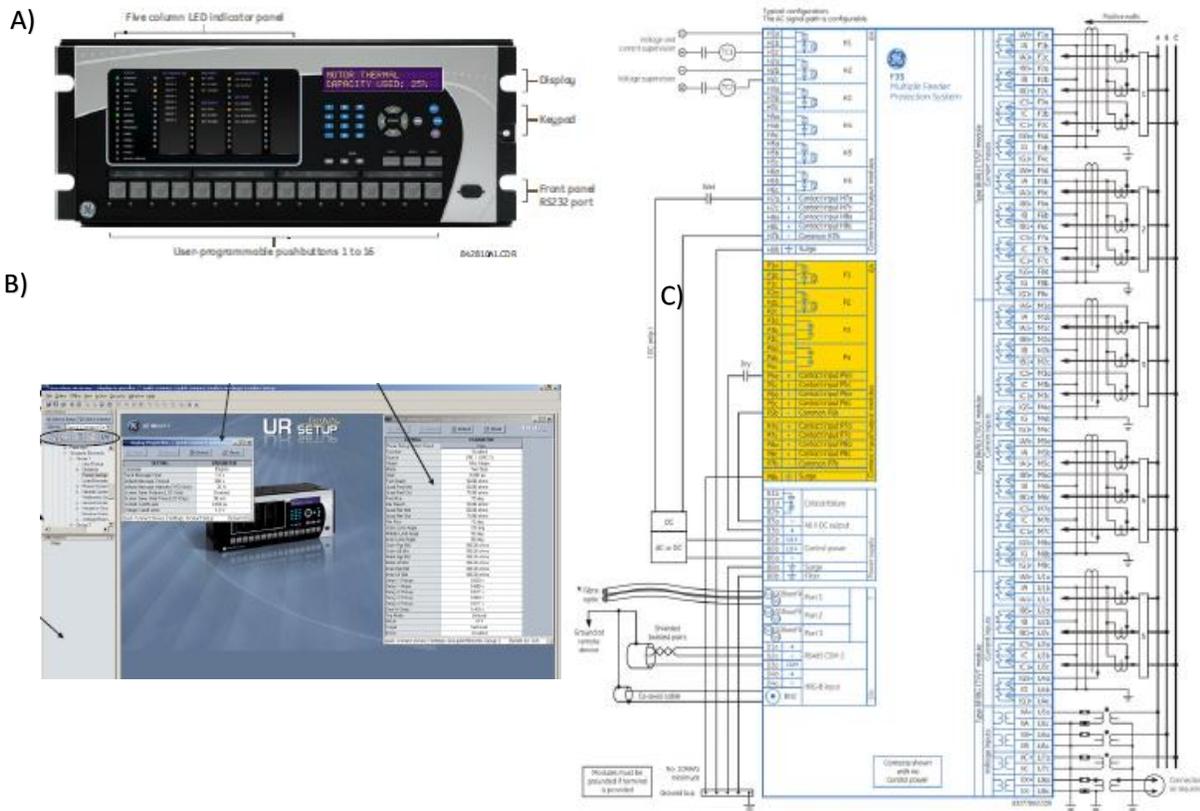


Figura 15: Relé F35: (A) Frente (B) Software ENERVISTA (C) Diagrama conexión

E. ACTIVIDADES

- ▲ ***Siga las instrucciones de los asistentes de la micro-red.***
- ▲ ***Revise y siga todas las medidas de seguridad.***
- ▲ ***Cada vez que realice un cambio de conexión del motor, accione el pulsador de emergencia.***



E.1. Reconocimiento de la Micro - Red

Reconozca la topología de la micro-red, analizando el transformador de aislamiento, los puntos de conexión, los equipos de medida, la interfaz computarizada de medición, los modelos de líneas de distribución, las cargas para el sistema, y otros.

Configure en la micro-red las líneas del sistema con el modelo de distribución.

NOTA: 1 p.u. de corriente corresponde a 20A y 1 p.u. de tensión corresponde a 400VCA.

E.2. Función de protección de sobre corriente (ANSI 51)

1. Aplicación de la función de tiempo definido (instantánea):

- En la barra 5 conecte la carga variable.
- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de sobre corriente de tiempo definido con un pick-up de 2A (0.1p.u.) y un marcador de tiempo de 0s.
- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una corriente de 1.98-1.99A (verifique la fase mayor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga por encima de 2A y verifique el disparo.
- Revise el Reporte de Falla en el software Enervista (fault report) y anote la corriente pre-falla y post-falla.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada (que corresponde efectivamente a la sobre corriente instantánea).

2. Aplicación de la función de tiempo inversa (retardada):

- En la barra 5 conecte la carga variable.



- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de sobre corriente de tiempo inverso con un pick-up de 2A (0.1p.u.) y un marcador de tiempo de 1s.
- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una corriente mayor de 1.98-1.99A (verifique la fase mayor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga por encima de 2.3A (aproximadamente) y verifique el disparo.
- Revise el Oscilografía en el software Enervista para estimar el tiempo de disparo.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada.

E.3. Ajuste de la función de protección de baja tensión (ANSI 27)

1. Aplicación de la función de tiempo definido (instantánea)

- En la barra 5 conecte la carga variable.
- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de baja tensión de tiempo definido con un pick-up de 0.98p.u. (392VCA) y un marcador de tiempo de 0s.
- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una tensión de barra de 402-404VCA (verifique en la fase menor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga para provocar una caída bajo los 400VCA y verifique el disparo.
- Revise el Reporte de Falla en el software Enervista (fault report) y anote la tensión pre-falla y post-falla.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada (que corresponde efectivamente a la sobre corriente instantánea).

2. Aplicación de la función de tiempo inversa (retardada)

- En la barra 5 conecte la carga variable.
- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de baja tensión de tiempo inverso con un pick-up de 0.98p.u. (392VCA) y un marcador de tiempo de 1s.

Cualquier duda, consulta o sugerencia favor escribir a pablo.gonzalez.i@ing.uchile.cl



- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una tensión de barra de 402-404VCA (verifique la fase menor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga para provocar una caída bajo los 400VCA y verifique el disparo.
- Revise el Oscilografía en el software Enervista para estimar el tiempo de disparo.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada.

E.4. Ajuste de la función de protección combinada por sobre corriente (51) – baja tensión (27)

E.4.1. Barra 5

1. Ajuste las protecciones de sobre corriente según los parámetros calculados previamente, asumiendo que el arranque del motor en triángulo es una falla de corto circuito. Encuentre los ajustes de las protecciones de manera que el motor pueda arrancar en estrella, pero que al hacerse el arranque en triángulo sea sentido como una condición anormal.
 - Asegúrese que las protecciones de baja tensión están desactivadas.
 - Conecte el motor en la barra 5.
 - Haga la conexión estrella (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
2. Ajuste las protecciones de sobre corriente según las recomendaciones de la sección C para la corriente de pick-up.
 - Asegúrese que las protecciones de baja tensión están desactivadas.
 - Haga la conexión estrella (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.



- En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
3. Active las protecciones de baja tensión y ajústelas de manera que determinen el arranque en estrella como normal, y el arranque en triángulo como anormal.
- Haga la conexión estrella (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.

E.4.2. Barra 4

1. Con los ajustes de la sección anterior (punto 3.), conecte el motor en la barra 4 y verifique el desempeño de las protecciones.
- Asegúrese que la protección de baja tensión de la barra 5 está desactivada.
 - Asegúrese que las protecciones de sobre corriente y baja tensión en las barras 4 y 3 están activadas.
 - Haga la conexión estrella (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.

F. ADVERTENCIAS & COMENTARIOS

- ⚠ *Tener precaución cuando se use el motor eléctrico.*
- ⚠ *Cada vez que realice un restablecimiento de un interruptor asegúrese que la micro-red se encuentra desenergizada.*
- ⚠ *Todas las conexiones de carga y entre barras deben ser aprobadas por el asistente del laboratorio.*
- ⚠ *Las mediciones de tensión, corriente, potencia activa y reactiva están integradas en el sistema instalado, no se requiere el uso de instrumentos tipo multímetro.*
- ⚠ *Tome en cuenta las siguientes conexiones en el motor eléctrico*

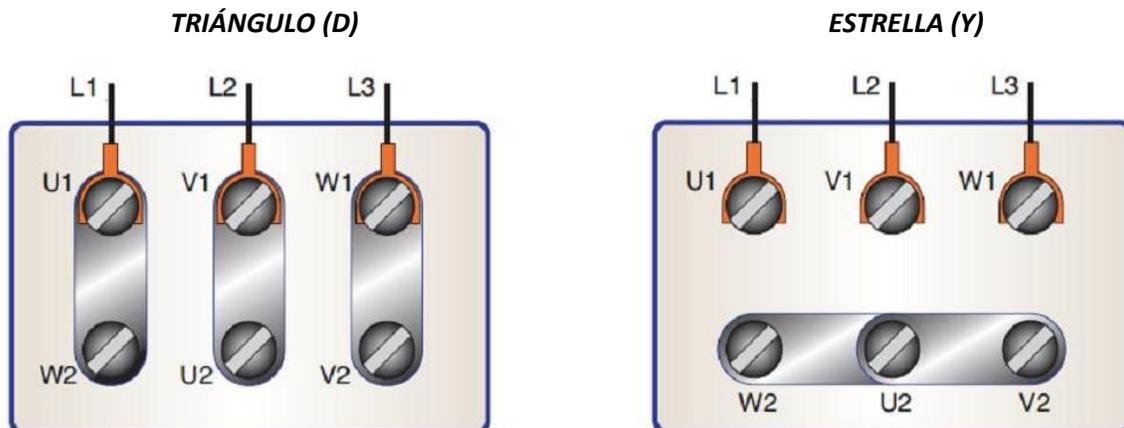


Figura 16: Conexiones del motor eléctrico trifásico ζ

G. ANEXOS

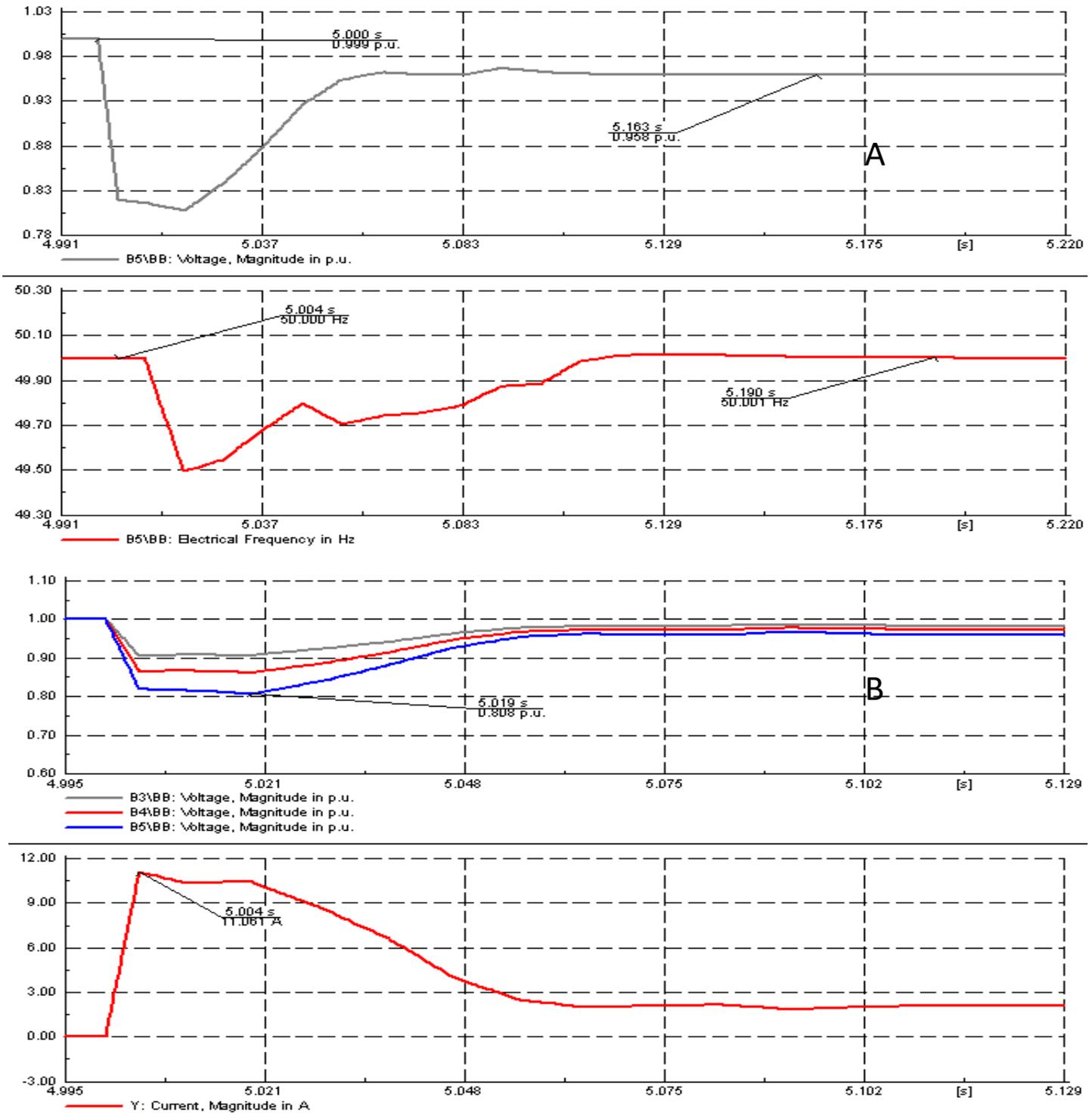


Figura 17: Simulación arranque en Y: (A) Tensión y Frecuencia en B5 (B) Tensión en B5-B4-B3 y Corriente del Motor

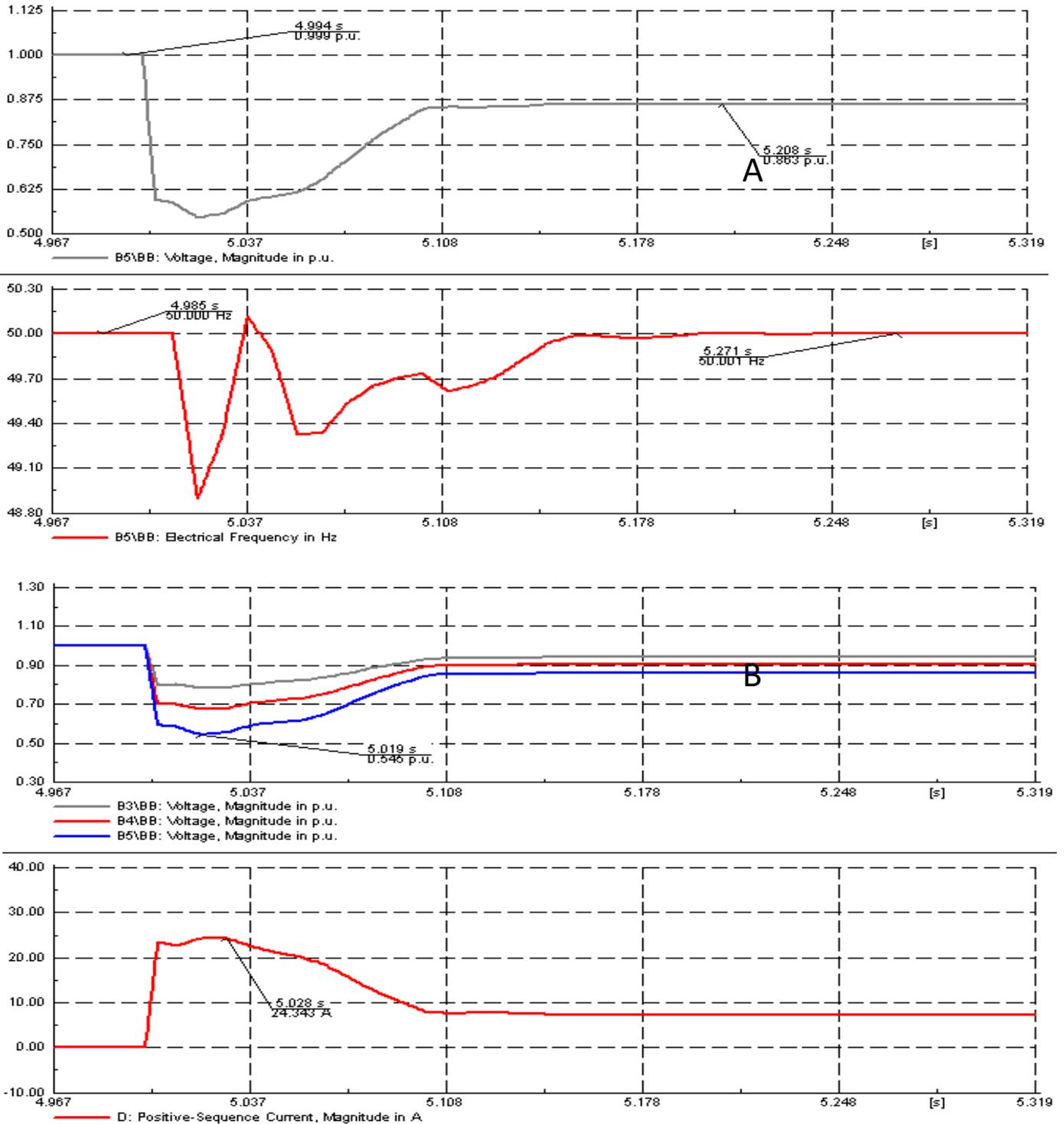


Figura 18: Simulación arranque en D: (A) Tensión y Frecuencia en B5 (B) Tensión en B5-B4-B3 y Corriente del Motor

8.7. Guía teórica final

EL5203 Laboratorio de Energía: Laboratorio de Protecciones – Guía Teórica

A. INTRODUCCIÓN

La operación de un sistema eléctrico de potencia requiere el cumplimiento de cuatro requerimientos fundamentales:

1. **Economía:** Uno de los principales desafíos que debe cumplir el organismo regulador del sistema eléctrico, es el de satisfacer la demanda a mínimo costo.
2. **Seguridad:** Un sistema eléctrico debe ser capaz de soportar diversas contingencias manteniendo los índices de calidad.
3. **Suficiencia:** El suministro eléctrico debe ser entregado con un número razonable de interrupciones, las cuales son definidas por la norma técnica de seguridad y calidad de servicio de cada país.
4. **Calidad:** Las variables del sistema deben mantenerse dentro los estándares de calidad establecidos por la norma técnica de cada país.

La Figura 1 muestra los requerimientos fundamentales dentro de un sistema eléctrico de potencia, donde el requerimiento de seguridad está relacionado de manera directa con el sistema de protección de un SEP.

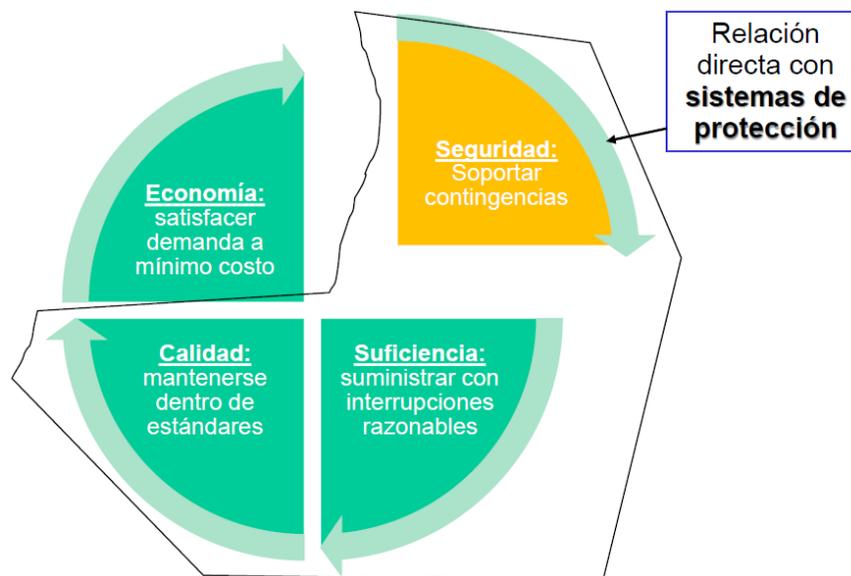


Figura 1: Requerimientos fundamentales de un sistema eléctrico de potencia.



Un requerimiento general dentro de un sistema eléctrico de potencia, es el de salvaguardar el sistema con el fin de mantener la continuidad de servicio, minimizar daños y pérdidas en el caso de fallas, junto con asegurar la seguridad de las personas.

Lo anterior se logra con:

- Detección temprana de fallas y anomalías, a partir de la pronta remoción del equipo o zona fallada, donde la falla debe eliminarse en el menor tiempo posible.
- Identificando y aislando los componentes fallados del sistema, garantizando a la mayor cantidad de consumidores posible el servicio. En otras palabras, se debe aislar la zona más pequeña posible.
- El dispositivo de protección más cercano a la falla debe operar primero. En caso de no ser activado, los dispositivos más alejados deben actuar. Lo anterior implica una correcta coordinación de los dispositivos presentes en el sistema.

B. EXIGENCIAS BÁSICAS DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN

La protección ideal sería aquella que actúe frente a diversas anomalías que se presenten en el sistema eléctrico, en el menor tiempo posible y su inversión implique el menor costo. Debido a que esto no es posible conseguirlo en la mayoría de los casos, generalmente se valoran diversos aspectos:

1. Seguridad: La probabilidad de no actuación de un sistema o componente cuando no debe hacerlo.
2. Confiabilidad: La probabilidad de actuación de un sistema o componente cuando debe hacerlo.
3. Fiabilidad: La probabilidad de que un sistema o componente actúe única y exclusivamente cuando debe hacerlo. Es producto de la seguridad y confiabilidad.
4. Precisión: La respuesta que tiene el sistema a los valores de entrada.
5. Rapidez: El tiempo invertido desde la aparición del incidente hasta el momento en que cierra sus contactos el relé. El aumento de rapidez implica una disminución en la fiabilidad.
6. Flexibilidad: Capacidad de la protección para adaptarse a cambios funcionales.
7. Simplicidad: En lo que concierne al diseño, se refiere a reducir al mínimo el número de funciones e interacciones.
8. Mantenimiento: Reducción al mínimo de piezas sujetas a desgaste, evitando el mantenimiento periódico.

9. Facilidades de prueba: Se otorga mayor valor que el equipo tenga incorporado dispositivos que faciliten su verificación, sin que sea necesario la desconexión de un conductor para realizar las pruebas.
10. Autodiagnóstico: Inclusión de funciones de auto verificación en la protección. Esta ventaja la presentan las protecciones digitales.
11. Modularidad: Las protecciones montadas en módulos facilitan la localización y reparación de averías.
12. Economía: Hacer todo lo anterior, al menor costo.

Dentro de las anomalías que pueden sufrir los sistemas eléctricos de potencia son:

1. Fallas: Corresponde a un daño inminente para los equipos, personas o inclusive para el sistema (puede llevar a inestabilidad y efectos cascadas). Su tiempo de acción es crítico y generalmente son menores a 1 segundo, en donde la respuesta automática debe ser la desconexión de parte del sistema eléctrico.
2. Perturbaciones: Corresponde a un potencial daño que puede llevar en el mediano o largo plazo a una falla. Su tiempo de acción no es crítico y se busca el mejoramiento a partir de una acción correctiva. Algunas perturbaciones son: sobrecargas, desequilibrios, calentamientos, sobretensiones moderadas, etc.

C. COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

Cuando se habla de coordinación de protecciones, nos referimos al problema de determinar la secuencia de operación en el tiempo de los relés, para cada posible localización de una falla, en donde la zona fallada debe ser aislada con suficiente margen y sin excesivo retardo de tiempo.

Cabe destacar que la secuencia seleccionada en cualquier sistema eléctrico depende de la topología de la red (sistema enmallado o radial), la característica de los relés (por ejemplo, cuántos puntos puede observar, si necesita comunicación con otro dispositivo, etc.), y la filosofía que persigue el sistema de protección.

En la Figura 2 se aprecia una red con topología radial, en donde la curva de color rojo representa los tiempos de activación de las protecciones (eje y), y las flechas horizontales azules representan la parte del sistema que puede llegar a desconectar la protección en caso de activación (eje x). Por ejemplo, si una falla se presenta en la zona protección de R1 y, si por algún motivo, ésta no se activa en el tiempo que tiene R1 para actuar, la protección R2 aguas arriba debe reaccionar frente a esto y desconectar la parte del sistema que está bajo su vigilancia, con una diferencia de tiempo denominado CTI (intervalo de coordinación).

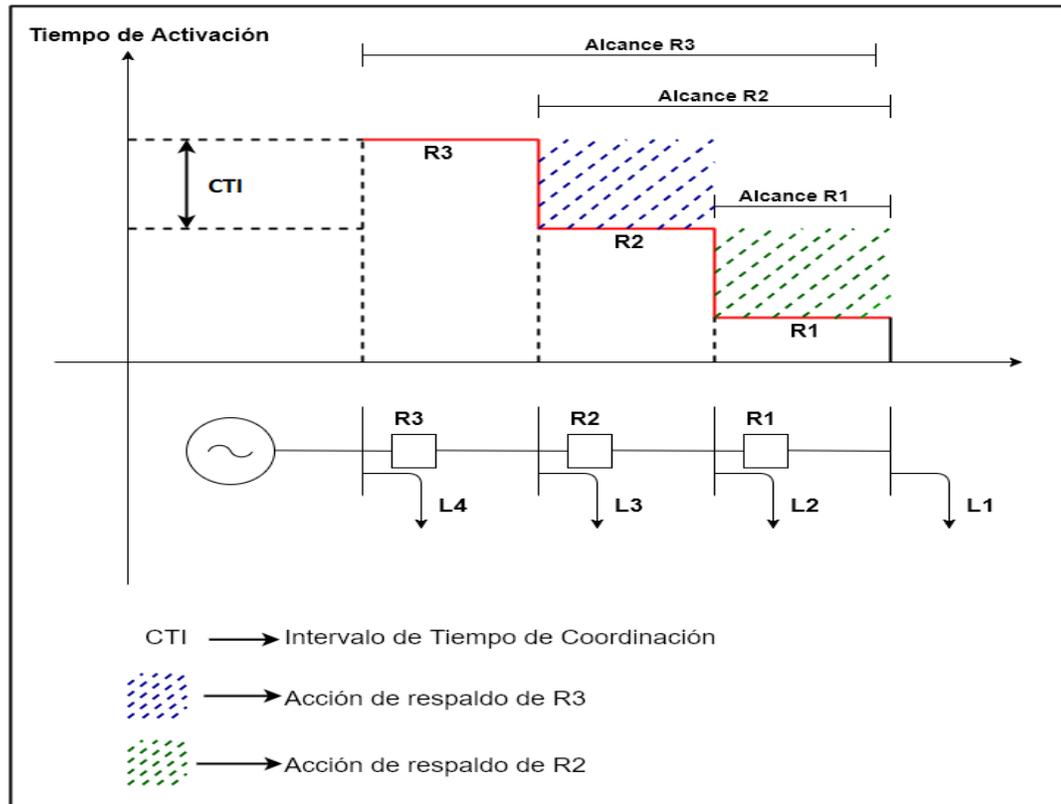


Figura 2: Requerimientos fundamentales de un sistema eléctrico de potencia.

Es necesario destacar una sutil diferencia entre lo que se entiende por un sistema de protección y un esquema de protección:

- Esquema de protección: Es la estrategia que se sigue para la selección de los tipos de dispositivos de protección, su disposición en la red y los ajustes necesarios. Se busca cumplir los requisitos establecidos según algún criterio. Entre los más comunes se encuentran: rapidez, selectividad, coordinación y confiabilidad.
- Sistema de protección: Es todo el conjunto de partes constitutivas, incluyendo los dispositivos, la red de comunicación, el sistema experto para el ajuste en línea y el esquema de protección.

D. FUNCIONES DE PROTECCIÓN

Desde los primeros sistemas eléctricos hasta los actuales los cambios de estos han sido gigantescos, como así lo han sido las problemáticas que le siguen, y las necesidades auxiliares de nuevos productos dado el rápido crecimiento, dentro de las que destacan los sistemas de protección.

Algunos de los dispositivos de protección más utilizados son:

D.1. Fusible

Es el método de protección más antiguo y que sigue siendo utilizado en la actualidad. Su principio de activación se basa en el incremento de temperatura que sufre el hilo conductor al ser atravesado por un determinado flujo de corriente. El material conductor se calibra de tal manera, que se funde cuando la corriente alcanza un nivel predeterminado. Algunas de sus principales desventajas son: baja precisión, bajo poder de corte y rápido envejecimiento. Aunque, por otro lado, tiene una rápida actuación (del orden de los 5 [ms]), reduciendo por lo tanto las oscilaciones térmicas y dinámicas de los circuitos.



Figura 3: Imagen de un fusible utilizado en aplicaciones de electrónica y electricidad básica.

D.2. Interruptor termomagnético

Es un método de protección algo más complejo que el anterior, donde su activación puede ser realizada por acción térmica, o bien, acción magnética. El primer fenómeno tiene su origen en una lámina bimetálica (dos metales con distinta composición), que al calentarse producto del paso de la corriente sufre deformación, provocando el accionamiento mecánico de apertura del contacto. Esta protección tiene la función de encargarse de las sobre corrientes de pocas veces el nivel nominal (1 a 3 veces). A esta zona también se le conoce como zona de sobre carga. Por otro lado, el segundo fenómeno tiene su origen en una bobina (electroimán), en donde al circular una determinada corriente, produce un campo magnético que atrae al núcleo en su interior. Así, sobrepasando un cierto límite de corriente, se atrae completamente el núcleo, accionando en forma mecánica la apertura. Esta protección tiene la función de encargarse de las sobre corrientes de

varias veces el valor nominal (3 a 100 veces), y su rapidez tiene el orden de 25 milésimas de segundos. A esta última zona también se le conoce como zona de corto circuito.

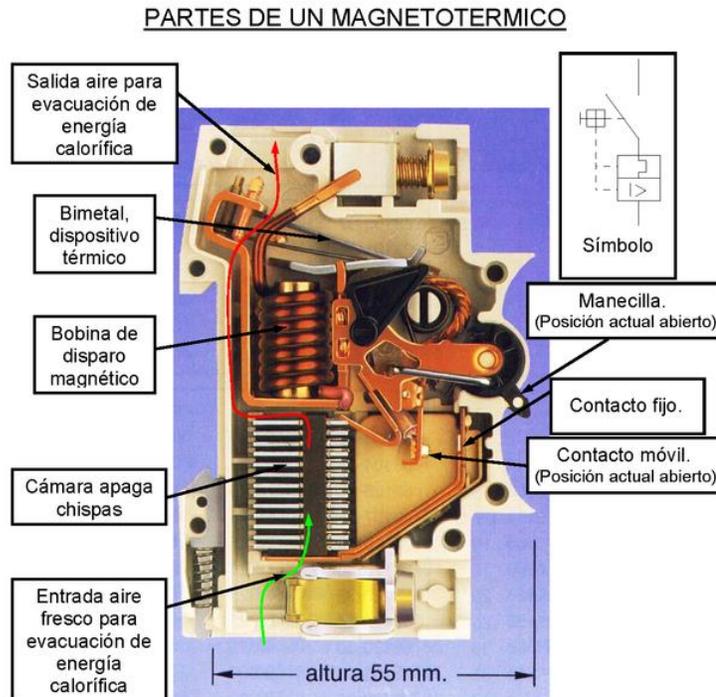


Figura 4: Partes de un interruptor termomagnético.

D.3. Sistemas electrónicos digitales

Desde la aparición de los primeros microprocesadores grandes avances se han realizado en el campo de la energía, en donde los sistemas de protección no se han quedado atrás. Fabricantes han utilizado esta tecnología en conjunto con los adelantos en las tecnologías de comunicación para crear estos nuevos equipos.

El esquema de bloques lógicos que utiliza un relé digital es el que se muestra en la Figura 5, en donde cabe destacar que dentro del bloque “utilización de datos”, es donde el relé digital utiliza las funciones definidas. Dentro de estas últimas se destacan:

- Funciones de protección de sobre corriente de tiempo inverso y tiempo definido (instantánea) por fase, por neutro, secuencia negativa y tierra.
- Funciones de protección de baja tensión de tiempo inverso y tiempo definido (instantánea) por fase.
- Función de sobre voltaje por fase y neutro.
- Protección térmica por sobre carga.
- Protección de alta y baja frecuencia.

Cualquier duda, consulta o sugerencia favor escribir a pablo.gonzalez.i@ing.uchile.cl

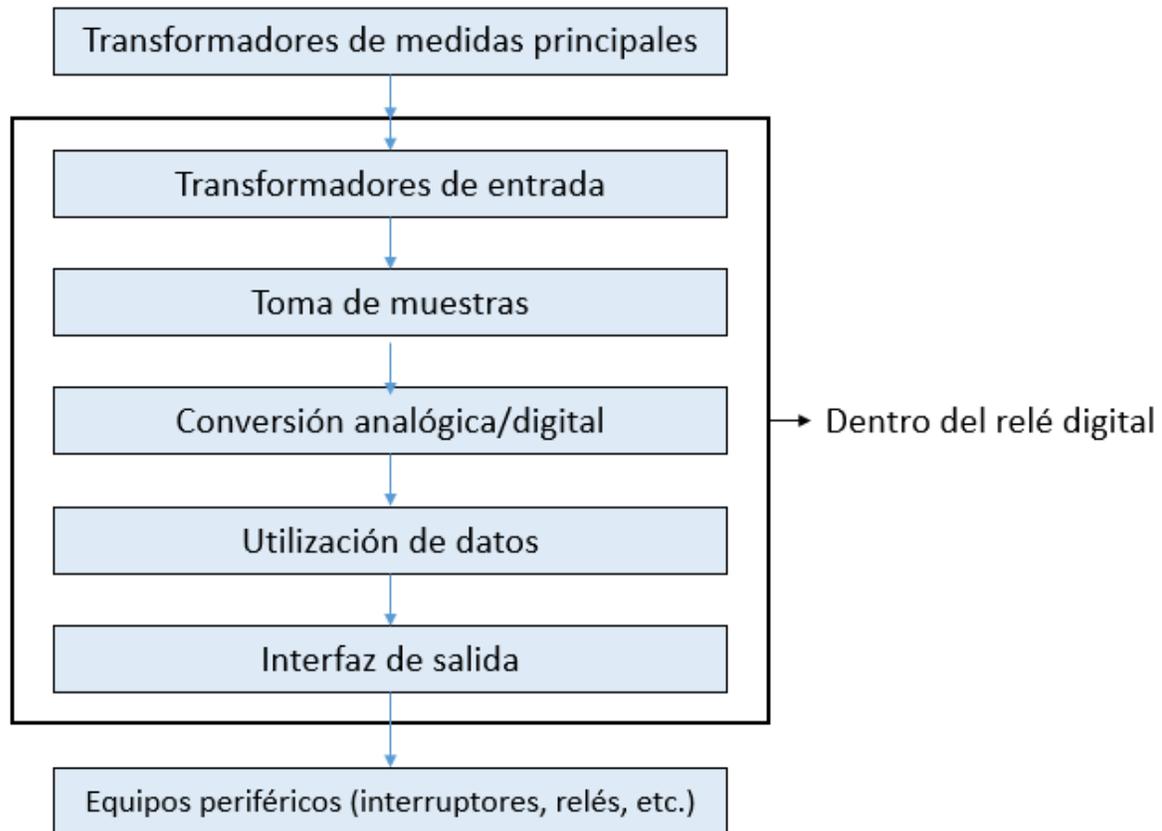


Figura 5: Pasos lógicos de un sistema electrónico digital.

E. CURVAS DE PROTECCIÓN UTILIZADAS

Dentro de la experiencia de laboratorio, se utilizarán dos protecciones que tienen predefinidas sus curvas de accionamiento dentro del dispositivo “F35 Multiple Feeder Protection System”. Estas son las protecciones de sobre corriente y baja tensión.

E.1.1. Protección de sobre corriente

Este tipo de protección utiliza el dato de corriente proveniente de alguna fase en un punto determinado del sistema, con el fin de compararlo con un límite definido con anterioridad. Mientras mayor sea esta razón, con mayor rapidez actuará la protección, actuando como un sistema EDAC (esquema de desconexión automática de carga).

La protección de sobre corriente utilizará una curva de tiempo inversa IEC tipo A (moderadamente inversa), donde la tabla 1 muestra las distintas opciones de curvas según la norma IEC. La curva característica se presenta a continuación:

$$T = TDM \times \left[\frac{K}{(I/I_{pickup})^E - 1} \right] \quad (1)$$

En donde se tiene:

- T: Tiempo de operación del relé en [s].
- TDM: Multiplicador de tiempo [S].
- K y E: Son constantes que definen el tipo de curva e intenta asemejar el comportamiento físico de un protector termomagnético.
- I: Corresponde a la corriente medida en el transformador de corriente secundario en [A].
- I_{pickup} : Corresponde al umbral o límite de corriente pre-definida en [A].

Tabla 1: Curvas de tiempo inverso IEC

IEC (BS) Curve Shape	K	E
IEC Curve A (BS142)	0,14	0,020
IEC Curve B (BS142)	13,500	1,000
IEC Curve C (BS142)	80,00	2,000
IEC Short Inverse	0,050	0,040

En la Figura 6 se muestra el efecto de variar el parámetro TDM, cuando el resto de las variables se mantienen fijas, inclusive manteniendo un mismo valor de corriente obtenida de los TTCC. Para fines prácticos, al aumentar el TDM aumenta el tiempo de activación del relé, desplazando la curva en forma ascendente. En la misma figura 6 se aprecia una recta roja, que representa a I_{pickup} .

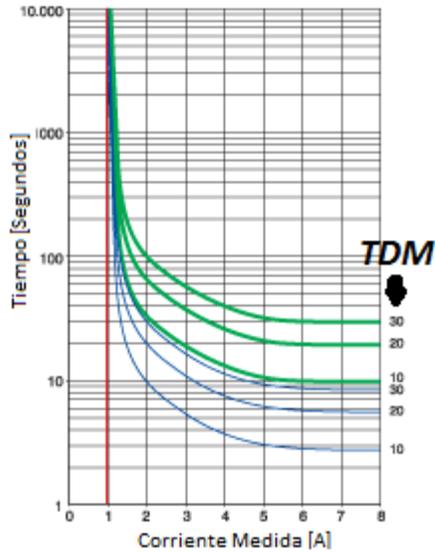


Figura 6: Curvas de tiempo inverso de sobre corriente.

Dentro de la función de sobre corriente se pueden manipular tan solo dos variables: TDM e I_{pickup} .

IMPORTANTE: En el software Enervista, el valor de pickup tiene un máximo de 2 decimales, al igual que el parámetro TDM.

E.1.2. Protección de baja tensión

Este tipo de protección utiliza el dato de tensión proveniente de alguna fase en un punto determinado del sistema, con el fin de compararlo con un límite definido con anterioridad. Mientras mayor sea esta razón con mayor rapidez actuará la protección, actuando como un sistema EDAC (esquema de desconexión automática de carga).

La protección de baja tensión utilizará una curva de tiempo inversa propia del relé F35, y sigue la ecuación:

$$T = \frac{D}{\left(1 - \frac{V}{V_{pickup}}\right)} \quad (2)$$

En donde se tiene:

- T= Tiempo de operación del relé en [s].

Cualquier duda, consulta o sugerencia favor escribir a pablo.gonzalez.i@ing.uchile.cl

- D: Seteo de retardo [s].
- V corresponde a la tensión medida [V].
- V_{pickup} corresponde al umbral o límite de tensión pre-definida [V].

En la Figura 7 se muestra el efecto de variar el retardo de la función, en donde la recta azul corresponde al V_{pickup} . Como se puede apreciar, al aumentar esta variable para un mismo valor de razón entre V y V_{pickup} , mayor será el tiempo de activación de la protección.

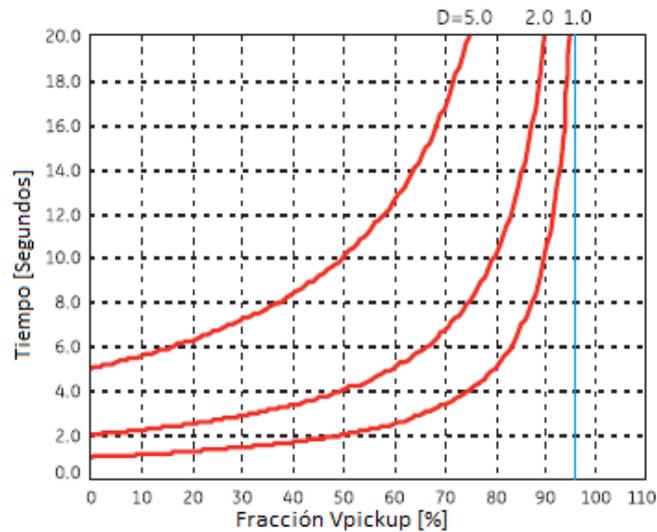


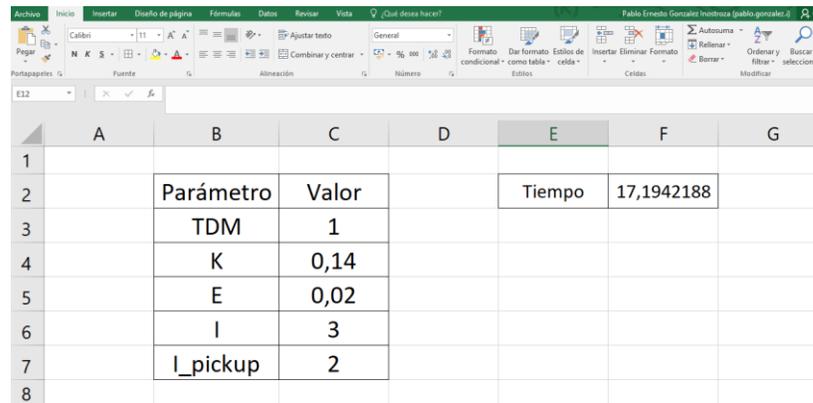
Figura 7: Curvas de tiempo inverso de baja tensión.

Dentro de la función de baja tensión se pueden manipular tan solo dos variables: D y V_{pickup} .

IMPORTANTE: En el software Enervista, el valor de pickup tiene un máximo de 3 decimales y el parámetro D tiene un máximo de 2 decimales.

E.1.3. Ejemplo cuantitativo

Para una mayor claridad, a continuación, se presentará un pequeño ejemplo del tiempo de activación para ambas protecciones. Para esta ocasión, lo mejor sería generar en Excel una tabla con los parámetros con sus respectivos valores, y en una casilla generar la ecuación para definir el tiempo de activación, tal como se presenta en la Figura 8.



	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		Parámetro	Valor		Tiempo	17,1942188	
3		TDM	1				
4		K	0,14				
5		E	0,02				
6		I	3				
7		I_pickup	2				
8							

Figura 8: Tabla dinámica en Excel para cálculo de tiempo de activación.

Protección de sobre corriente

Tal como se mencionó en el capítulo E, la protección de sobre corriente se rige por la ecuación (1) y los parámetros que se pueden variar para definir el tiempo de actuación son TDM e I_{pickup} .

En la tabla Tabla 2 se muestra el comportamiento del tiempo al variar los parámetros TDM e I para un mismo valor de I_{pickup} . Esta fácil resolución se puede ver representada de otra forma, y es que, sabiendo el tiempo que un usuario desea que actúe una cierta protección, para una cierta corriente, la resolución se puede obtener mediante la variación de los parámetros TDM e I_{pickup} , tal como se muestra en la tabla Tabla 3.

Tabla 2: Tabla variando TDM y corrientes.

TDM [Seg]	I_{pickup} [A]	I [A]	Tiempo [Seg]
1	2	3	~17
1	2	8	~5
0.01	12	24	~0.1
0.01	12	13	~0.87

Tabla 3: Tabla ejemplificativa para obtener un tiempo de apertura.

Tiempo [Seg]	I [A]	I_{pickup} [A]	TDM
--------------	-------	------------------	-----

0.03	22	13	0.02
0.06	22	15	0.03
1	6	4	0.06

Protección de baja tensión

Para la protección de baja tensión se persigue la misma idea. En la Tabla 4 se presentan ejemplos para diversos valores de los parámetros de la función de baja tensión.

Tabla 4: Valores de tiempo de activación para protección de baja tensión.

D [Seg]	V [p.u.]	V_{pickup} [p.u.]	Tiempo [Seg]
1	0.97	0.98	98
1	0.9	0.98	12.25
0.01	0.5	0.65	0.043

8.8. Guía práctica final

EL5203 Laboratorio de Energía: Laboratorio de Protecciones – Guía Práctica

A. INTRODUCCIÓN

El diseño de los sistemas de protección asociados con redes de baja y media tensión se ha basado en la presunción de flujos unidireccionales, haciendo posible el uso de relés de sobre corriente de manera coordinada. Sin embargo, la inclusión de generación distribuida y micro-redes en las redes de distribución han modificado esta perspectiva. Por lo tanto, es necesario proponer nuevos esquemas de protección para una operación segura y confiable de estos sistemas eléctricos.

En esta experiencia de laboratorio se aplicará un enfoque para un sistema de protección, el cual es posible aplicar en sistemas de distribución que incluyan micro-redes y generación distribuida. Para esto se cuenta con una micro-red trifásica en el laboratorio de energía, con una topología radial de seis barras, la cual incluye relés de protección e interruptores. La Figura 1 muestra la topología de la micro-red a utilizar en este laboratorio.

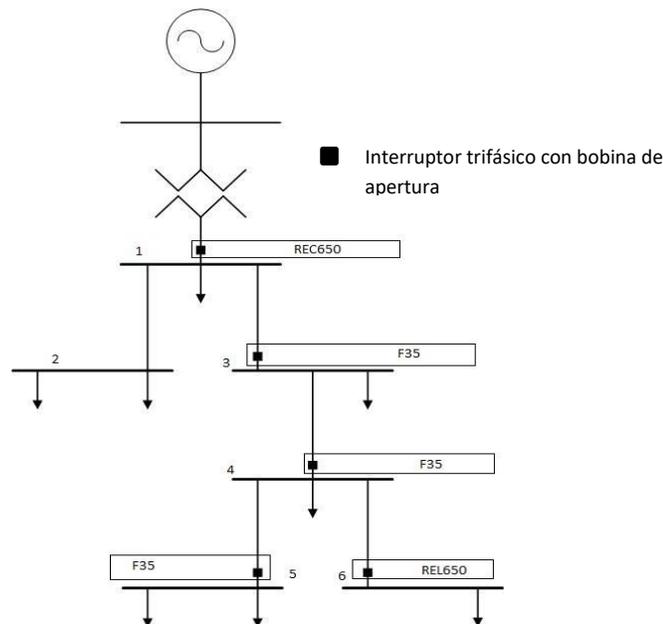


Figura 1: Topología de la micro-red

Las líneas están diseñadas de tal forma de simular sistemas de distribución y transmisión.



Los relés de protección que se muestran en la Figura 1 se describen a continuación:

Barra 1: Relé REC650, marca ABB, para protección de punto de acople común (PCC por sus siglas en inglés), con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A. (TC: transformador de corriente).

Barra 2: No incluye relé de protección.

Barra 3: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 3, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 4: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 4, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 5: Relé F35, marca GE, para protección de la barra 5, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

Barra 6: Relé REL650, marca ABB, para protección de la barra 6, con interruptor de la Figura 2, incluye 3xTC 100:5A.

B. OBJETIVOS

- **Objetivos Generales:**
 1. Aplicar en una experiencia real, un sistema de protección utilizando un relé programable, considerando una coordinación de tres puntos (barras) de protección en la micro-red.
 2. Determinar el ajuste requerido para los tres puntos de protección, según criterios entregados en la guía teórica.
 3. Determinar el ajuste considerando el requerimiento de coordinación de protecciones cronométrica, utilizando un intervalo de coordinación entre 100-200ms.
- **Objetivos Específicos:**
 1. Comparar el uso de una protección de sobre corriente con curva inversa, contra una de tipo tiempo definido, al despejar una falla.
 2. Comparar el uso de una protección de baja tensión con curva inversa, contra una de tipo tiempo definido, al despejar una falla.
 3. Aplicar una protección combinada de sobre corriente y baja tensión en barras donde se arranca un motor eléctrico trifásico en diferentes conexiones, como forma de provocar una perturbación (condición anormal).

C. INFORMACIÓN PARA REALIZAR CÁLCULOS DE AJUSTES Y COORDINACIÓN

Para la actividad D.4, se pide realizar un análisis previo (en casa), para definir los ajustes de las funciones de protección de sobre corriente y baja tensión. Estos ajustes se programarán para probar su respuesta frente a distintas perturbaciones, que consisten en arrancar un motor eléctrico trifásico en la barra 5 del sistema. La información entregada en la Tabla 1 corresponde a datos medidos y simulados en las barras 5, 4 y 3. En anexos se pueden encontrar las Figura 14 y Figura 15, que poseen las gráficas obtenidas en DigSilent para la simulación de ambas configuraciones.

C.1. Barra 5

Tabla 1: Datos de arranque del motor en la BARRA 5.

Tipo	Variable	Conexión Estrella (Y)			Conexión Triángulo (D)		
		B5	B4	B3	B5	B4	B3
Simulación	Corriente peak (A)	11	11	11	24	24	24
	Caída tensión (V)	323	340	364	220	276	320
Medido	Corriente peak (A)	11	11	11	24.8	24.8	24.8
	Caída tensión (V)	329	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	234	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>

NOTAS:

- B5, B4 y B3: Barras 5, 4 y 3, respectivamente.
- *n.d.*: No datos.
- Voltaje medido antes del arranque: 398V.
- Corriente en vacío (sin carga): 1.4A (Y) y 4.5A (D).
- Datos de placa del motor en ambas conexiones:
Y: 1.3kW, 380V, 1440RPM, 3A, 3 fases (Considerado como la condición normal).
D: 4kW, 380V, 1440RPM, 9.3A, 3 fases (Considerado como la condición anormal-falla).

Información útil para los cálculos:

1. Cálculo del flujo de potencia AC para el motor conectado en Y. Ver Figura 2

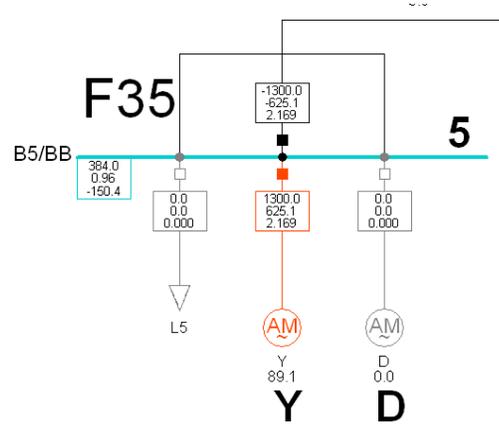


Figura 2: Resultado del flujo de potencia motor en Y – Barra 5

2. Motor con arranque en Y: Ver simulación RMS en Figura 14.

Esta condición se considera como **normal**, por lo tanto, las protecciones se deberán ajustar para esta conexión, es decir, que a pesar que las variables del encendido del motor están muy por encima de la operación normal, el esquema propuesto no debe activarse para esta conexión.

La idea general que persigue la configuración de un esquema de protección en cascada es el siguiente:

- Corriente de Pick-up de la protección de sobre carga principal: a 2.5 veces la corriente nominal del motor.
- Corriente de Pick-up de la protección de sobre corriente principal sub siguientes:

$$I_{pick-up} = I_{pick-up_motor_mayor} + \sum \text{Corriente nominal del resto de motores}$$

3. Motor con arranque en D: Ver simulación RMS en Figura 15.

Esta condición se considera como anormal-falla, al incrementarse la corriente y la caída de tensión no solo durante el arranque, sino que también durante la operación normal. Lo anterior, producto que en la conexión delta el motor pasa a ser de 4kW. Para esto, las protecciones, que se ajustaron para una condición normal en conexión estrella, deberán ser sensibles y despejar la falla, considerándola como una perturbación.

C.2. Barra 4

Para confirmar los ajustes, se entregan a continuación los datos de simulación del arranque del motor en la barra 4. Verifique que los ajustes permitirán un correcto funcionamiento del relé de protección arrancando también el motor en la barra 4. En anexos se pueden encontrar las gráficas obtenidas en DigSilent para la simulación de ambas configuraciones.

Tabla 2: Datos de arranque del motor medidos en la BARRA 4.

Tipo	Variable	Conexión Estrella (Y)		Conexión Triángulo (D)	
		B4	B3	B4	B3
Simulación	Corriente peak (A)	11.7	11.7	27	27
	Caída tensión (V)	344	360	257	304

Cálculo del flujo de potencia AC para el motor conectado en Y (Ver figura 8).

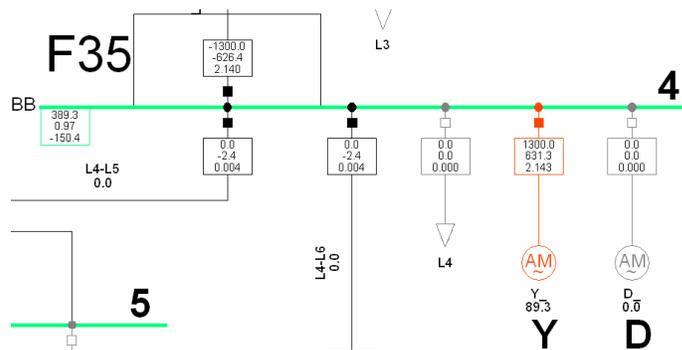


Figura 3: Resultado del flujo de potencia motor en Y - Barra 4



D. ENERVISTA

El dispositivo “F35 Multiple Feeder Protection System” es un relé tipo universal, programable, capaz de proteger múltiples puntos según las necesidades del usuario y la configuración de elementos de entrada/salida. Este modelo, tiene una capacidad máxima de protección de sobre corriente de tres puntos.

D.1. Descarga de software

Enervista es el software de carácter gratuito que permite realizar toda configuración del dispositivo “F35 Multiple Feeder Protection System”. Puede ser descargado en forma gratuita siguiendo los siguientes pasos:

1. Ingresar a www.gegridsolutions.com
2. Crear un usuario.
3. Buscar “Enervista”.
4. Seleccionar el software “Viewpoint Engineer”.

Todo archivo obtenido mediante un sistema de protección se almacena en tipo “COMTRADE”, por lo que todo análisis realizado en la experiencia es capaz de ser almacenado y luego abierto en un computador personal teniendo el software Enervista instalado.

D.2. Configuración

Para realizar las configuraciones propuestas en el presente trabajo dentro del relé universal F35, es necesario tener acceso al software Enervista el cual se encuentra activo en el computador SCADA del laboratorio de energía y accionamientos. Para ingresar las configuraciones, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir el programa y dirigirse a: LabEnergía → F35Red → Settings → Grouped Elements → Group 1
2. Aparecerán dentro de “Group 1” diversas funciones, el alumno debe ingresar a:
 - a. Phase current → Phase TOC: Para configurar la protección de sobre corriente.

Phase TOC // LabEnergia: F35Red: Settings: Grouped Elements: Group 1: Phase Current

Save Restore Default Reset VIEW ALL mode

PARAMETER	PHASE TOC1	PHASE TOC2	PHASE TOC3
Function	Disabled	Disabled	Disabled
Signal Source	Barra3 (SRC 1)	Barra4 (SRC 2)	Barra5 (SRC 3)
Input	RMS	RMS	RMS
Pickup	0.100 pu	0.100 pu	0.150 pu
Curve	IEC Curve A	IEC Curve A	IEC Curve A
TD Multiplier	0.41	0.21	0.10
Reset	Timed	Timed	Timed
Voltage Restraint	Disabled	Disabled	Disabled
Block A	OFF	OFF	OFF
Block B	OFF	OFF	OFF
Block C	OFF	OFF	OFF
Target	Self-reset	Self-reset	Self-reset
Events	Enabled	Enabled	Enabled

F35Red Settings: Grouped Elements: Group 1: Phase Current

Figura 4: Recuadro de configuración de sobre corriente.

- b. Voltage Elements → Phase UV: Para configurar la protección de baja tensión.

Phase UV // LabEnergia: F35Red: Settings: Grouped Elements: Group 1: Voltage Elements

Save Restore Default Reset VIEW ALL mode

PARAMETER	PHASE UV1	PHASE UV2	PHASE UV3
Function	Disabled	Disabled	Disabled
Signal Source	Barra3 (SRC 1)	Barra4 (SRC 2)	Barra5 (SRC 3)
Mode	Phase to Phase	Phase to Phase	Phase to Phase
Pickup	0.300 pu	0.300 pu	0.808 pu
Curve	Inverse Time	Inverse Time	Inverse Time
Delay	0.14 s	0.12 s	0.10 s
Minimum Voltage	0.300 pu	0.300 pu	0.300 pu
Block	OFF	OFF	OFF
Target	Self-reset	Self-reset	Self-reset
Events	Enabled	Enabled	Enabled

F35Red Settings: Grouped Elements: Group 1: Voltage Elements Screen ID: 217

Figura 5: Recuadro de configuración de baja tensión.

D.3. Visualización de variables

El software es capaz de entregar el valor de las variables del sistema en tiempo real, y son dichos valores los que producen el accionamiento de la protección configurada. Para acceder a los valores y visualizarlos mientras se esté variando la carga se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir el programa y ubicar pestaña donde se ingresarán dichos comandos. Para ello dirigirse a: LabEnergía → F35Red → Actual Values → Metering → Source
2. Para acceder a las mediciones de corriente entrar a “Phase Current”

Phase Current // LabEnergia: F35Red: Actual Values: Metering: Source

Save Restore Default Reset VIEW ALL mode

PARAMETER	SOURCE 1	SOURCE 2	SOURCE 3
Name	Barra3	Barra4	Barra5
PHASORS	View	View	View
RMS Ia	0.000 A	0.000 A	0.000 A
RMS Ib	0.000 A	0.000 A	0.000 A
RMS Ic	0.000 A	0.000 A	0.000 A
RMS In	0.000 A	0.000 A	0.000 A
Phasor Ia	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Phasor Ib	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Phasor Ic	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Phasor In	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Zero Seq I0	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Positive Seq I1	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg
Negative Seq I2	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg	0.000 A 0.0 deg

Figura 6: Ventana de mediciones en tiempo real de corriente por fase.

- Para acceder a las mediciones de tensión entrar a “Phase Voltage”.

Phase Voltage // LabEnergia: F35Red: Actual Values: Metering: Source

Save Restore Default Reset VIEW ALL mode

PARAMETER	SOURCE 1	SOURCE 2	SOURCE 3
Name	Barra3	Barra4	Barra5
PHASORS	View	View	View
RMS Vag	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vbg	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vcg	0.000 V	0.000 V	0.000 V
Phasor Vag	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vbg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vcg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
RMS Vab	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vbc	0.000 V	0.000 V	0.000 V
RMS Vca	0.000 V	0.000 V	0.000 V
Phasor Vab	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vbc	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Phasor Vca	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Zero Seq V0	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Positive Seq V1	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg
Negative Seq V2	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg	0.000 V 0.0 deg

Figura 7: Ventana de mediciones de tensión por fase y fase neutro en tiempo real.

Para visualizar las variables durante la falla y poder extraer los datos en archivos COMTRADE, es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Abrir el programa y dirigirse a: LabEnergía → F35Red → Actual Values → Records

2. Dirigirse a “Fault Reports” si se desean los datos de voltaje y corriente pre y durante la falla.
3. Dirigirse a “Oscilography” para obtener los datos del oscilograma que muestran el comportamiento de las variables durante la contingencia.
 - a. Hay opciones para abrir diversos archivos según el número de aparición. Usted debe abrir el último.
 - b. Aparecerá el comportamiento en el tiempo de las corrientes y las tensiones antes y después del accionamiento de la protección.

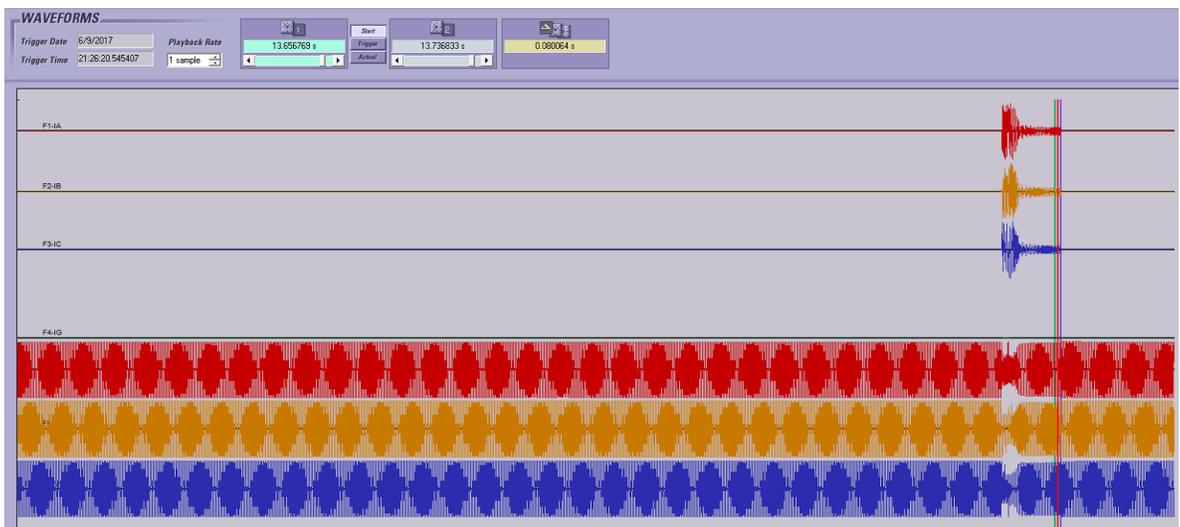


Figura 8: Oscilografía de tensión y corriente otorgado por Enervista.

- c. Para guardar estos archivos, en la esquina superior izquierda aparecerá la opción para almacenar estos datos como archivos COMTRADE y poder abrirlos en cualquier computador personal.

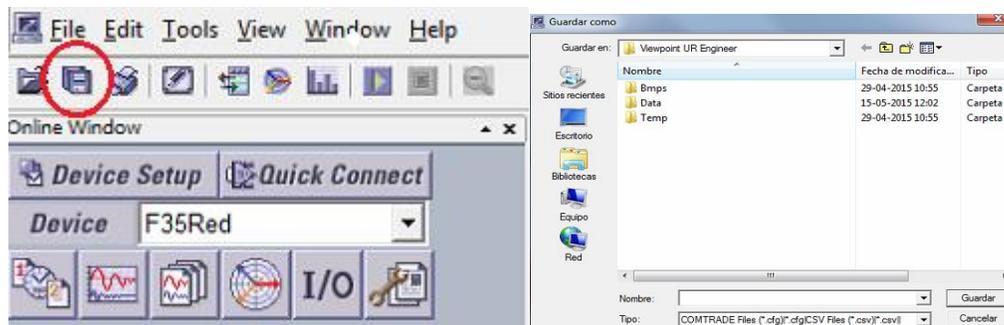


Figura 9: Lugar para activación de guardado de archivos COMTRADE.

D.4. Accionamiento en la micro-red

Los relés de protección actuarán sobre una bobina de apertura remota instalada en el interior de los interruptores trifásicos, los cuales son de la marca GE, modelo FDE, 50A. Los interruptores incluyen protección termo-magnética, sin embargo, para evitar que actúen en caso de falla, el ajuste se define al máximo posible.

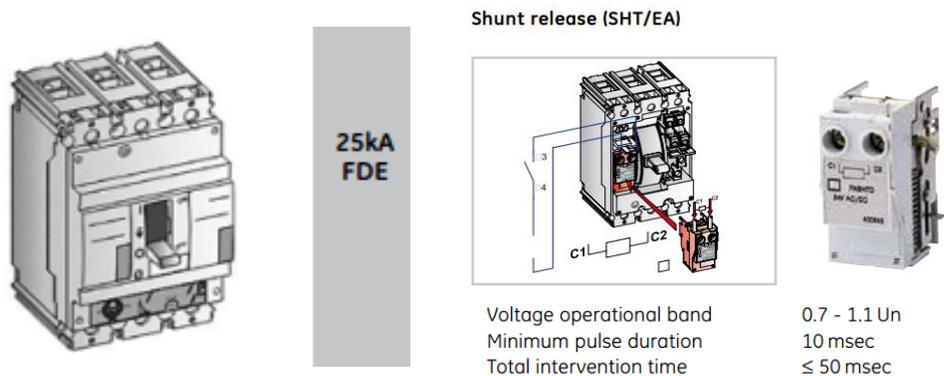


Figura 10: Interruptor utilizado mostrando la bobina de apertura a 220VCA-250VCC

En este laboratorio sólo se utilizará la secuencia de coordinación de los puntos de protección formados por las barras 3, 4 y 5, las cuales se protegen por medio del relé F35.

La Figura 11 presenta la plantilla de trabajo utilizada en este laboratorio, mostrando las tres barras protegidas por el relé F35. Este es un relé tipo universal, programable, capaz de proteger múltiples puntos según las necesidades del usuario y la configuración de elementos de entrada/salida. Este modelo, tiene una capacidad máxima de protección de sobre corriente de tres puntos. La Figura 12 presenta el relé F35, mostrando su parte frontal (A), así como el software Enervista (B). Además, en la Figura 12 (C) se puede ver un diagrama de conexionado particular, mostrando cinco puntos de medición de corriente y uno de tensión al lado derecho del relé. Al lado izquierdo están las señales de entrada y salida, así como los puertos de comunicación.

E. ACTIVIDADES

- ⚠ ***Siga las instrucciones de los asistentes de la micro-red.***
- ⚠ ***Revise y siga todas las medidas de seguridad.***
- ⚠ ***Cada vez que realice un cambio de conexión del motor, accione el pulsador de emergencia.***



E.1. Reconocimiento de la Micro - Red

Reconozca la topología de la micro-red, analizando el transformador de aislamiento, los puntos de conexión, los equipos de medida, la interfaz computarizada de medición, los modelos de líneas de distribución, las cargas para el sistema y otros.

Configure en la micro-red las líneas del sistema con el modelo de distribución.

NOTA: 1 p.u. de corriente corresponde a 20A y 1 p.u. de tensión corresponde a 400VCA.

E.2. Función de protección de sobre corriente (ANSI 51)

1. Aplicación de la función de tiempo definido (instantánea):

- En la barra 5 conecte la carga variable.
- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de sobre corriente de tiempo definido con un pick-up de 2A (0.1 [p.u.]) y un marcador de tiempo de 0 [s].
- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una corriente de 1.98-1.99 [A] (verifique la fase mayor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga por encima de 2 [A] y verifique el disparo.
- Revise el Reporte de Falla en el software Enervista (fault report) y anote la corriente pre-falla y post-falla.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada (que corresponde efectivamente a la sobre corriente instantánea).

2. Aplicación de la función de tiempo inversa (retardada):

- En la barra 5 conecte la carga variable.



- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de sobre corriente de tiempo inverso con un pick-up de 2 [A] (0.1 [p.u.]) y un marcador de tiempo de 1 [s].
- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una corriente mayor de 1.98-1.99 [A] (verifique la fase mayor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga por encima de 2.3 [A] (aproximadamente) y verifique el disparo.
- Revise el Oscilografía en el software Enervista para estimar el tiempo de disparo.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada.

E.3. Ajuste de la función de protección de baja tensión (ANSI 27)

1. Aplicación de la función de tiempo definido (instantánea)

- En la barra 5 conecte la carga variable.
- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de baja tensión de tiempo definido con un pick-up de 0.98 [p.u.] (392 [VCA]) y un marcador de tiempo de 0 [s].
- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una tensión de barra de 402-404 [VCA] (verifique en la fase menor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga para provocar una caída bajo los 400 [VCA] y verifique el disparo.
- Revise el Reporte de Falla en el software Enervista (fault report) y anote la tensión pre-falla y post-falla.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada (que corresponde efectivamente a la sobre corriente instantánea).

2. Aplicación de la función de tiempo inversa (retardada)

- En la barra 5 conecte la carga variable.
- Asegúrese que el ajuste de la carga está en la posición más baja (manillas de la carga trifásica de carga al mínimo).
- Ajuste el relé de protección para protección de baja tensión de tiempo inverso con un pick-up de 0.98 [p.u.] (392 [VCA]) y un marcador de tiempo de 1 [s].

Cualquier duda, consulta o sugerencia favor escribir a pablo.gonzalez.i@ing.uchile.cl



- Encienda la carga y aumente poco a poco hasta llegar a una tensión de barra de 402-404 [VCA] (verifique la fase menor).
- Espere unos segundos y verifique que no hay disparo del interruptor.
- Aumente la carga para provocar una caída bajo los 400 [VCA] y verifique el disparo.
- Revise el Oscilografía en el software Enervista para estimar el tiempo de disparo.
- Revise en el software Enervista la función de protección activada.

E.4. Ajuste de la función de protección combinada por sobre corriente (51) – baja tensión (27)

E.4.1. Barra 5

1. Ajuste las protecciones de sobre corriente según los parámetros calculados previamente, asumiendo que el arranque del motor en triángulo es una falla de corto circuito. Encuentre los ajustes de las protecciones de manera que el motor pueda arrancar en estrella, pero que al hacerse el arranque delta sea sentido como una condición anormal.
 - Asegúrese que las protecciones de baja tensión están desactivadas.
 - Conecte el motor en la barra 5.
 - Haga la conexión estrella (Ver Figura 13).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver Figura 13).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
2. Ajuste las protecciones de sobre corriente según las recomendaciones de la sección C para la corriente de pick-up.
 - Asegúrese que las protecciones de baja tensión están desactivadas.
 - Haga la conexión estrella (Ver Figura 13).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver Figura 13).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.



- En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
3. Active las protecciones de baja tensión y ajústelas de manera que determinen el arranque en estrella como normal, y el arranque en triángulo como anormal.
- Haga la conexión estrella (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver figura 12).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente que le registre el oscilograma.

E.4.2. Barra 4

1. Con los ajustes de la sección anterior (punto 3.), conecte el motor en la barra 5 y verifique el desempeño de las protecciones para las barras 4 y 3.
- Asegúrese que la protección de baja tensión de la barra 5 está desactivada.
 - Asegúrese que las protecciones de sobre corriente y baja tensión en las barras 4 y 3 están activadas.
 - Haga la conexión estrella (Ver Figura 13).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo, solicite al asistente registrar el oscilograma.
 - Haga ahora la conexión triángulo (Ver Figura 13).
 - Encienda el motor, y verifique si hay disparo de algún interruptor.
 - En caso de disparo para la barra 4, solicite al asistente registrar el oscilograma.
 - Repita el procedimiento para el caso en que solo la protección de la barra 3 este activada.
 - Repita el procedimiento para el caso en que todas las barras tengan su protección activada.

F. ADVERTENCIAS & COMENTARIOS

- ⚠ *Tener precaución cuando se use el motor eléctrico.*
- ⚠ *Cada vez que realice un restablecimiento de un interruptor asegúrese que la micro-red se encuentra desenergizada.*
- ⚠ *Todas las conexiones de carga y entre barras deben ser aprobadas por el asistente del laboratorio.*
- ⚠ *Las mediciones de tensión, corriente, potencia activa y reactiva están integradas en el sistema instalado, no se requiere el uso de instrumentos tipo multímetro.*
- ⚠ *Tome en cuenta las siguientes conexiones en el motor eléctrico*

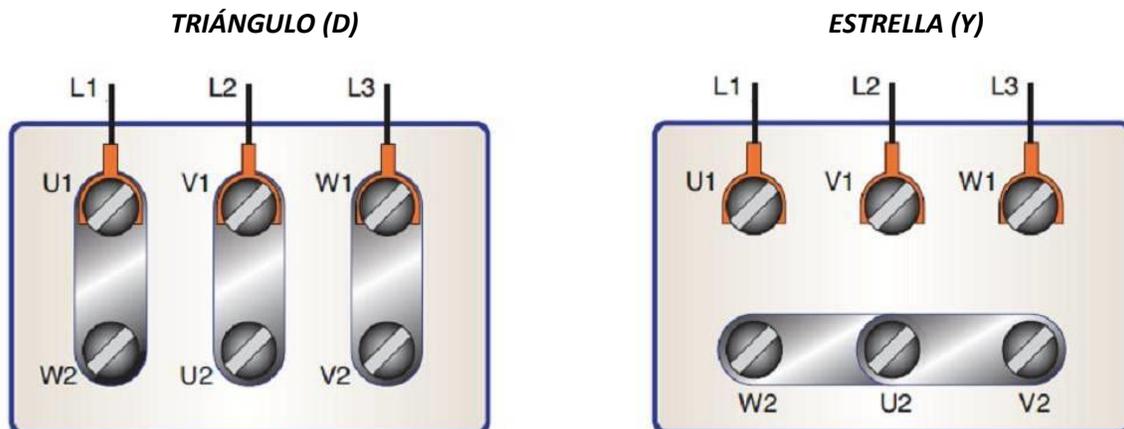


Figura 13: Conexiones del motor eléctrico trifásico.

G. ANEXOS

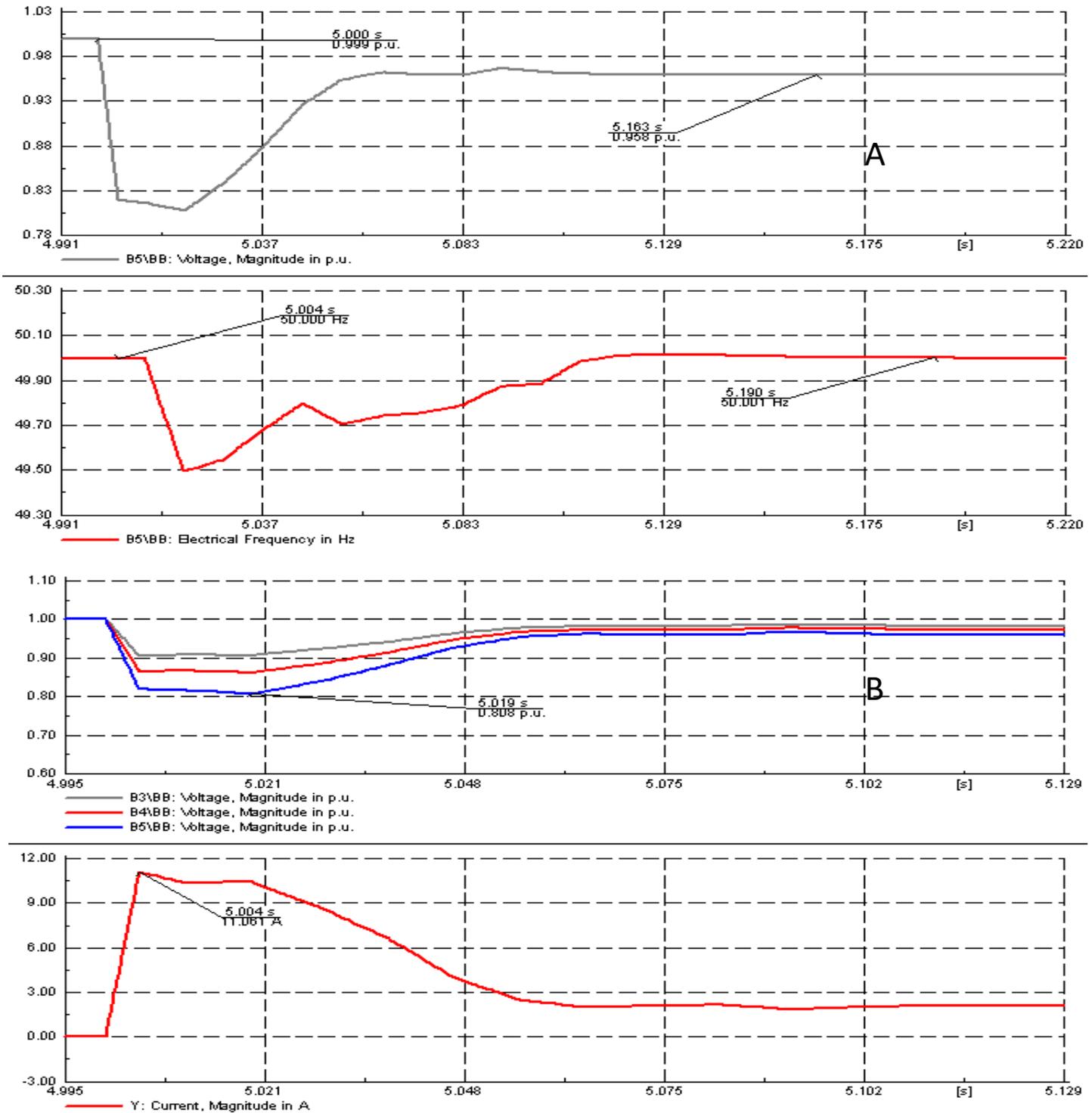


Figura 14: Simulación arranque en Y: (A) Tensión y Frecuencia en B5 (B) Tensión en B5-B4-B3 y Corriente del Motor.

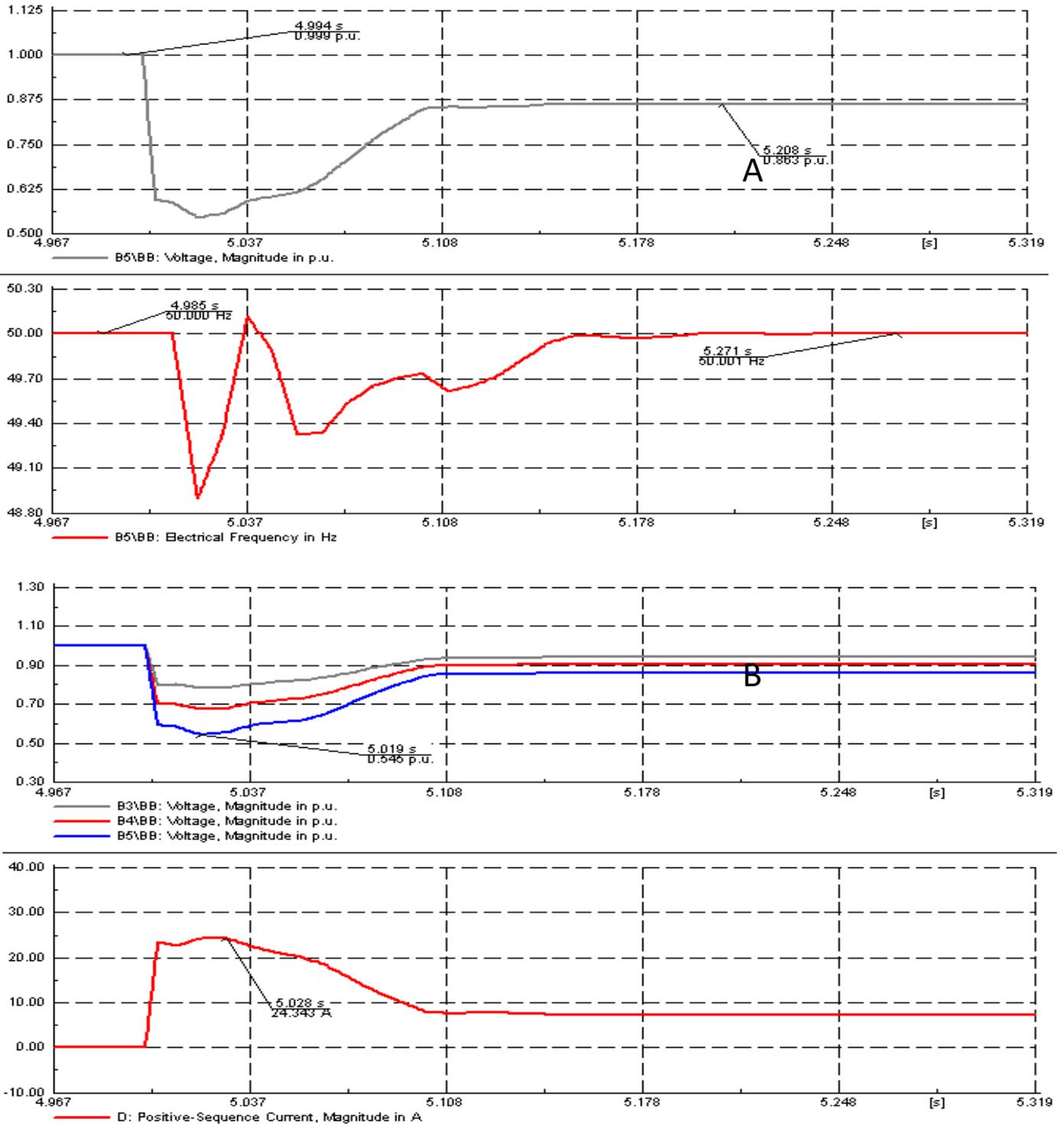


Figura 15: Simulación arranque en D: (A) Tensión y Frecuencia en B5 (B) Tensión en B5-B4-B3 y Corriente del Motor.