

# Undergraduate Teaching of Electric Network Protection Using Simulations and Lab Experiments

C. A. Morales, C. Hernandez, *Member, IEEE*, and M.A. Arjona, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**— The protection of the electric power system (EPS) components such as synchronous generators, transformers, transmission lines, and substations is important because it allows having continuity in the electricity service when disturbances are present. It also avoids a possible permanent damage to the elements of the EPS. The relays monitor variables as voltages, currents, harmonics, frequency, active and reactive power. The function of the relay is to detect an abnormal operating condition, and with the aid of breakers a faulted equipment can be isolated by disconnecting only a small portion of the EPS, so that a small number of consumers are affected. The relay setting adjustment is important because it must operate in a safe, reliable and coordinated way. The above can be achieved by teaching to students the philosophy, theory, adjustments, and coordination of relays in an electrical network, and by using computer simulations a more effective teaching and learning can be achieved. However, to have a more complete contribution in learning the relay coordination philosophy, the usage of a laboratory is highly recommended. In this paper, a hybrid approach for teaching electric network protection is presented. It is aimed at undergraduate students of electric engineering and it is based on the use of computer simulation of mathematical models and laboratory experiments. To demonstrate the proposed teaching approach, computer simulations and lab experiments of an overcurrent inverse time relay were carried out in radial and parallel electrical networks where different case studies were successfully tested.

**Index Terms**—Network, overcurrent protection, power system protection, relay.

## I. INTRODUCCIÓN

Los objetivos de la protección y coordinación de los relevadores de los sistemas eléctricos de potencia se deben cumplir, de lo contrario se pondría en riesgo al personal y al equipo del sistema eléctrico [1]. Por eso la importancia de la educación en temas de protección de sistemas eléctricos de potencia. Para los ingenieros eléctricos es importante el aprendizaje de los principios de operación y los alcances de los diferentes sistemas de protección con relés.

En la literatura se han reportado laboratorios para la enseñanza en el área de las protecciones eléctricas [2]-[19]. Phadke menciona que es esencial tener un laboratorio para la

simulación de sistemas eléctricos de potencia en los programas de educación e investigación [2]. Chen *et al.* describen un laboratorio de simulación de sistemas de potencia de la Universidad de Texas en Arlington [3]. Por otro lado, Stagliano *et al.* reportan dos cursos prácticos de protección de sistemas de potencia a nivel licenciatura [4]. Lai describe un software desarrollado para el diseño de la protección de sistemas eléctricos de potencia que se utiliza para enseñar la coordinación de las protecciones en la City University de Londres [5]. Sidhu y M. S. Sachdev describen un laboratorio utilizado para la enseñanza e investigación en el área de protecciones eléctricas en la Universidad de Saskatchewan [6], [8]. Lee *et al.* describen la configuración de un laboratorio y el diseño de la estación de pruebas de los relevadores, además muestran algunos ejemplos sobre el uso de estas instalaciones en los cursos de sistemas de protección de los programas de licenciatura y maestría en la universidad de Texas en Arlington [7], [9]. Bhuvanesh y Sukumar describen un novedoso laboratorio de protecciones de sistemas de potencia en Birla Vishvakarma Machavidyalaya [10]. Pires *et al.* reportan un laboratorio en el cual se ha desarrollado un sistema de pruebas para evaluar las características de operación del relevador [11]. Mehta and Oza explican la protección de un generador en un ambiente de laboratorio [12]. Brahma *et al.* reconocen la importancia de la educación y la formación de ingenieros de protección, además sugieren el contenido necesario del curso para cumplir con este aprendizaje [13]. Ren and Kezunovic presentan un conjunto de nuevas herramientas de modelado, simulación y prueba para comprender mejor el concepto de diseño y aplicaciones relacionadas, para soluciones de niveles de protección y automatización de subestaciones para redes inteligentes [14]. Perez-Martinez *et al.* explican un laboratorio de protecciones eléctricas que emula la estructura y las condiciones de una red de distribución [15]. Mehta *et al.* reportan un laboratorio de simulación de un relé de distancia [16]. Gaouda *et al.* presentan la primera etapa del desarrollo de un laboratorio para la enseñanza del diseño de redes inteligentes y su implementación en los niveles de licenciatura y posgrado [17]. Shahnia *et al.* explican sobre las actividades de laboratorio desarrolladas para el curso de protección de sistemas de potencia, así como las acciones para mejorar la experiencia en el aprendizaje de los estudiantes de la Universidad de Curtin, Australia [18], [19]. Mientras que Carullo *et al.* presentan un experimento de análisis de falla, el cual permite a los estudiantes examinar el efecto de condiciones de falla en un sistema de potencia de una manera real [20].

Manuscript received April 13, 2020.

This work was supported in part by the Tecnológico Nacional de México (TNM), Instituto Tecnológico de La Laguna, PRODEP and CONACYT.

C. A. Morales is with TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah. 27000 México (e-mail: camb70@hotmail.com).

C. Hernandez is with TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah. 27000 México (e-mail: con.hernandez@ieee.org).

M. A. Arjona is with TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah. 27000 México (e-mail: marjona@ieee.org).

La formación de ingenieros en el área de protección del sistema eléctrico de potencia (SEP) por medio de relevadores es de gran importancia para las empresas del sector eléctrico e industrial. Es interesante observar que son pocas las universidades que ofrecen este tipo de educación en los niveles de ingeniería y posgrado, y que, además, cuenten con laboratorios equipados con diferentes tipos de relevadores [2]. En el Instituto Tecnológico de La Laguna (ITL), se cuenta con un laboratorio de protecciones de sistemas eléctricos de potencia, en el cual se pueden realizar diferentes prácticas con relevadores. El laboratorio se utiliza por los estudiantes de ingeniería eléctrica para complementar el aprendizaje teórico con aspectos prácticos en la configuración y coordinación de los relevadores de protección.

En este artículo se presenta un esquema híbrido de enseñanza-aprendizaje de protecciones de redes eléctricas para estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica. El esquema es híbrido, en el sentido de que considera simulaciones por computadora de los modelos de protección y de redes eléctricas así como su realización experimental en el laboratorio de protecciones. El laboratorio permite enseñar técnicas de protección, llevar a cabo ajustes de los relevadores y está compuesto por una serie de módulos, los cuales emulan los elementos de un SEP. Estos módulos permiten configurar una red eléctrica y su sistema de protección. Además, con este equipo se puede comprobar el tiempo de disparo definido en el ajuste del relevador. Adicionalmente, la respuesta del relevador se puede comparar con los resultados obtenidos en un paquete de simulación de protecciones eléctricas donde se pueden usar los mismos ajustes de los relés y parámetros de los elementos del SEP de los módulos. Las prácticas que se han diseñado para el laboratorio, son: a) fundamentos de esquemas de protección radial, b) fundamentos de la protección de dos alimentadores paralelos, c) transformadores de instrumento y d) esquemas de protección de alimentadores utilizando relevadores de sobrecorriente y de fallas a tierra. La contribución de este artículo en el área de protecciones eléctricas de sistemas eléctricos radica en demostrar que el proceso de enseñanza-aprendizaje de la coordinación de protecciones eléctricas es más efectivo si se emplean simulaciones y experimentos de laboratorio.

## II. ASIGNATURA, SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS

El contenido de la asignatura de protecciones eléctricas se centra principalmente en la protección de las líneas de distribución y de transmisión. Los temas que se incluyen en el curso son: filosofía de las protecciones, transformadores de instrumento, protecciones de sobrecorriente, protección direccional, ajustes para la coordinación de las protecciones de sobrecorriente y direccional, protección y ajuste de zonas del relevador de distancia, protección diferencial y su ajuste, protección a transformadores y generadores, protección por hilo piloto. La estrategia de enseñanza-aprendizaje propuesta es formar grupos de cinco alumnos como máximo. Los alumnos deben entregar un informe técnico final donde se revisan los cálculos para la selección adecuada de los transformadores de instrumento y los ajustes de los relevadores de sobrecorriente

utilizando flujos de cargas y cálculos de cortocircuito. Los alumnos deben consultar el manual del relevador para conocer sus características técnicas así como las curvas tiempo/corriente del relevador. El curso también se complementa con el estudio de artículos científicos y libros de protecciones. Los estudiantes reciben una exposición acerca del manejo del laboratorio de protecciones, para evitar accidentes y daño al equipo. Los alumnos se evalúan tanto en el uso del software de simulación como en la experimentación, revisando los tiempos de coordinación de los relevadores. Las prácticas se realizan con supervisión del profesor.

El laboratorio está enfocado al tema de la transmisión, distribución y protección de un SEP, así como a las pruebas que se le pueden realizar a los transformadores de instrumentos. En la Fig. 1 se observa el laboratorio de protecciones, el cual está compuesto por una serie de módulos que representan los diversos subsistemas que componen un SEP. Las tres áreas principales de estudio que se cubren son: a) transmisión y distribución de la energía, b) técnicas de protección y c) pruebas a transformadores de instrumento. El laboratorio se instaló en el año 2003, los instrumentos de medición de voltaje y corriente son analógicos y miden valores RMS. El laboratorio se utiliza para simulaciones en estado estacionario. Las fallas de cortocircuito que se pueden experimentar en los módulos de las líneas de transmisión son L-T, L-L, L-L-T, L-L-L. Los relevadores de protección que se utilizan son industriales de la marca ABB.

Para el estudio de la transmisión y distribución de energía eléctrica, el laboratorio cuenta con módulos trifásicos de dos líneas aéreas de transmisión de energía de 360 km de longitud, con una tensión de 380 kV y una corriente de 1000 A. También cuenta con un modelo de transformador con tres devanados y un sistema de buses, todos estos modelos tienen un factor de escala de 1:1000.

Con respecto al área de protecciones, en el laboratorio se puede analizar el comportamiento de diferentes tipos de relevadores: bajo/sobre voltaje, sobrecorriente de tiempo definido, sobrecorriente de tiempo inverso, fallas a tierra, y direccional de sobrecorriente. Tiene un enfoque especial al problema de la protección de la línea de transmisión de alta tensión, con análisis de los criterios de toma de decisiones sobre el sistema de protección más adecuado a utilizar. Los experimentos sobre el monitoreo del sobrevoltaje y bajovoltaje,



Fig. 1. Laboratorio de protecciones de sistemas eléctricos de potencia.

protección de cortocircuito y monitoreo de la falla accidental a tierra completan su análisis.

El software para el estudio de los sistemas eléctricos de potencia que se emplea en la enseñanza es el NEPLAN [21]. En la elección de esta herramienta de simulación se realizó un estudio muy detallado de las características, ventajas y desventajas de las diferentes marcas disponibles en el mercado como lo son el ETAP, DIGSILENT, PSS y NEPLAN. El estudio se basó en el costo del software, el tipo de licencia, los módulos incluidos, número de nodos y el soporte técnico. El software de simulación NEPLAN es una herramienta para analizar, planear, optimizar y simular redes eléctricas. Permite al usuario desarrollar casos de estudio muy eficientemente. El software tiene un concepto modular y cubre todos los aspectos eléctricos en redes de transmisión, distribución, generación e industriales. Se pueden simular sistemas de energía renovable y redes inteligentes, debido a que cuenta con los modelos necesarios. Además de los cálculos de estado estacionario, calidad de energía, aspectos de optimización y coordinación de protecciones, el simulador NEPLAN permite modelar plantas solares y eólicas con sus controles en simulaciones dinámicas (RMS/EMT) y también se puede integrar a Matlab/Simulink [21]. Cabe mencionar que no todos los relevadores que se encuentran en el laboratorio se pueden simular en el software NEPLAN, como es el caso de los relevadores direccionales de sobrecorriente, los de bajo/sobre voltaje y los de falla a tierra.

### III. MODELACIÓN DE LA RED Y SUS PROTECCIONES ELÉCTRICAS

En la Fig. 2 se muestran las redes eléctricas configuradas con los módulos del laboratorio de protecciones, la información de los elementos utilizados se muestra en la Tabla I. En la Fig. 2a se proporciona la red radial formada por 4 nodos, donde se instalan dos relés de sobrecorriente de tiempo inverso en los buses 1 y 2. Este sistema de prueba también se modela en el software NEPLAN, como se muestra en la Fig. 3. Es importante mencionar que son los alumnos los que desarrollarán este modelo del sistema de prueba en el software de simulación comercial NEPLAN, por lo que también estarán desarrollando habilidades en el manejo del software de simulación.

TABLA I  
DATOS DEL SISTEMA DE PRUEBA DE CUATRO NODOS

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Subestación                   | 800 MVA, 380 kV  |
| Transformador                 | 800 MVA, 380 kV $\Delta/Y$ 380 kV, $Z=17.35\%$                         |
| Línea 1-2                     | $13 + j109.3 \Omega$ , longitud 360 km                                 |
| Línea 2-3                     | $13 + j109.3 \Omega$ , longitud 360 km                                 |
| Carga                         | Resistiva trifásica, 400 W cada fase, variable                         |
| Relevadores de Sobrecorriente | Relevador R1 modelo ABB SPAJ 131C<br>Relevador R2 modelo ABB SPAJ 131C |

Para llevar a cabo una coordinación del relevador de sobrecorriente, el estudiante necesita realizar un estudio de cortocircuito del sistema eléctrico. Adicionalmente debe conocer el tipo de curva de tiempo inverso del relevador. El relevador ABB SPAJ131C dispone de 4 juegos de curvas tiempo/corriente con característica de tiempo inverso mínimo definido y puede expresarse como indica la Ec. 1 [22].

$$t = k\beta / \left( \left( \frac{I}{I>} \right)^\alpha - 1 \right) \quad (1)$$

donde  $t$  indica tiempo en s,  $k$  es el ajuste del indicador de tiempo,  $I$  representa la corriente medida e  $I>$  es la corriente de arranque del relevador. Las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  se seleccionan con base en el tipo de curva característica del relevador y sus valores se indican en la Tabla II.

TABLA II  
VALORES DE LAS CONSTANTES  $\alpha$  Y  $\beta$   
PARA LAS DIFERENTES CURVAS  
DEL RELEVADOR ABB SPAJ 131C

| Curva Característica tiempo/corriente | $\alpha$ | $\beta$ |
|---------------------------------------|----------|---------|
| Normal Inversa                        | 0.02     | 0.14    |
| Muy Inversa                           | 1.0      | 13.5    |
| Extremadamente Inversa                | 2.0      | 80.0    |
| Inversa de larga duración             | 1.0      | 120.0   |

En la siguiente sección se presentan varios casos de estudio para este circuito que se incluyen en la materia de protecciones eléctricas en la carrera de ingeniería eléctrica. En los primeros tres casos se ajustaron los relés con diferentes características: extremadamente inversa, muy inversa y normal inversa. Asimismo, en cada uno de ellos se probó para diferentes valores de corriente de sobrecarga. En el caso restante se probaron los relés con corrientes de corto circuito trifásico en el bus 3. Para todos los casos, los ajustes de los relevadores para su disparo y coordinación se calcularon usando el procedimiento mencionado en [23]. Finalmente, se comparan los tiempos de disparo de los relevadores obtenidos del modelo simulado con los obtenidos experimentalmente usando los módulos físicamente. Hay que tomar en cuenta que los módulos están escalados de 1:1000 tanto para la corriente como para la tensión. Otro esquema de protección que se puede enseñar usando los módulos, es un sistema de tres nodos con líneas paralelas, como el que se muestra en la Fig. 2b y su modelo de simulación se muestra en la Fig. 4. El esquema consiste en emplear dos relevadores de sobrecorriente instalados en cada una de las líneas de transmisión conectadas a los buses 2 y 3 (Fig. 4)

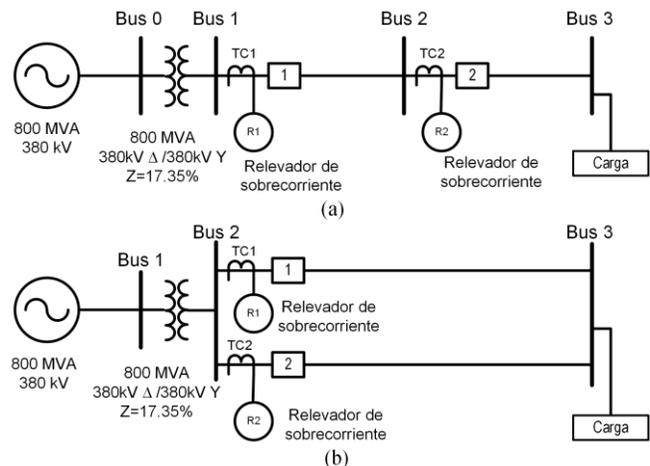


Fig. 2. Red eléctrica utilizada: a) 4 nodos y b) 3 nodos.

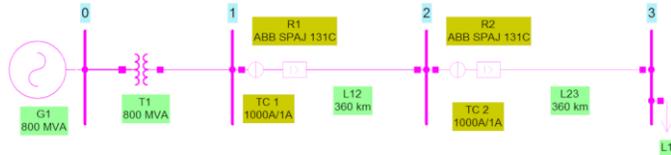


Fig. 3. Sistema de 4 nodos simulado en NEPLAN.

La información de los elementos del sistema de potencia empleado es la misma que se muestra en la Tabla II. Para este circuito se presenta un caso de estudio para una falla de cortocircuito trifásico en la línea L23 cerca del nodo 2, al lado derecho del TC1. Los sistemas de protección deben cumplir con la filosofía de una rápida detección y aislamiento de la falla para preservar la estabilidad del SEP. La finalidad de la protección es desconectar la sección más pequeña posible del SEP y de esta manera afectar lo menos posible a los usuarios. Por lo tanto se debe diseñar un sistema de protección que cumpla con los criterios de confiabilidad, seguridad, sensibilidad y selectividad [23]. Esto se logra con un adecuado cálculo de los ajustes de los relevadores.

#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIONES Y DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE PROTECCIONES.

Con la finalidad de ilustrar la metodología de enseñanza que se propone en este artículo, se presenta el comportamiento de los relevadores con diferentes características de ajuste en varios casos de estudio para la red eléctrica radial.

##### A. Caso I. Característica de Tiempo Extremadamente Inversa

El sistema que se configuró en el laboratorio de protecciones eléctricas corresponde al SEP de 4 nodos (Fig. 2a). El relevador R1 se configuró para que actuara como respaldo del relevador R2, y ambos se ajustaron con la misma característica extremadamente inversa. Se usaron los siguientes ajustes para el primario (I) y secundario (I'):

*Ajuste de toma de corriente R2:  $I = 500 \text{ A}$ ,  $I' = 0.5 \text{ A}$*

*Ajuste de toma de corriente R1:  $I = 500 \text{ A}$ ,  $I' = 0.5 \text{ A}$*

*Ajuste del indicador de tiempo R2: 0.05*

*Ajuste del indicador de tiempo R1: 0.06*

El ajuste del relevador R1 debe responder más lento que el del relevador R2 para poder lograr la coordinación, por lo que se escoge un ajuste del indicador de tiempo con más retardo. La Fig. 5 muestra las curvas de R1 y R2 con la característica extremadamente inversa.

En la Fig. 5 se muestra una línea vertical de color naranja, la cual refleja el valor de la corriente de carga del sistema de potencia en múltiplos de la corriente de arranque de los relevadores. El tiempo de operación del relé se determina con la intersección de la línea color naranja con las curvas de los relevadores con la característica extremadamente inversa. En la Tabla III, se dan las corrientes de línea para diferentes valores

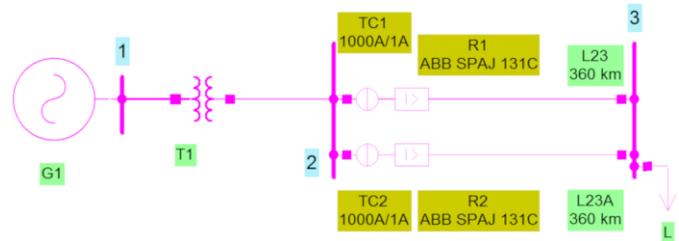


Fig. 4. Sistema de 3 nodos con líneas paralelas simulado en NEPLAN

de carga, así como el tiempo de disparo de los relevadores R1 y R2 con la característica extremadamente inversa tanto del software NEPLAN como de los módulos del laboratorio de protecciones. Es importante mencionar que los relevadores están operando por sobrecarga, por esta razón los tiempos de operación son muy largos, ya que los ajustes para la coordinación se logran con base a las corrientes de corto circuito. Las magnitudes de las corrientes de cortocircuito son de un valor mayor que las de sobrecarga y esto hace que los relevadores actúen más rápido, ya que se trata de evitar que los elementos del SEP se dañen. Las posibles causas de las diferencias entre los valores de las simulaciones y los experimentos son: a) incertidumbre en los parámetros del sistema simulado, b) precisión del cronómetro usado para medir los tiempos de operación de los relevadores, y c) cuando la relación de la corriente medida a la corriente de arranque es pequeña, los tiempos de las curvas corresponden a la parte vertical donde la pendiente es alta y se pueden tener tiempos elevados.

##### B. Caso II. Característica de Tiempo muy Inversa

Este caso de estudio está representado por el sistema de 4 nodos que se muestra en la Fig. 2a, donde los relevadores R1 y R2 se configuraron con la característica muy inversa, R1 es el respaldo de R2. Los ajustes de los relevadores fueron los siguientes:

*Ajuste de toma de corriente R2:  $I = 500 \text{ A}$ ,  $I' = 0.5 \text{ A}$*

*Ajuste de toma de corriente R1:  $I = 500 \text{ A}$ ,  $I' = 0.5 \text{ A}$*

*Ajuste del indicador de tiempo R2: 0.05*

*Ajuste del indicador de tiempo R1: 0.07*

El indicador de tiempo del relé R1 se ajustó con mayor retardo, para que el alumno se dé cuenta cómo influye en los

TABLA III  
TIEMPOS DE OPERACIÓN PARA LOS RELÉS R1 Y R2 DEL SISTEMA RADIAL CON LA CARACTERÍSTICA EXTREMADAMENTE INVERSA PARA DIFERENTES VALORES DE CORRIENTE DE CARGA. VALORES OBTENIDOS POR SIMULACIONES Y EXPERIMENTOS.

| Carga<br>$\Omega/\text{Fa}$<br>se | Corriente (kA) |              | Tiempo de operación del relevador R2 (s) |              | Tiempo de operación del relevador R1 (s) |              |
|-----------------------------------|----------------|--------------|--|--------------|--|--------------|
|                                   | Simulación     | Experimental | Simulación                               | Experimental | Simulación                               | Experimental |
| 213                               | 0.63           | 0.61         | 7.91                                     | 17.66        | 9.48                                     | No opera     |
| 150                               | 0.71           | 0.70         | 3.95                                     | 5.02         | 4.74                                     | 6.33         |
| 123                               | 0.77           | 0.74         | 3.20                                     | 3.17         | 3.84                                     | 4.73         |

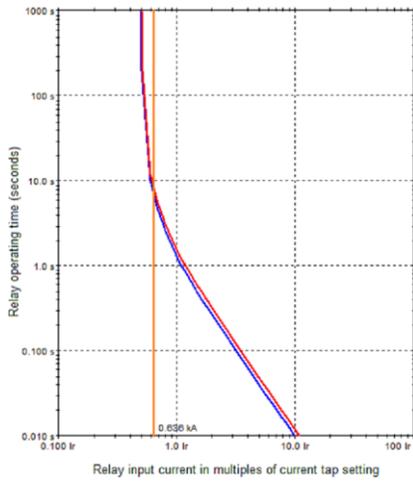


Fig. 5. Curvas para la característica extremadamente inversa de los relevadores R1 (rojo) y R2 (azul).

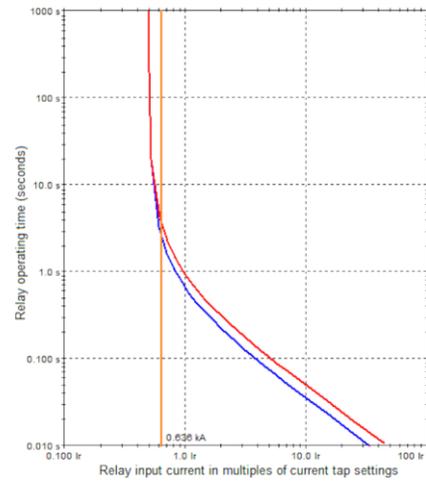


Fig. 6. Curvas para la característica muy inversa de los relevadores R1 (rojo) y R2 (azul).

tiempos de operación del relevador. La Fig. 6 muestra las curvas de los relevadores R1 y R2 con la característica muy inversa.

En la Tabla IV se muestran, para diferentes valores de carga, las corrientes y el tiempo de operación utilizando la característica muy inversa en los relevadores R1 y R2, tanto del modelo simulado como de los módulos del laboratorio de protecciones. Se observa claramente que los tiempos de arranque de los relevadores disminuyeron en comparación con la característica extremadamente inversa.

C. Caso III. Característica Normal Inversa

El sistema empleado en este caso de estudio está indicado en la Fig. 2a, y los relevadores R1 y R2 se configuraron para utilizar la característica normal inversa. El relevador R1 es el respaldo del relevador R2. Los ajustes de los relevadores fueron los siguientes:

- Ajuste de toma de corriente R2  $I = 500$  A,  $I' = 0.5$  A
- Ajuste de toma de corriente R1:  $I = 500$  A,  $I' = 0.5$  A
- Ajuste del indicador de tiempo R2: 0.05
- Ajuste del indicador de tiempo R1: 0.08

En la Fig. 7 se pueden observar las curvas de los relevadores R1 y R2 con la característica normal inversa y con la combinación de ajustes del indicador de tiempo e indicador de corriente antes mencionados.

La Tabla V muestra, para los mismos valores de carga de los casos I y II, las corrientes y el tiempo de operación de los relevadores R1 y R2 con la característica normal inversa, tanto del software NEPLAN como de los módulos del laboratorio. Se observa que los tiempos de disparo disminuyeron considerablemente si se comparan con los casos anteriores. Los tiempos de operación de los relevadores en las Tablas III, IV y V son por sobrecargas y no por cortocircuito, por esta razón no se cumple con el valor del intervalo de tiempo de coordinación (CTI) que debe de estar entre 0.2 y 0.5 s [24]. El cálculo de los ajustes de la coordinación se realiza usando las corrientes de cortocircuito trifásico. Por eso es que las diferencias de tiempos de operación de los relevadores son mucho mayores que los CTI permitidos.

TABLA IV

TIEMPOS DE OPERACIÓN DE LOS RELEVADORES R1 Y R2 DEL SISTEMA RADIAL CON LA CARACTERÍSTICA MUY INVERSA PARA DIFERENTES CORRIENTES DE CARGA. VALORES OBTENIDOS DE SIMULACIONES Y DE EXPERIMENTOS.

| Carga<br>$\Omega/Fase$ | Corriente (kA) |             | Tiempo de operación del relevador R2 (s) |             | Tiempo de operación del relevador R1 (s) |             |
|------------------------|----------------|-------------|--|-------------|--|-------------|
|                        | Simulación     | Experimento | Simulación                               | Experimento | Simulación                               | Experimento |
| 213                    | 0.63           | 0.61        | 2.59                                     | 2.80        | 3.60                                     | 3.59        |
| 150                    | 0.73           | 0.70        | 1.49                                     | 1.48        | 2.08                                     | 2.08        |
| 123                    | 0.77           | 0.74        | 1.27                                     | 1.30        | 1.77                                     | 1.71        |

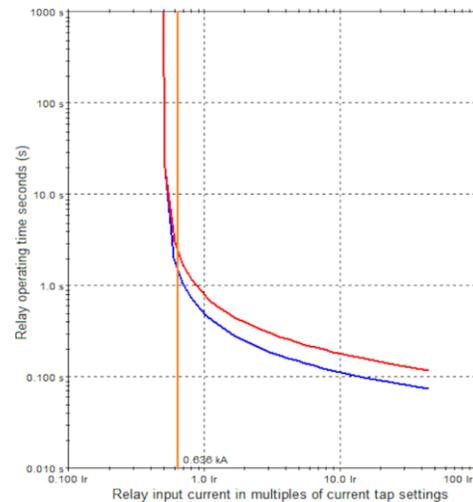


Fig. 7. Curvas empleadas en los relevadores R1 (rojo) y R2 (azul) con la característica normal inversa.

TABLA V

TIEMPOS DE OPERACIÓN DE LOS RELEVADORES R1 Y R2 DEL SISTEMA RADIAL CON LA CARACTERÍSTICA NORMAL INVERSA PARA DIFERENTES CORRIENTES DE CARGA. VALORES OBTENIDOS DE SIMULACIONES Y DE EXPERIMENTOS.

| Carga<br>$\Omega/Fase$ | Corriente (kA) |             | Tiempos de operación del relevador R2 (s) |             | Tiempo de operación del relevador R1 (s) |             |
|------------------------|----------------|-------------|---|-------------|--|-------------|
|                        | Simulación     | Experimento | Simulación                                | Experimento | Simulación                               | Experimento |
| 213                    | 0.63           | 0.61        | 1.53                                      | 1.70        | 2.43                                     | 2.79        |
| 150                    | 0.73           | 0.70        | 0.94                                      | 1.10        | 1.50                                     | 1.79        |
| 123                    | 0.77           | 0.74        | 0.82                                      | 0.86        | 1.31                                     | 1.36        |

#### D. Caso IV. Falla de Cortocircuito Trifásico en el Bus 3

La red eléctrica considerada en este caso de estudio está indicada en la Fig. 2a, y consiste en aplicar una falla de cortocircuito trifásico en el bus 3. Los relevadores R1 y R2 se programaron con los siguientes ajustes:

*Ajuste de toma de corriente R1:  $I = 500$  A,  $I' = 0.5$  A*

*Ajuste de toma de corriente R2:  $I = 500$  A,  $I' = 0.5$  A*

*Ajuste del indicador de tiempo R1: 0.07*

*Ajuste del indicador de tiempo R2: 0.05*

Los relevadores R1 y R2 se evaluaron con todas las curvas características. En la Fig. 8 se muestra la curva del relé R2 con la característica normal inversa. En las Tablas VI y VII se muestran los tiempos de operación que se obtuvieron al simular y evaluar experimentalmente los relevadores R1 y R2 con corrientes de cortocircuito trifásicas simuladas de 0.948 kA y experimentales de 0.95 kA considerando todas sus curvas características. Se aplicó una falla de cortocircuito en el bus 3. Como puede observarse en las Tablas VI y VII, solamente las curvas con las características de tiempo muy inversa y normal inversa cumplen con el intervalo de tiempo de coordinación (CTI) que se encuentra entre 0.2 y 0.5 s [24]. Las curvas inversas de larga duración y extremadamente inversa están fuera de este rango y para que pudieran cumplir con el CTI una opción sería bajar el indicador de tiempo del relevador R1.

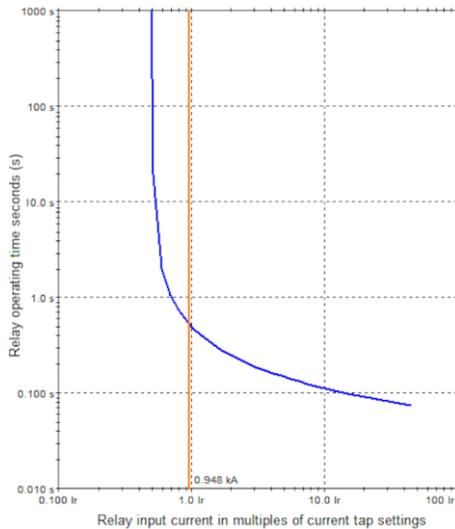


Fig. 8. Curva para la característica normal inversa del relevador de sobrecorriente R2.

TABLA VI

TIEMPOS DE OPERACIÓN Y CTI EN LAS SIMULACIONES DE LOS RELEVADORES R1 Y R2 DEL SISTEMA RADIAL PARA UNA FALLA TRIFÁSICA EN EL BUS 3.

| Curva característica      | Tiempo de operación (s) |      | CTI  |
|---------------------------|-------------------------|------|------|
|                           | R1                      | R2   |      |
| Inversa de larga duración | 9.40                    | 6.71 | 2.69 |
| Muy inversa               | 1.04                    | 0.77 | 0.27 |
| Normal inversa            | 0.76                    | 0.55 | 0.21 |
| Extremadamente inversa    | 2.17                    | 1.55 | 0.62 |

TABLA VII

TIEMPOS DE OPERACIÓN Y CTI EN LOS EXPERIMENTOS DE LOS RELEVADORES R1 Y R2 DEL SISTEMA RADIAL PARA UNA FALLA TRIFÁSICA EN EL BUS 3.

| Curva característica      | Tiempos de operación (s) |      | CTI  |
|---------------------------|--------------------------|------|------|
|                           | R1                       | R2   |      |
| Inversa de larga duración | 8.22                     | 5.76 | 2.46 |
| Muy inversa               | 1.02                     | 0.63 | 0.39 |
| Normal inversa            | 0.73                     | 0.53 | 0.2  |
| Extremadamente inversa    | 2.03                     | 1.51 | 0.52 |

#### E. Caso V. Falla de Cortocircuito Trifásico en la Línea L23, al lado Derecho del TC1.

En este caso de estudio se emplea el sistema de 3 nodos indicado en la Fig. 2b y consiste en aplicar una falla de cortocircuito en la línea L23. El laboratorio de protecciones cuenta con solo dos relevadores de sobrecorriente y no se puede simular el relevador de sobrecorriente direccional en el NEPLAN. Por lo anterior, se ajustan los relevadores de sobrecorriente para que actúen lo más rápido posible, es decir, con el ajuste de indicador de tiempo más bajo y con un ajuste de toma de corriente mínimo, ya que no se pueden coordinar por ser líneas paralelas.

*Ajuste de toma de corriente R1:  $I = 500$  A,  $I' = 0.5$  A*

*Ajuste de toma de corriente R2:  $I = 500$  A,  $I' = 0.5$  A*

*Ajuste del indicador de tiempo R2: 0.05*

*Ajuste del indicador de tiempo R1: 0.05*

Las corrientes de la falla de cortocircuito son muy elevadas como se puede observar en la Tabla VIII, representan 18 veces el valor del ajuste de toma de corriente, esto hace que los tiempos de operación del relevador R1 sean muy pequeños. Mientras que en la Tabla IX se nota que los tiempos de operación de R2 son más largos ya que las corrientes de cortocircuito trifásico son casi 2 veces el valor de la toma de corriente del lado primario.

TABLA VIII

TIEMPOS DE OPERACIÓN DEL RELEVADOR R1 DEL SISTEMA EN PARALELO PARA UNA FALLA TRIFÁSICA EN LA LÍNEA L23, LADO DERECHO DE TC1. VALORES DE SIMULACIONES Y DE EXPERIMENTOS.

| Curva característica      | Corriente de cortocircuito en TC1 (kA) |               | Tiempo de operación (s) |               |
|---------------------------|--|---------------|-------------------------|---------------|
|                           | Simulación n                           | Experimento o | Simulación n            | Experimento o |
| Inversa de larga duración | 8.99                                   | 9.00          | 0.35                    | 0.34          |
| Muy inversa               | 8.99                                   | 9.00          | 0.04                    | 0.03          |
| Normal inversa            | 8.99                                   | 9.00          | 0.12                    | 0.11          |
| Extremadamente inversa    | 8.99                                   | 9.00          | 0.01                    | 0.09          |

TABLA IX  
TIEMPOS DE OPERACIÓN DEL RELEVADOR R2 DEL SISTEMA EN PARALELO  
PARA UNA FALLA TRIFÁSICA EN LA LÍNEA L23, LADO DERECHO DE TC1.  
VALORES DE SIMULACIONES Y DE EXPERIMENTOS.

| Curva característica      | Corriente de cortocircuito en TC2 (kA) |            | Tiempo de operación (s) |            |
|---------------------------|--|------------|-------------------------|------------|
|                           | Simulació                              | Experiment | Simulació               | Experiment |
|                           | n                                      | o          | n                       | o          |
| Inversa de larga duración | 0.945                                  | 0.93       | 6.87                    | 6.17       |
| Muy inversa               | 0.945                                  | 0.93       | 1.50                    | 1.40       |
| Normal inversa            | 0.945                                  | 0.93       | 0.54                    | 0.55       |
| Extremadament e inversa   | 0.945                                  | 0.93       | 1.46                    | 1.56       |

## V. CONCLUSION

En este artículo se presentó un esquema híbrido para la enseñanza de protecciones eléctricas y está enfocado a alumnos de ingeniería eléctrica. Para lograr lo anterior, se usó un laboratorio de protecciones eléctricas de un SEP radial a escala, y uno de líneas paralelas que están protegidos con relevadores digitales de sobrecorriente de tiempo inverso. En los sistemas, se incluyen elementos que se pueden encontrar en cualquier SEP, como son las líneas de transmisión, transformadores de unidad, interruptores, transformadores de instrumento y relevadores, con los que el estudiante tendrá mucho contacto en la industria. Los modelos de los sistemas se desarrollaron y se simularon en el software NEPLAN. Los resultados obtenidos con simulaciones y experimentos se compararon entre sí y corresponden a las corrientes de sobrecarga, corrientes de cortocircuito y tiempos de disparo de los relevadores del sistema escalado. Se demostró experimentalmente que los tiempos de disparo de los relevadores son aproximadamente iguales a los obtenidos con las simulaciones, por lo que se puede concluir que tanto el ambiente de laboratorio como el uso de software son dos herramientas equivalentes y complementarias para la enseñanza moderna de las técnicas de protección de un SEP. Con la estrategia de enseñanza-aprendizaje propuesta en este artículo se logra que el alumno tenga una mejor comprensión de la coordinación de protecciones. También se aumenta la motivación de los alumnos ya que investigan, reflexionan y toman decisiones para dar respuesta a los proyectos de protecciones. Si no se realizan simulaciones y/o experimentación es más difícil que los alumnos comprendan los principios de la coordinación de protecciones eléctricas. La participación de estudiantes en este tipo de experimentos es de gran valor para lograr un aprendizaje efectivo, ya que permite que los alumnos experimenten con situaciones reales. Además, en el Laboratorio de Protecciones los alumnos aprenden a configurar un SEP y analizarlo mediante simulaciones. Lo anterior permite que los alumnos apliquen los fundamentos teóricos de protecciones, los diferentes esquemas de protección y su integración a un SEP. La configuración y coordinación del relevador son los propósitos educativos de un curso de protecciones.

## REFERENCES

[1] IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power System, ANSI/IEEE Std 242-1986, 1986.

- [2] A. G. Phadke, "A Modern Power System Simulation Laboratory: A power system engineering lab should be a priority for universities updating their facilities. One is currently being built at Virgin Tech," *IEEE Potentials*, vol. 4, no. 4, pp. 17-19, 1985.
- [3] M.S. Shen, R.R. Shoultz and W.J. Lee, "Physical Simulation Power System Laboratory," in *Proc. Int. Conf. on Advances in Power System Control and Management*, Hong Kong, 1991, vol. 2, pp. 859-864.
- [4] E. L. Stagliano, F. J. Mercede, "Undergraduate courses on power system protection at subtransmission and distribution levels," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 1604-1610, 1992.
- [5] L.L. Lai, "Computer Assisted Learning in Power System Relaying," *IEEE Trans. on Education*, vol. 38, no. 3, pp. 217-222, 1995.
- [6] T. S. Sidhu and M. S. Sachdev, "Laboratory Setup for Teaching and Research in Computer-based Power System Protection," in *Proc. International Conf. on Energy Management and Power Delivery EMPD '95*, Singapore, 1995, vol. 2, pp. 474-479.
- [7] Wei-Jen Lee, Jyh-Cherng Gu and Ren-Jun Li, "A Physical Power System Simulation Laboratory for Protective Relay Education", in *Proc. IV Simposio Iberoamericano Sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia*, Monterrey, México, 1998, pp. 7-12.
- [8] T.S. Sidhu and M.S. Sachdev, "A Graduate Program in Power System Protection," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, US, 2000, vol. 4, pp. 2091-2095.
- [9] Wei-Jen Lee, Jyh-Cherng Gu, Ren-Jun Li and P. Didsayabutra, "A Physical Laboratory for Protective Relay Education," *IEEE Trans. on Education*, vol. 45, no. 2, pp. 182-186, 2002.
- [10] Bhuvanesh A. Oza and Sukumar M. Brahma, "Development of Power System Protection Laboratory through Senior Design Projects," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 20, no. 2, pp. 532-537, 2005.
- [11] V. Fernao Pires, L. Sousa Martins, T. G. Amaral, R. Marcial, R. Rodrigues, M. M. Crisostomo, "Distance-Learning Power-System Protection Based on Testing Protective Relays," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2433-2438, 2008.
- [12] R. P. Mehta and B. Oza, "Laboratory Simulation of Generator Protection," in *Proc. Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, Bombay, India, 2008, pp. 131-136.
- [13] S. Brahma, J. De la Ree, J. Gers, A. A. Girgis, S. Horowitz, R. Hunt, M. Kezunovic, V. Madani, P. McLaren, A. G. Phadke, M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, J. S. Thorp, S. S. Venkata and T. Wiedman, "The Education and Training of Future Protection Engineers: Challenges, Opportunities, and Solutions," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 538-544, 2009.
- [14] J. Ren and M. Kezunovic, "Modeling and Simulation Tools for Teaching Protective Relaying Design and Application for the Smart Grid," in *Proc. Modern Electric Power Systems*, Wroclaw, Poland, 2010, pp 1-6.
- [15] R. Perez-Martinez, R. Villafafila-Robles, P. Lloret-Gallego, A. Egea-Alvarez, A. Sumper, A. Silos-Sanchez, "Protection System Remote Laboratory," in *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Electrical Power Quality and Utilisation*, Lisbon, Portugal, 2011, pp. 1-6.
- [16] R. Mehta, B. Oza, N. K. C. Nair and M. Kumar, "Simulation of Numerical Distance Protection Through Senior Design Project," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Power system Technology (POWERCON)*, Auckland, New Zealand, 2012, pp. 1-6.
- [17] A. M. Gaouda, A. Abd-Rabou, A. Dahir, "Developing educational Smart Grid Laboratory," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, Bali, Indonesia, 2013, pp. 404-409.
- [18] F. Shahnian, M. Moghbel and H. H. Yengejeh "Improving the Learning Experience of Power System Protection Students Using Computer-Based Simulations and Practical Experiments," in *Proc. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Perth, Australia, 2014, pp. 1-7.
- [19] F. Shahnian, M. Moghbel, H. H. Yengejeh, "Motivating Power System Protection Course Student by Practical and Computer-Based Activities," *IEEE Trans. on Education*, vol. 59, no. 2, pp. 81-90, 2016.

- [20] S. P. Carullo, R. Bolkus, J. Hartle, J. Foy, C. O. Nwankpa, R. Fischl and J. Gillerman, "Interconnected Power System Laboratory: Fault Analysis Experiment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 1913-1916, 1996.
- [21] NEPLAN AG, NEPLAN software tool to analyze, plan, optimize and simulate networks. Ver.5.8
- [22] *User manual and technical description of the overcurrent relay SPAJ 131* C. Asea Brown Boveri. Finland, 2002.
- [23] P. M. Anderson, *Power System Protection*. Wiley-IEEE press, 1998.
- [24] J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*. 3er Ed., Florida, CRC Press, 2007.



**Carlos Alberto Morales Bazan.**

Egresado de la Carrera de Ingeniería Industrial en Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna en 1990. Obtuvo el grado de M.C en Ingeniería Eléctrica en 2012. Es profesor de tiempo completo de la carrera de Ingeniería Eléctrica en el mismo Instituto desde 1996. Sus áreas de interés son Máquinas y Redes

Eléctricas, Protecciones de los sistemas eléctricos de Potencia.



**C. Hernández (M'06)** Obtuvo el grado de Ingeniero en Ciencias Computacionales en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey en 1990, México; y una Maestría en Ciencias en Fundamentos de Tecnologías Avanzadas de la Información en el Imperial College, Londres, en 1995. Fue investigadora en el

Departamento de Simulación del Instituto de Electricidad y Energías Limpias, México, de 1991 al 2000. Obtuvo el Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de La Laguna en el 2007. Ha publicado 23 artículos en revistas y ha participado en congresos nacionales e internacionales. Sus intereses están relacionados con inteligencia artificial, redes eléctricas y optimización de dispositivos electromecánicos.



**M.A. Arjona (S'93–M'97–SM'08)** es profesor investigador en el Tecnológico Nacional de México Campus La Laguna, México, donde obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en 1990. Obtuvo el grado de Ingeniero Eléctrico en el Instituto Tecnológico de Durango en 1988. Estuvo

en el departamento de simulación del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias de 1991 a 1999. Obtuvo el doctorado en filosofía en Ingeniería Eléctrica en el Imperial College, Londres, en 1996. Ha publicado 50 artículos en revistas y ha participado en congresos nacionales e internacionales. Sus intereses de investigación comprenden el diseño, análisis y control de máquinas eléctricas, redes eléctricas y energía eólica.