

Simulador de entrenamiento para el personal que atiende la operación de subestaciones eléctricas de transmisión

Jorge Olmedo Ariza Castillo¹

jorgejoac@hotmail.com

Javier Eduardo Gelvis Vega²

javiergelvis@hotmail.com

Gilberto Carrillo Caicedo¹

gilberto@uis.edu.co

Clara Inés Peña de Carrillo²

clarenes@uis.edu.co

Universidad Industrial de Santander

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

² División de Servicios de Información

Bucaramanga, Colombia

RESUMEN

Es evidente que los adelantos y las nuevas tendencias en sistemas de información (SI) y Tecnologías de Información (TI), han ofrecido a los procesos de formación, nuevas alternativas que posibilitan la creación de sistemas avanzados de capacitación soportados en Técnicas de Simulación e Inteligencia Artificial. Bajo este contexto, se han logrado diseñar mecanismos de entrenamiento que estimulan el autoaprendizaje y la adquisición de habilidades y destrezas en los usuarios, contribuyendo asimismo, a mejorar los niveles de calidad en la prestación de servicios, a optimizar los programas de entrenamiento continuo, y a reducir los costos generados por el uso de recursos físicos relevantes en los procesos de producción.

Este trabajo plasma el desarrollo de un sistema de simulación de subestaciones eléctricas como una herramienta de apoyo para el entrenamiento del personal que las opera. Mediante este simulador, se pretende enseñar a los usuarios a operar un sistema real sin tener que trabajar directamente con los equipos. Para lograrlo, se dan a conocer en detalle las características físicas de la subestación, se formulan escenarios de operación y falla en una variedad de condiciones, se permite la repetición de maniobras y ejercicios, se expone al operador a una serie de incidencias que son inviables utilizando equipos reales y se supervisa todo el progreso del aprendizaje. En resumen, se instruye al operario de una manera eficiente, para que cuando se enfrente a situaciones anormales o poco frecuentes se pueda desempeñar adecuadamente.

1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de aprender dinámicamente, tanto en el ámbito individual como en el organizacional, es importante para poder aplicar los cambios que les permitan a las organizaciones adaptarse al entorno en el que se encuentran inmersas. Se hace necesario, por lo tanto, contar con instrumentos capaces de reflejar sistemas complejos altamente interrelacionados de manera comprensible y de facilitar la rápida integración de la información. La integración del conocimiento en grupos dentro de las organizaciones permitirá reacciones adaptativas rápidas.

El sector eléctrico no se escapa a estas necesidades pues centra sus ventajas competitivas en el talento humano y los desarrollos tecnológicos. Por esta razón el entrenamiento, la capacitación del personal y el desarrollo tecnológico, se convierten en uno de los aspectos importantes para optimizar los procesos y elevar los niveles de calidad de los productos y servicios que ofrece.

Dada la importancia y número de subestaciones en el sistema eléctrico, los esfuerzos en optimizar sus procesos y su confiabilidad repercutirán en la calidad del servicio eléctrico. Por lo tanto, la operación de subestaciones es un campo potencial para el desarrollo de sistemas enfocados a la optimización de sus procesos. Esto motivó la elaboración de un sistema de entrenamiento para el personal que atiende las subestaciones, basado en el desarrollo tecnológico de sistemas software, que proporcione herramientas para la aplicación de conocimientos, destrezas y habilidades requeridas en su desempeño. Este sistema se fundamenta en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, que permitan el desarrollo de nuevas alternativas para los proceso de formación, apoyadas en técnicas de Simulación e Inteligencia Artificial, aportando de esta manera mecanismos de entrenamiento que estimulen el aprendizaje, el autoaprendizaje y la adquisición de habilidades y destrezas en el personal.

El presente documento está organizado de la siguiente manera: la sección 2 describe los conceptos generales básicos del sistema propuesto, la sección 3 describe el modelo para la operación de una subestación eléctrica, la sección 4 describe el desarrollo del sistema de simulación, y las secciones 5 y 6 presentan los resultados y conclusiones obtenidos de la experimentación con esta herramienta.

2. CONCEPTOS GENERALES

2.1. Operación de Subestaciones

La operación de una subestación de transmisión, dentro del nuevo esquema operacional del sistema interconectado, es realizada por los asistentes de la subestación o los operadores del Centro de Supervisión y Maniobras (CSM) o Centro Nacional de Despacho (CND). Los asistentes de la subestación utilizan los niveles de control inferiores, desde la operación directa sobre los equipos hasta el control por computador desde las salas de control, mientras que los operadores del CSM o del CND utilizan los sistemas de comunicaciones para realizar las órdenes de control, sólo sobre los equipos primarios de potencia. Las actividades de supervisión y registro de los equipos las realiza el asistente de la subestación mediante inspección visual y a través de la toma de medidas de las variables que proporcionan los sensores de la subestación [2].

En la Figura 1 se muestran las interrelaciones existentes entre los asistentes de subestaciones, los operadores del CSM y del CND, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y la Subestación Eléctrica (S/E).

El asistente de subestaciones requiere la toma de decisiones en la operación. Por ello, necesita el conocimiento preciso del sistema sobre el que va actuar y la visión del estado del sistema interconectado, ya que sus acciones o intervenciones lo afectan. El nuevo rol del asistente de la S/E, entonces, requiere de nuevas y mejores destrezas en el seguimiento y modificación de los parámetros de la subestación, el conocimiento de los procedimientos establecidos, los alcances y las restricciones de dichos procedimientos, y las destrezas que le permitan la actuación rápida en el momento de la toma de la decisión.

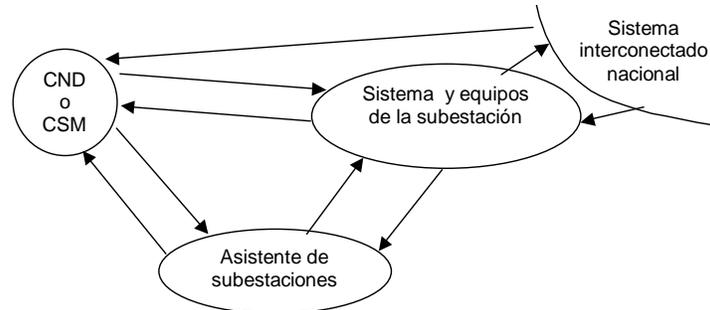


Figura 1. Estructura causal entre operadores y los sistemas

Las tareas básicas realizadas por el asistente de subestación son: supervisar, administrar, operar, controlar, interpretar y diagnosticar. Las acciones, fuera de las estrictamente operativas, le permiten al operador: hacer el seguimiento de las señales de tensión de control de los equipos de patio; actuar ante alarmas; maniobrar sobre la configuración tanto de servicios auxiliares como de equipos de patio y llevar a cabo ciertas actividades de mantenimiento [8].

El sistema de entrenamiento tiene en cuenta estos factores, que corresponden a los objetivos de la simulación y conforman la base para la construcción del “software” de entrenamiento de los operadores de subestaciones con interfases que permitan y faciliten la familiarización, capacitación y entrenamiento en los fenómenos que caracterizan el comportamiento de las subestaciones de transmisión, a través de la experimentación.

2.2. Consignas

Para realizar una operación es necesaria la ejecución de una secuencia de acciones de control sobre los equipos primarios de potencia en un orden establecido. Este orden depende tanto de la operación que se requiere hacer como de la configuración de la subestación.

La información y la secuencia de acciones de operación en los equipos para realizar una operación determinada se encuentra en la **consigna operativa** respectiva. En ella se describen las condiciones para la realización de la operación, las secuencias de acciones a realizar y el estado final de la subestación. Asimismo, si alguna de estas secuencias no se pudiese realizar, relaciona el documento que se debe consultar para la solución del percance [6].

Las **consignas bajo falla** contienen la descripción de las maniobras y acciones a realizar en caso de presentarse alguna falla no destructiva en la subestación o en el sistema de potencia. La falla es evidenciada por la activación de una alarma, un disparo o la inadecuada operación de los equipos de maniobra y control (Falla en el cierre y/o apertura de seccionadores e interruptores), y/o protección de la subestación. Las consignas bajo falla contienen una relación de situaciones de falla con sus posibles causas y soluciones en forma de tabla, además de una revisión del circuito de control básico [6]. El objeto de las consignas bajo falla consiste en que éstas sirven como herramienta básica al operador de la subestación para: determinar la causa de una situación de

contingencia, restaurar las condiciones normales de operación y elaborar un reporte que permita a los grupos de mantenimiento localizar la falla.

3. MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA OPERACIÓN DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Para la construcción del modelo de simulación del sistema de la subestación, se tomó como base la desagregación funcional de la subestación que se presenta en la Figura 2. Esta figura muestra la visión global del sistema y una representación de su funcionamiento a través de la simplificación circuital y de conexión. Esta abstracción proporciona la identificación de funciones y la caracterización de sus elementos, sus funciones y su jerarquía. En la figura 2 se pueden observar los siguientes tres niveles: *un nivel de sistema* (equipos primarios de potencia), *un nivel funcional* (protección, control, etc.) y *un nivel de sistemas básicos* [2].

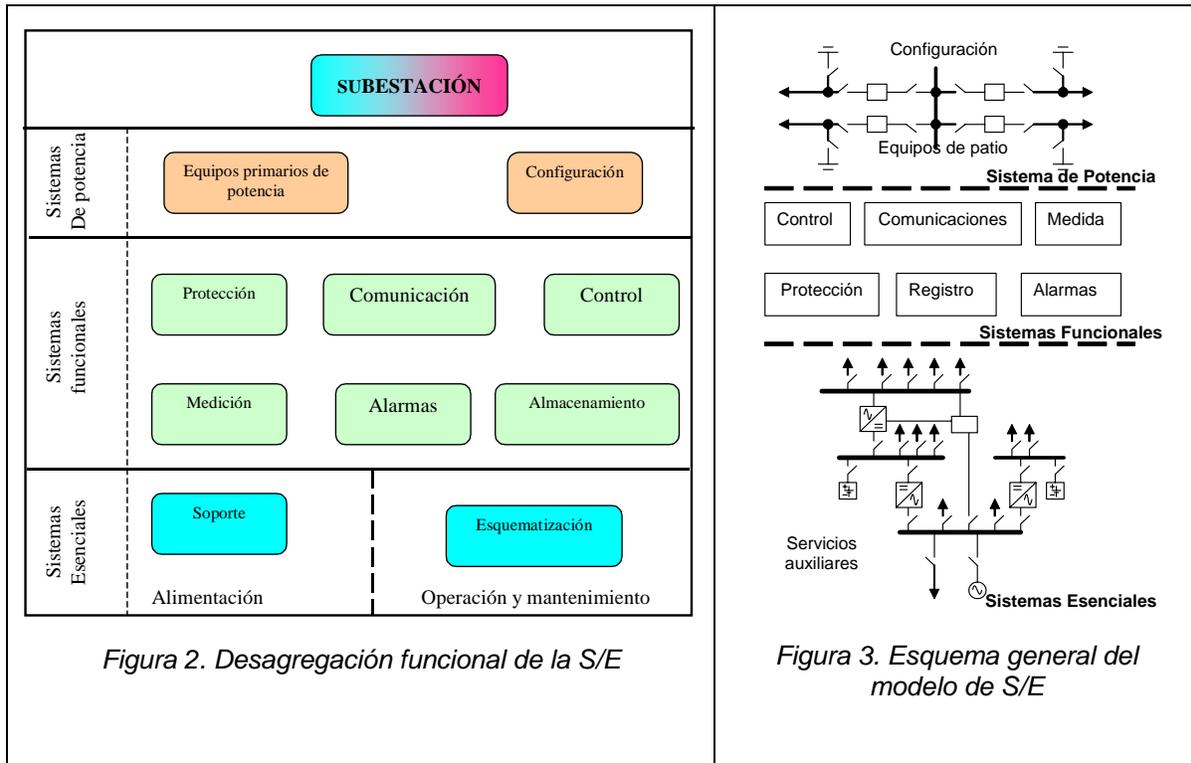
En *el primer nivel* se agrupan las relaciones de una subestación con el sistema interconectado: flexibilidad, confiabilidad y seguridad.

El sistema de transmisión (Sistema Interconectado Nacional en la Figura 1) influye en el diseño de la subestación y la subestación influye en la operación y en el estado del sistema de transmisión. Los factores relativos a la flexibilidad del sistema para posibilitar ampliaciones de subestaciones y configuración del sistema interconectado, así como los factores de operación y mantenimiento de los elementos del sistema y de la subestación, son de gran importancia y quedan determinados en el arreglo o configuración que se hace en las subestaciones.

En *el segundo nivel* aparecen los sistemas funcionales que se encargan de controlar, monitorizar y supervisar la red de transmisión y los equipos primarios de potencia. Estos sistemas que por lo general son complejos en su funcionamiento y estructura son: el sistema de protecciones, el sistema de control, el sistema de alarmas, el sistema de registro de fallas, el sistema de comunicaciones y el sistema de medición.

En *el tercer nivel* aparecen los sistemas esenciales que son fundamentales para el funcionamiento de los demás sistemas. Por un lado los servicios auxiliares, y por el otro, el sistema de esquematización necesario para una óptima operación y mantenimiento.

El modelo de la subestación necesario para la realización de procedimientos operativos incluye la lógica de control, la realización de los procesos operativos de los asistentes de subestaciones y los operadores del CND y la presentación de fallas en los equipos en los casos que permite la realización de maniobras. El modelo permite las acciones que realiza el asistente de subestaciones y refleja las implicaciones y consecuencias en el estado del sistema. Estos aspectos son importantes para el operador, porque son los que debe chequear y sobre los que puede tomar decisiones. En la Figura 3 se observan los sistemas que conforman el modelo con el cual se ha representado la subestación.



4. SISTEMA SOFTWARE PARA EL ENTRENAMIENTO, OPERACIÓN Y ATENCIÓN DE FALLAS EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE TRANSMISIÓN

Con base en el modelo de simulación presentado en la sección 3 se detallan las consideraciones específicas tenidas en cuenta para representar las características operacionales de una subestación de transmisión, como instrumento pedagógico de los procedimientos operativos.

En este caso, el hecho de que el modelo no esté enfocado al análisis sino al entrenamiento, permite que los modelos no sean tan complejos como los necesarios para el estudio de otras características. Asimismo para la construcción del modelo de la Subestación es importante tener en cuenta que siendo un proceso real, es un proceso complejo, por lo que cualquier intento de construir una descripción exacta de ella es usualmente una meta imposible de alcanzar.

En el modelo de funcionamiento no se tienen en cuenta los parámetros de corrientes ni tensiones en el tiempo. El parámetro de tensión se tiene en cuenta para la presentación de la condición de los equipos (energizados, desenergizados), y será la variable que determinará el estado del sistema. Lo anterior, debido a que desde el punto de vista de los operadores de subestaciones, el comportamiento en el tiempo de los parámetros de tensión y de corriente no es de interés, ya que estos varían rápidamente (presentan un ciclo en 16 milisegundos), y los sistemas de protecciones y registro de fallas se encargan de responder a las variaciones anormales de éstos en la misma escala de tiempos. Los operadores no requieren analizar estos parámetros en el tiempo para tomar decisiones operativas [2].

4.1 Arquitectura del Sistema

Para la implantación del sistema la arquitectura candidata seleccionada es la llamada arquitectura de aplicaciones de tres capas, que consiste en una capa de cliente, una capa de dominio de la aplicación y una capa de datos, según se muestra en la Figura 4.

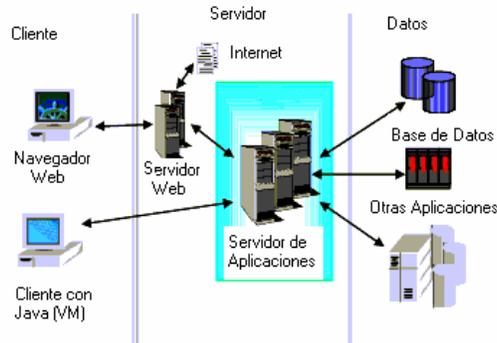


Figura 4. Arquitectura de Aplicaciones de Tres Capas

Capa de Cliente o Presentación

Reúne todos los aspectos del “software” que tienen que ver con las interfaces y la interacción con los diferentes tipos de usuarios. Los datos se solicitan desde aquí inicialmente, y las interfaces de usuario están representadas por navegadores Web o clientes como aplicaciones Java. Estos aspectos típicamente incluyen el manejo y aspecto de las ventanas, el formato de los reportes, menús, gráficos y demás elementos en general.

Capa del Dominio de la Aplicación

Reúne todos los aspectos del “software” que automatiza o apoya los procesos de negocio realizados por el usuario. Estos aspectos incluyen las tareas que forman parte de los procesos, las reglas y restricciones que aplican. Esta capa también recibe el nombre de capa de la lógica de la aplicación o de negocio.

Capa de Datos

Reúne todos los aspectos del “software” que tienen que ver con el manejo de los datos. Representada por bases de datos relacionales u otras fuentes de datos finales, por lo cual se le denomina la capa de las Bases de Datos.

Se encontró en las herramientas de Java una solución para el desarrollo de la capa del cliente y para la capa intermedia. Java es un lenguaje de alto nivel con una notable librería de clases dentro de su versión estándar, que hace por tanto, fácil y potente el desarrollo [12].

4.2 Entorno de Trabajo

En la Figura 5 se presenta el entorno principal de trabajo del sistema de simulación.

El Menú consta de dos elementos principales: *Opciones*, ubicado en el panel superior izquierdo y *Usuarios*, ubicado en el panel derecho; cada uno compuesto a su vez de otras opciones de acuerdo a la siguiente distribución:

Opciones	Usuarios
Crear Subestación	Cambiar de Usuario de Sesión
Simular Subestación	Crear Usuario
Recrear Consigna	Modificar Usuario
Recrear Sesión de Simulación	Eliminar Usuario
	Historial del Usuario

El sistema de simulación consta principalmente de dos módulos: *Constructor* y *Simulador*. En el *Constructor* se crea la subestación teniendo en cuenta los siguientes pasos:

1. Ubicar cada uno de los elementos o equipos de patio como se indica en la Figura 5.

Entre los elementos principales que el sistema permite utilizar se encuentran: *el campo, la barra, el interruptor, el seccionador, el transformador, el conector y la tierra*.

La forma como sean ubicados los elementos determina la configuración de la subestación.

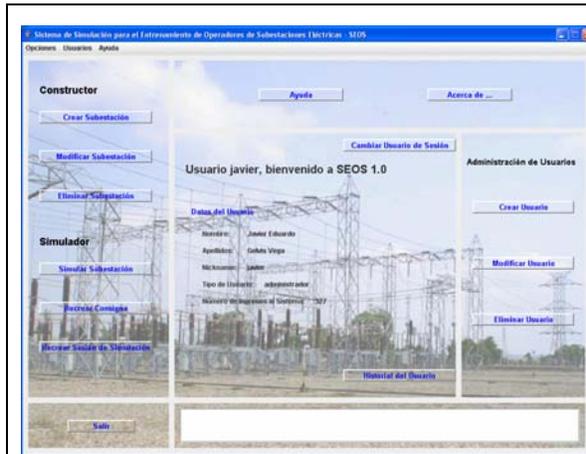


Figura 4. Entorno de trabajo

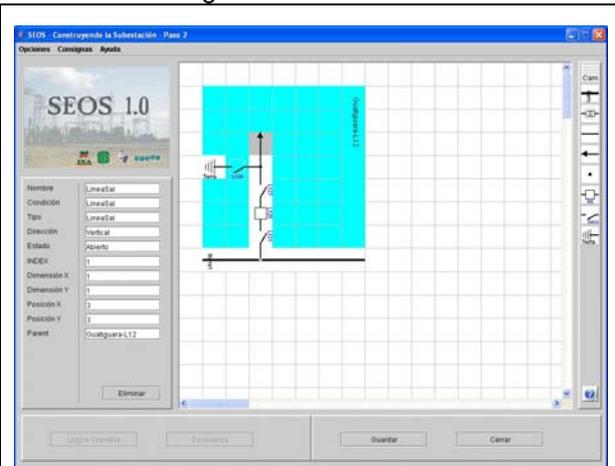


Figura 5. Ventana principal módulo Constructor

2. Definir la lógica operativa. Consiste en definir las reglas de funcionamiento de cada uno de los equipos de potencia de la subestación (interruptores y seccionadores). Estas reglas de funcionamiento son diagramas lógicos formados por compuertas AND y OR.
3. Definir los escenarios de simulación. Consiste en establecer los valores iniciales de cada uno de los elementos de la subestación. Para los equipos de potencia de la subestación

(interruptores y seccionadores) se puede definir si presentan o no falla en el momento de realizar la simulación de la subestación.

- Definir las consignas operativas y bajo falla que tenga la subestación. Consiste en introducir cada uno de los procedimientos necesarios para la operación normal y en falla de la subestación.

Cada uno de los pasos anteriores representa un módulo en el *Constructor*.

En el *Simulador* es donde se presenta el funcionamiento de la subestación creada con el *Constructor*. En este módulo, se puede trabajar de la siguiente forma:

- Simular la subestación. Permite operar la subestación desde los diferentes niveles de operación especificados durante la creación de la subestación. En las figuras 6, 7, 8 y 9 se presentan los diferentes niveles de operación de una subestación en el sistema de simulación.

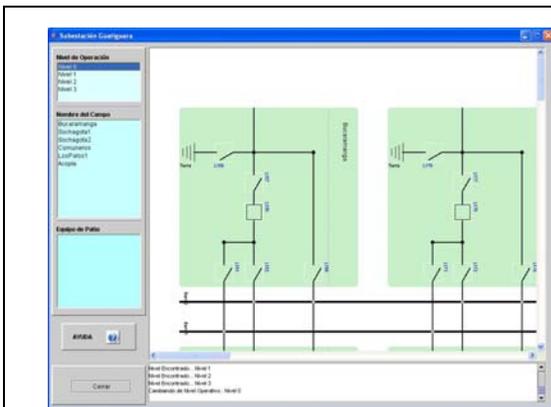


Figura 6. Nivel 0

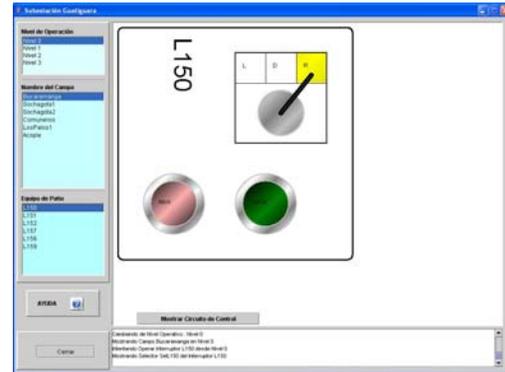


Figura 7.: Gabinete Nivel 0

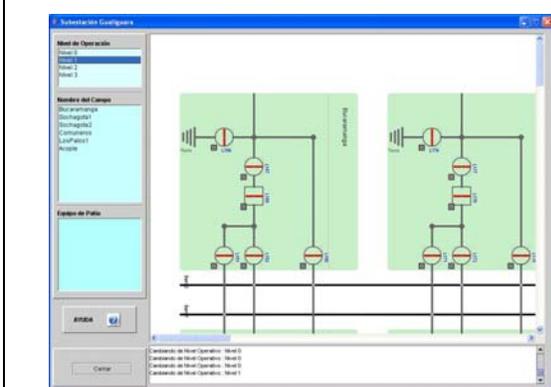


Figura 8. Nivel 1

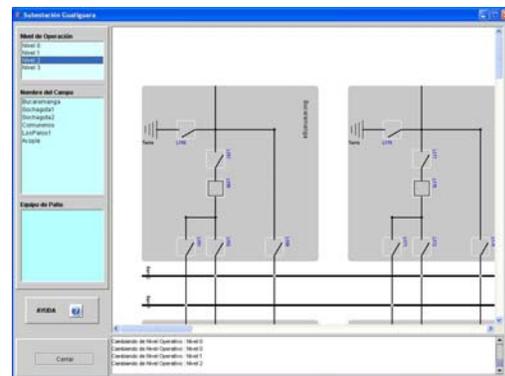


Figura 9. Nivel 2

- Recrear las consignas operativas. Permite recrear cada una de las consignas operativas introducidas para cada una de las subestaciones.

- Recrear las acciones realizadas por el usuario en una simulación anterior. En una ventana especial, mediante paneles, se muestra información sobre la sesión de simulación realizada: en el *panel central* se listan las acciones, indicando el elemento que se operó, su estado anterior y posterior, y un comentario acerca de la acción realizada; en el *panel inferior* se listan

las acciones “incorrectas” realizadas, informando el elemento que se intentó operar, su estado anterior y posterior, y un comentario del porqué la operación no se realizó.

Todas las acciones que el usuario realice en el *Simulador* se registran con el fin de servir de fuente de análisis de desempeño, para el supervisor de la operación respectivo.

4.3 Pruebas

El prototipo del sistema se utilizó en la capacitación de los operadores de las subestaciones eléctricas. Este permitió al instructor la definición de varios escenarios de simulación de subestaciones con configuraciones doble barra con transferencia e interruptor y medio [3], en los cuales los operadores se sometieron a pruebas que miden sus habilidades y destrezas necesarias para las situaciones que se plantean en los escenarios. El sistema de simulación le suministra al instructor la información para analizar y evaluar el desempeño de los operadores frente a los escenarios, lo que le permite identificar las falencias conceptuales y prácticas que presenta el operador. Esta información permitió establecer secuencias de entrenamiento que los operadores necesitaban.

De igual manera, el prototipo se probó como apoyo en la asignatura de subestaciones eléctricas de la E³T¹, permitiendo a los alumnos la identificación de las principales características de una subestación necesarias en la construcción de los prototipos de subestaciones. Asimismo, le permite la realización de maniobras tal y como lo hacen los operadores en las subestaciones del sistema interconectado.

Estas pruebas permitieron identificar las fortalezas y debilidades del prototipo para su mejoramiento.

5. CONCLUSIONES

El modelo de simulación para entrenamiento pretende dar cada vez más autonomía y versatilidad a los asistentes de subestaciones debido a que se ven sometidos a situaciones y circunstancias donde deben aplicar sus conocimientos y habilidades para resolver situaciones inesperadas o problemas imprevistos.

La simulación como herramienta de apoyo en los procesos de formación y entrenamiento, ofrece una alternativa eficiente para optimizar los programas de capacitación, debido a que permite el aprendizaje a través de la experiencia con un sistema simulado que representa el sistema real y proporciona los mecanismos para realizar ejercicios y maniobras, en forma similar a como se hacen en la realidad. De esta forma, permite exponer al operador a escenarios de entrenamiento con una gran variedad de condiciones y situaciones, poco frecuentes en su labor normal.

El sistema de simulación para el entrenamiento permite a los operadores adquirir habilidades y destrezas en el manejo de los equipos reales de una subestación, sin tener que usarlos directamente; lo cual evita inconvenientes como los elevados costos al dedicar equipos físicos sólo al aprendizaje, y realizar ejercicios que pueden conllevar un alto riesgo o ser irrealizables en un escenario real (fallas o maniobras que pueden ocasionar daños en el sistema o en el operador), convirtiéndose en una herramienta inapreciable en el marco de la prevención de riesgos y la seguridad laboral.

¹ E³T: Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander

La utilización del prototipo de simulación y entrenamiento, se facilita al contar con una interfase de usuario con diagramas similares a los encontrados en las subestaciones. El éxito del entrenamiento, sin embargo, requiere que los asistentes de subestaciones tengan acceso constante al sistema en su puesto de trabajo y lo empleen como soporte en la toma de decisiones durante la operación y como guía de supervisión de las subestaciones y la ejecución de consignas.

REFERENCIAS

- [1] ARIZA CASTILLO, Jorge Olmedo. SANTAMARIA CEPEDA, Lindon Antonio. “Desarrollo del plan de contingencia para equipos de la subestación Guatiguará propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. - CTE Oriente”. Tesis de grado de Ingeniería Eléctrica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2001.
- [2] ARIZA CASTILLO, Jorge Olmedo. Validación, Complementación Y representación de planes de contingencia para fallas de subestaciones. Trabajo de investigación de postgrado en Potencia. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2005.
- [3] CARRILLO CAICEDO Gilberto, GISEL². Informe técnico sobre avance del proyecto: “Sistema de Simulación para la Operación y la Atención de Fallas de Subestaciones de Transmisión”, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2004.
- [4] CARRILLO CAICEDO, Gilberto; Mora, Juan. Informe de avance del proyecto: “desarrollo del plan de contingencia para equipos críticos principales y equipos de subestaciones”, ISA-CTE Oriente, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2000.
- [5] GAFARO EUGENIO, Fredy Alexander; GELVIS VEGA Javier Eduardo. “Propuesta de un Sistema de Simulación para el Personal que Atiende las Subestaciones Eléctricas de Transmisión”. Tesis de grado de Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, 2004.
- [6] INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA S.A –ISA-, Gerencia de producción. Manual de operación. Guía de elaboración. Documento GP-015-99. Medellín, Colombia, Octubre de 1999.
- [7] JACOBSON, Ivar; BOOCH, Grady; RUMBAUGH, James. “El Proceso Unificado de Desarrollo Software”. Primera Edición. Addison Wesley. Madrid, 2000.
- [8] NORMAS DE COMPETENCIA LABORAL: “Desarrollo metodológico de las titulaciones elaboradas para el personal técnico de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. y adaptación del modelo de evaluación por competencia laboral, propuesto por el Sistema Nacional de Formación para el Trabajo -SNCFT-”. GISEL, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2002.
- [9] PRESSMAN, Roger. “Ingeniería del Software, Un enfoque práctico”. Quinta Edición. McGraw – Hill. Madrid, 2002.
- [10] SCOTT, Angela. “Computer Generation Imaging”. MSE540 - Modeling and Simulation. 1997.
- [11] SHANNON, Robert. “Simulación de Sistemas. Diseño, Desarrollo e Implementación”. Trillas. México, 1988.

² GISEL: Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica, de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.



- [12] THOMAS , Tood. "Java Data Access - JDBC, JNDI, and JAXP". First Edition. M&T Books. New York, 2002.