

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
oscarzunemata@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.

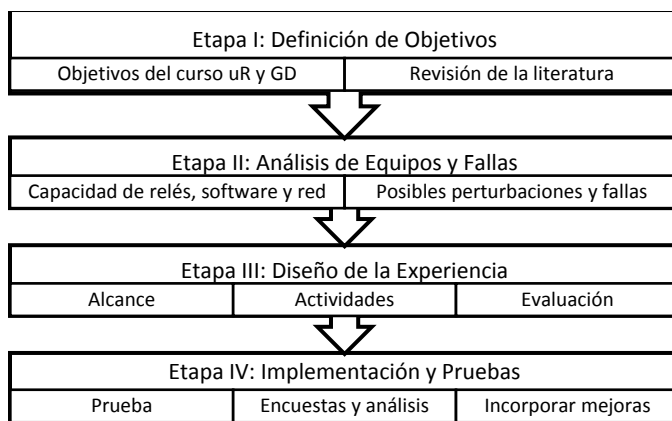


Fig. 1 Metodología para el diseño del laboratorio de protecciones en SEP

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.

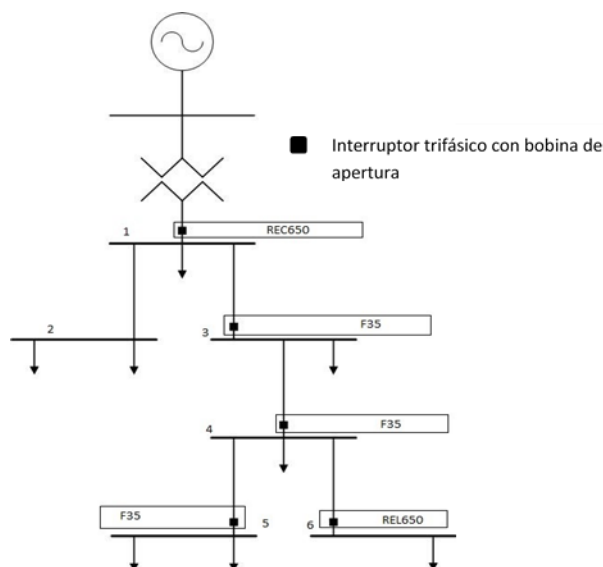


Fig. 2 Unilineal de la red utilizada en el laboratorio de protecciones

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.

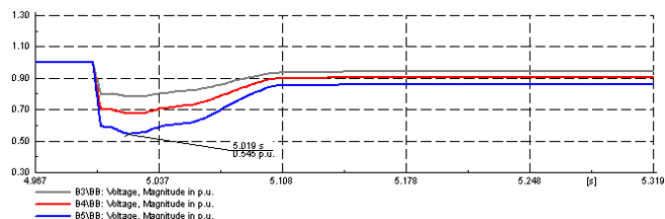


Fig. 4 Tensiones en barras durante partida en triángulo según simulación RMS

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

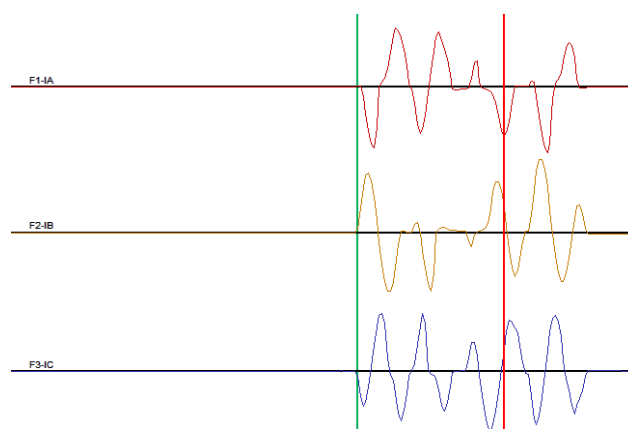


Fig. 5 Corrientes de arranque por fase del motor en conexión triángulo

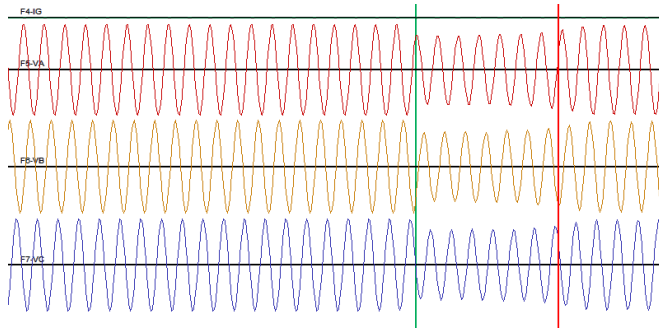


Fig. 6 Tensiones durante el arranque del motor en conexión triángulo

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.