

SISTEMAS DE SIMULACIÓN EN REALIDAD VIRTUAL PARA ENTRENAMIENTO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS – UN PANORAMA GENERAL

VIRTUAL REALITY SIMULATION SYSTEMS FOR ELECTRICAL SUBSTATION TRAINING - AN OVERVIEW

Jorge Lozano González

Universidad Autónoma de Nuevo León, México
jorge.lozanogz@uanl.edu.mx

Luis Francisco Vázquez Calvillo

Universidad Autónoma de Nuevo León, México
luis.vazquezcvll@uanl.edu.mx

Leticia Neira Tovar

Universidad de la Laguna, España
leticia.neira@gmail.com

Recepción: 4/diciembre/2021

Aceptación: 21/diciembre/2021

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo la revisión de artículos desarrollados en la última década, en materia de simuladores de subestaciones eléctricas en realidad virtual, con propósitos de entrenamiento laboral y/o pedagógico. Esta revisión permite tener una visión del panorama más reciente, con respecto al tema estudiado, pues no existen revisiones lo suficientemente recientes para considerarlas actuales. Se hace una clasificación de los trabajos a analizar, realizando una búsqueda de trabajos relacionados en la última década, identificación de los más relevantes y lectura a fondo de estos últimos. Se identifican y detallan las características que destacan como mínimas en los proyectos, la libertad de interacción del usuario, la evaluación de los aprendices, el impacto de la inmersión y los entornos colaborativos. Se discute la importancia de la definición del usuario final, de modo que se tome en cuenta su experiencia, lo cual repercute indiscutiblemente en los resultados finales de aprendizaje.

Palabras Clave: Capacitación, entrenamiento, realidad virtual, subestaciones eléctricas.

Abstract

The purpose of this paper is to review articles developed in the last decade on virtual reality electrical substation simulators for job training and/or pedagogical purposes. This review allows us to have a vision of the most recent panorama, with respect to the subject studied, since there are no reviews recent enough to be considered current. A classification of the works to be analyzed is made, carrying out a search of related works in the last decade, identification of the most relevant ones and in-depth reading of the latter. The characteristics that stand out as minimum in the projects, the user's freedom of interaction, the evaluation of the learners, the impact of immersion and collaborative environments are identified and detailed. The importance of defining the end user is discussed, so that their experience is considered, which undoubtedly has an impact on the final learning results.

Keywords: *Electrical substations, training, virtual reality.*

1. Introducción

En los últimos años la realidad virtual ha tenido un gran auge en diversas aplicaciones, siendo una de ellas el desarrollo de simuladores o entrenadores para múltiples áreas de conocimiento. Ya sea con fines de capacitación o enseñanza, las propuestas de estos sistemas de entrenamiento destacan por encima de los métodos tradicionales de aprendizaje. Estos brindan un entorno simulado, en el cual el usuario es capaz de interactuar de manera inmersiva con elementos virtuales. En muchas ocasiones los componentes emulan fielmente el comportamiento de sus homólogos no virtuales. Todo esto brinda al usuario la oportunidad de tener un acercamiento más directo y de forma activa a estos componentes. De esta manera, el aprendiz puede mejorar en sus habilidades y entendimiento a través de la práctica [Chang, 2010].

Una de las áreas que se han beneficiado particularmente de las simulaciones de realidad virtual es la de los sistemas eléctricos de potencia. La realidad virtual permite adquirir conocimientos teóricos y prácticos de elementos como transformadores, o infraestructuras completas, como subestaciones eléctricas, en

las cuales se hará especial énfasis en esta revisión. Las subestaciones son parte esencial de la infraestructura de generación y distribución eléctrica. Ya sea que la energía sea destinada para el sector industrial, comercial o doméstico, el correcto funcionamiento de estas infraestructuras y sistemas es imprescindible para el funcionamiento de la sociedad actual [Ayala, 2016] Debido a su constante actividad, es imprescindible que los componentes eléctricos de una subestación se encuentren bajo un estricto régimen de mantenimiento y supervisión. Estos procedimientos se han vuelto cada vez más complejos y peligrosos. Tanto en circunstancias comunes como de riesgo, los ingenieros y técnicos eléctricos deben tener no solo suficiente conocimiento teórico, sino también experiencia práctica para tomar las mejores decisiones y solucionar el problema. El principal inconveniente son las pocas oportunidades de adquirir esta experiencia por medio de métodos tradicionales pues, en términos económicos y de seguridad, no hay prácticas viables que lo permitan, sin representar un alto costo en equipo y un alto nivel de peligro para los aprendices [Chang, 2010].

Los sistemas de simulación en realidad virtual son capaces de enfrentar dos de las grandes limitantes del aprendizaje actual en materia de sistemas eléctricos de potencia, costos y seguridad. Haciendo especial énfasis en la seguridad, en la mayoría de los casos, la naturaleza de los componentes eléctricos y la gran cantidad de energía que fluye a través de ellos hace imposible visualizar directamente su funcionamiento o comportamiento. Instalaciones como las subestaciones eléctricas tienden a estar en zonas remotas de difícil acceso, y una visita a estas instalaciones en funcionamiento representa una amenaza latente de accidentes, sobre todo para individuos no capacitados. Debido a lo anterior, las instituciones, sean estas empresas o escuelas, tienden a aislar componentes eléctricos de manera que sea posible analizarlos en un entorno controlado. Desde un punto de vista práctico, esto no es totalmente efectivo, pues de esta manera los aprendices no son capaces de estudiarlos en condiciones de trabajo reales, mucho menos en condiciones de falla. Provocar deliberadamente una falla en estos componentes con motivos pedagógicos no está permitido, pues representa un peligro para cualquier individuo presente y el equipo mismo.

Las investigaciones y proyectos realizados en materia de entrenadores en realidad virtual, enfocados específicamente a subestaciones eléctricas, han ido más allá del desarrollo mismo, se han explorado otros enfoques. Es debido a la variedad de enfoques presentes en los trabajos de la última década, que se ha vuelto necesario realizar una revisión de la literatura existente a la fecha, de modo que sea analizada a detalle. Esta revisión permite destacar el avance en cada uno de los enfoques identificados, y hacer notar aquellos en los cuales hay una mayor necesidad de desarrollo, investigación o profundización.

En este trabajo se analizan tres enfoques de entre las múltiples propuestas de investigación y proyectos. Uno es el desarrollo de entrenadores de subestaciones eléctricas en realidad virtual. Estos destacan por la propuesta de distintas arquitecturas, diseños, características y su inmersión. El análisis de este enfoque también comprende la evaluación de su eficacia al ser puesto a prueba con los usuarios finales, la cual se da en términos de retención y adquisición de conocimiento, comprensión, interés del usuario, entre otras cosas ([Chang, 2010], [Ribeiro, 2014], [Wang, 2010]). El segundo enfoque por revisar es el de las propuestas de metodologías para el desarrollo de entrenadores. Estas metodologías buscan a grandes rasgos optimizar este proceso en términos de tiempo y calidad de los resultados finales ([Cardoso, 2013], [Carvalho, 2016], [Mattioli, 2015]). Por último, se analiza el desarrollo de motores dedicados específicamente a la generación de entornos de subestaciones eléctricas en realidad virtual, los cuales incluyen desde librerías de modelos 3D de los componentes hasta módulos de simulación de los componentes con base en modelos matemáticos ([Fanqi, 2010], [Li, 2010]). Los hallazgos servirán de sustento para una futura investigación que permita el desarrollo de un simulador de entrenamiento en subestación eléctrica.

2. Métodos

Para la búsqueda de referencias se aplicó una metodología basada en la consulta de la mayor cantidad posible de artículos relacionados al tema principal, seguido de una etapa de revisión superficial, la cual tenía por objetivo descartar aquellos

considerados no relevantes para este estado del arte. Finalmente se analizaron a detalle aquellas propuestas y proyectos considerados útiles y relevantes. A partir de esta segunda revisión detallada, se tomaron notas para identificar y clasificar los trabajos, de acuerdo con su principal enfoque.

Para la primera etapa se hizo una búsqueda en bases de datos y/o revistas científicas, entre las cuales destacan, de manera no excluyente, IEEE Xplore y Springer Link, debido a la cantidad de trabajos encontrados. Estas búsquedas fueron realizadas siempre haciendo uso de las palabras clave “Virtual Reality”, o su abreviación “VR”, “Electrical substation” y “Training”.

Posteriormente, tuvo lugar la segunda etapa, una revisión superficial que consto de la lectura de abstract, discusión y conclusiones. También se hizo una lectura superficial del contenido. Además de la afinidad al tema y utilidad para la revisión, y con el objetivo de realizar una revisión de la literatura más reciente, se acotaron las fechas de origen de los trabajos a la última década, comprendida entre el 2010 y 2020. La lectura se dio de manera cronológica, es decir, de los artículos más antiguos a los más recientes. La etapa de selección dio lugar a la identificación de veinte referencias consideradas útiles para la realización de este estado del arte.

Los trabajos seleccionados fueron analizados en detalle, identificando sus similitudes y diferencias de enfoque. Se colocaron etiquetas a cada artículo, y se hicieron anotaciones de lo más destacable de su contenido y enfoque.

3. Resultados

La realidad virtual en entrenadores y simuladores de sistemas eléctricos de potencia y subestaciones

La literatura más reciente disponible en materia de simuladores y entrenadores de sistemas eléctricos de potencia contiene una gran cantidad de proyectos en los cuales se desarrollan estos sistemas. Ya sea que se trate de infraestructuras completas, o se enfoquen en máquinas o elementos particulares, existen características que los asemejan y diferencian entre ellos. Las características en las que coinciden pueden ser consideradas estándar de los elementos a incluir en

futuros trabajos, mientras que las capacidades que los distinguen pueden ser vistas como elementos generados para una aplicación muy específica, o mejoras.

Funcionalidades mínimas en el desarrollo de proyectos de entrenadores

Los proyectos analizados muestran las siguientes orientaciones: desarrollar aprendizaje teórico en el usuario de manera más atractiva e interactiva, construir prácticas para el usuario que promuevan el desarrollo de su experiencia. Ya en el 2010 en [Chang, 2010] se presentaba el desarrollo de un simulador de entrenamiento para subestaciones. El entrenador no constaba solamente de visualización, sino que permite tener interacción con máquinas y elementos de la subestación. Dichas interacciones constaban de realizar procedimientos de mantenimiento y diagnóstico de fallas, para posteriormente realizar un reacondicionamiento de las partes dañadas. Desde los trabajos analizados con mayor antigüedad, es posible identificar que estos constan, de manera general, de tres modos de funcionamiento como mínimo: visualización de máquinas y componentes, con el fin de aprender de sus nombres y características; el desarrollo de prácticas rutinarias, tales como procedimientos lineales de mantenimiento; y la consideración de acciones necesarias frente a un mal funcionamiento o situación de riesgo. Características similares son encontradas en trabajos posteriores.

En [Xue, 2019], por ejemplo, se plantean módulos que tienen en esencia los objetivos anteriormente mencionados: “Substation Tour”, como funcionalidad de visualización; “Handover demonstration”, “Circuit diagram training” y “switch operation operation”, que hacen referencia al entrenamiento básico; y “Safety procedure inquiry” y “Accident investigation procedure inquiry”, que hacen referencia al manejo de situaciones adversas. En [Chiluisa, 2018] se implementa también esta estructura en tres módulos, llamados “Presentation”, “Interaction” y “Fault mode”. En [Liao, 2017] se proponen y desarrollan módulos con el mismo objetivo. Uno de recorridos, que servirá para que el personal conozca la infraestructura de la subestación. Uno de aprendizaje básico, donde se incluye aprendizaje de los equipos presentes en la subestación, a través de un recorrido independiente. Este hace posible que el usuario sea capaz, a través de los controles, de accionar la

aparición de información correspondiente a cada componente de la subestación en forma de texto y audio. Incluye también el entrenamiento de operaciones básicas: Mantenimiento de equipo, conmutación, desconexión de líneas, entre otros. Se incluye además el dinamismo de los componentes que denotan los cambios de estado de los equipos, como la apertura de cortacircuitos, por ejemplo. Por último, nuevamente es notable la consideración de situaciones de falla. El sistema lo divide en dos modos: fallas estáticas y dinámicas. Las primeras incluyen grietas en aislantes o puertas no cerradas. Las segundas se refieren a fallas como sobrecalentamiento e incendios. La capacitación y enseñanza, para quienes deben laborar en subestaciones u otras instalaciones eléctricas, demanda el conocimiento de los procedimientos básicos realizados en estos lugares, los cuales a su vez requieren de una identificación visual y técnica de los elementos y máquinas que componen las infraestructuras. De igual manera, se requiere de conocimientos y experiencia ante situaciones inesperadas, tales como accidentes o malfuncionamiento de los equipos. Estos conocimientos no son fáciles de transmitir por medios que no sean prácticos. Es notable en los trabajos analizados que, si bien las funciones han mejorado en términos de una mayor cantidad de procedimientos y detalles en los mismos, hay una clara tendencia a implementar como mínimo las tres funcionalidades ya mencionadas anteriormente. Estas funciones se perfilan para representar un estándar en términos de entrenamiento para los desarrollos de años futuros, pues ya es visible una predilección a implementarlas.

Libertad de interacción en los entrenadores

Resalta en los trabajos más antiguos la linealidad de los procedimientos realizados. Si bien el entrenamiento se da de manera interactiva, las acciones de los usuarios están algunas veces limitadas a las indicaciones del entrenador virtual. Cronológicamente hablando, esto ha cambiado, mostrando una tendencia a la búsqueda de una mayor libertad del usuario al interactuar con el entorno, las herramientas y la manera en que realiza un procedimiento. En algunos trabajos se han permitido incluso acciones no propias del procedimiento, con consecuencias tangibles virtualmente.

En [Wang, 2010] cada procedimiento tiene una serie de pasos a seguir. Una base de conocimiento experto (o base de reglas de operación) almacena registros que le permiten al simulador reaccionar de acuerdo con cada paso del procedimiento. Se hace una comparación del estado de operación anterior, el estado actual, y el que debería ser el siguiente. De esta manera el sistema reconoce las acciones que se deben procesar. En [Ayala, 2016] es notable la búsqueda de una interacción con mayor libertad, de manera que el usuario sea capaz de conocer los diferentes métodos de realización de una misma tarea, con diferentes herramientas o en diferentes secuencias de pasos. Para esto, en este proyecto se implementan 31 maniobras diferentes, donde algunas tienen el mismo objetivo, con procedimientos distintos. Si bien se busca cubrir una mayor cantidad de posibilidades, esto se hace a través de procedimientos que podría considerarse aun lineales. Algunos trabajos [Barata, 2015] dividen el tipo de entrenamiento en modos demostrativos, en los cuales las tareas se realizan de manera automática, sin necesidad de interacción del usuario, con el objetivo de mostrar el procedimiento completo; un modo guiado, el cual incluye instrucciones de parte del entrenador; y un modo de simulación, donde se permite ejecutar procedimientos sin ningún tipo de guía. En estos entrenadores se ve la opción de una mayor libertad para el usuario y los errores son identificados, pero no reflejan consecuencias. En [Nasyrov, 2018], un trabajo más reciente, se mencionan múltiples inconvenientes de los simuladores desarrollados a la fecha (2018), entre los cuales destacan escenarios en interfaz 2D poco realistas, procedimientos realizados superficialmente sin mayor detalle para el aprendiz y poco realismo en la navegación. En este trabajo se plantea la posibilidad de que el usuario pueda ejecutar acciones en la simulación, incluyendo incorrectas, con consecuencias realistas simuladas.

Como se puede ver, a medida que nuevos entrenadores en realidad virtual se han desarrollado, la interacción ha dejado de ser completamente lineal. Si bien la interacción no se ha vuelto totalmente libre (ya que este punto se ve afectado también por los objetivos planteados para el simulador y el usuario final), si se ha pasado a tener una mayor libertad en comparación. Esto en pro de un mayor dinamismo que le permita al usuario tener una experiencia más realista e inmersiva.

La implementación de una mayor libertad no apunta a eliminar la linealidad de los procedimientos, pero es notable su tendencia a darse en un mayor número de entrenadores.

Evaluación de los aprendices

Cuando se trata de un entrenamiento, es necesario hacer una evaluación final de los conocimientos obtenidos por el usuario, comúnmente con el fin de autorizarlo para realizar ciertas tareas, confirmar o actualizar sus conocimientos, o como una forma de verificar la calidad de las tareas realizadas en campo. Los entrenadores de subestaciones eléctricas en realidad virtual han mostrado una tendencia a la aplicación de arquitecturas que incluyen módulos de evaluación automática los cuales son capaces de entregar resultados cualitativos o cuantitativos para medir su desempeño. Esto ha eliminado la necesidad de una persona física que éste constantemente evaluando las acciones de los usuarios.

En [Ayala, 2016], además del entorno del entrenador para el usuario, se implementó una plataforma web para la evaluación de los aprendices. En esta plataforma se lleva un registro del avance de los usuarios. En [Ribeiro, 2014] se implementa un módulo supervisor que realiza una evaluación cualitativa del aprendiz. evalúa las acciones del usuario durante el entrenamiento y es capaz de dar una retroalimentación inmediata al termino de las sesiones de entrenamiento sobre las malas decisiones tomadas. También funciona con base en puntos que se acumulan por usuario, y asignan un rango. En [Barata, 2015] se implementa un “Authoring software”, “Virtual Technical Instruction”, que supervisa automáticamente las sesiones de entrenamiento, llevando la cuenta de los errores y aciertos realizados. Este sistema fue desarrollado con motivos pedagógicos, por lo que al final de las sesiones se genera un reporte para la evaluación del estudiante, por parte del profesor.

En el punto anterior el análisis muestra una tendencia a dar mayor libertad con respecto a lo que puede o no hacer el usuario, además de seguir pasos y procedimientos lineales. Esta tendencia de darle una mayor libertad al usuario implica también una mayor complejidad a la hora de evaluarlos, pues existen un

mayor número de posibles resultados a las acciones. A pesar de esto, se han implementado sistemas más avanzados que, de manera automática, son capaces de contabilizar aciertos y errores, e incluso indicar la razón de los errores a través de una retroalimentación. Es por lo anterior que se puede identificar que, a pesar de la complejidad en aumento de los entrenadores, las evaluaciones automáticas serán probablemente una capacidad deseada en futuros desarrollos.

Impacto de la inmersión en la experiencia de usuario

La inmersión en los entrenadores de subestaciones en realidad virtual se ve afectada por múltiples elementos. Algunos de ellos dependen directamente de las capacidades técnicas de la época, y de los equipos que procesan el software, como el realismo de los modelos y la visualización de animaciones al realizar ciertas acciones. Para efectos de este análisis, se consideran entornos inmersivos aquellos desarrollados para que la interacción se dé por medio de un HMD (Head Mounted Display) y joysticks, o controles similares.

En [Hernandez, 2016] se desarrolla un sistema de entrenamiento para subestaciones eléctricas de distribución. A pesar de que se hace uso de animaciones y sonido ambiente, la interfaz es de tipo 2D (Una pantalla). En [Ayala, 2016] el sistema de entrenamiento es a propósito desarrollado en un ambiente considerado no inmersivo. En este trabajo se justifica la no inmersividad en la capacidad de una visualización más cercana de los componentes, en el alto costo del equipo requerido para aplicar un entorno inmersivo, el entrenamiento extra para el uso de este equipo y la facilidad y familiaridad de los usuarios con controles comunes, como teclado y mouse. A pesar de esto, en este trabajo se propone como trabajo futuro el desarrollo de una versión inmersiva del entrenador donde se incluyan algunos de los procedimientos. Algo destacable es que en trabajos más antiguos era común especificar la inmersividad, o se hacía énfasis en esto, mientras que esto no sucede en los más recientes. La inmersividad, refiriéndose al equipo utilizado para la interfaz de interacción entre el usuario y el entorno virtual, es obviada en proyectos recientes. En [Liao, 2019], uno de los trabajos más recientes no menciona el término, siendo su que se basa en un entorno inmersivo.

Como es posible destacar, la inmersividad es un componente clave en los entrenadores de subestaciones eléctricas en realidad virtual. La implementación de HMD y joysticks como herramientas para generar una mayor inmersión en los entrenadores se ha vuelto algo muy común en trabajos recientes. Si bien esto puede variar en función de los procedimientos realizados en la simulación, es innegable que una mayor inmersión permite al aprendiz experimentar los procedimientos de manera más realista. Esto aunado a modelos con mayor definición y detalle, y otros elementos como música y sonidos realistas en el entorno, generan una mejor experiencia de usuario, y a su vez un mayor interés en el aprendizaje, a diferencia de los métodos tradicionales de enseñanza.

Entornos colaborativos

Si bien se han tratado de detallar procedimientos y maniobras de las subestaciones eléctricas por medio de herramientas de realidad virtual, todas estas han sido para un entrenamiento que involucra a una sola persona. La realidad es que en caso de grandes mantenimientos o situaciones de emergencia que ameritan actuar rápida y dinámicamente, la colaboración entre ingenieros y/o técnicos eléctricos es vital. A esto se atribuye el desarrollo de trabajos como los presentados en [Dai, 2018] y [Lei, 2018]. El primero propone y desarrolla el modelo de un sistema de entrenamiento en realidad virtual, con la característica destacable de permitir una colaboración de múltiples usuarios. Se introduce el modelado jerárquico de procesos, el control de concurrencia colaborativa distribuida y una estrategia de control de retardo de mensajes asíncronos. Establecen un primer precedente en el desarrollo de estos entrenadores con entornos colaborativos. El segundo, el mismo año (2018), realiza una investigación de esta misma tecnología, buscando mejorar aún más la inmersión de los usuarios. Se reporta el alcance de un efecto satisfactorio en tecnología colaborativa usada en simulaciones de realidad virtual. Esta tecnología colaborativa sigue en desarrollo y, a pesar de que no abundan los trabajos haciendo referencia a esta, los existentes presentan muy buenos resultados. Los trabajos actuales podrían ser en el futuro replicados para sistemas más complejos que requieran estas capacidades. Así, sería posible lograr

entrenamientos de equipos completos en maniobras y en situaciones de accidentes. Esto resultaría en equipos más preparados, pues se entrenarían en situaciones más realistas.

Trabajos sobre metodologías y herramientas de optimización en el desarrollo de sistemas entrenadores en realidad virtual

Además de propuestas y desarrollos de proyectos de entrenadores en realidad virtual, se encuentran algunos trabajos cuyo tema principal no es propiamente el desarrollo de un simulador, sino búsqueda de optimizar el proceso de desarrollo en sí. Estas investigaciones buscan encontrar metodologías y/o herramientas que permitan a futuros trabajos, o sistemas, ser desarrollados a una mayor velocidad y menor costo.

En [Mattioli, 2015] se expone el desarrollo de los entrenadores como un proceso que se ha vuelto cada vez más complejo, y se propone y desarrolla una herramienta de generación semi automática de entornos para subestaciones eléctricas. La herramienta resuelve la construcción del escenario a través de un software de reconocimiento de patrones, un sistema de posicionamiento automático y además incluye una conexión entre AutoCAD y Unity 3D, que permite que interactúen y reaccionen con base en eventos dados por el software contrario. El concepto proviene del uso de planos de planta y diagramas de operación, los cuales son usados como entradas para el proceso de generación automático. A través de estos planos y reconocimiento de símbolos 2D se puede hacer un mapeo de la posición de modelos 3D. El reconocimiento de patrones funciona generando un set de símbolos 2D, a través de bloques para cada símbolo eléctrico. El algoritmo itera a través de las entidades en el dibujo y busca coincidencias de patrones. Posteriormente entra en funcionamiento el sistema de colocación automático. Las coordenadas de transformación de los bloques en los planos de planta son almacenadas en un archivo estructurado con su nombre, su posición XY y su rotación. Para fines de interoperabilidad con otros sistemas, también se propone el uso de un formato que incluya traslación y rotación en cada plano, y parámetros de escalado. Con base en la identificación de los componentes y su posicionamiento

se genera el entorno de la subestación eléctrica. La conexión establecida entre AutoCAD y Unity 3D, a través de una API, tiene el propósito de que cualquier elemento modificado en AutoCAD se vea también modificado en Unity 3D. Un año más tarde en [Carvalho, 2016] se propone una metodología que hace uso de la generación automática anterior. En este artículo se plantea el problema del tiempo que toma modelar un gran número de subestaciones con gran detalle. A partir de esto es que se proponen una serie de pasos que contemplan la adquisición de información de los componentes en campo en términos de imágenes y especificaciones técnicas. Lo anterior con el objetivo de generar modelos apropiados. Posteriormente se definen las reglas para el entorno virtual, como el monitoreo de la cantidad de polígonos. A continuación, se aplica el reconocimiento de patrones y generación automática de los componentes en el entorno. Los resultados de esta metodología muestran haber generado una optimización del tiempo, con una reducción del 83% con respecto a otras subestaciones generadas sin dicha metodología.

Es claro que la necesidad de generar simulaciones y entrenadores de subestaciones eléctricas en realidad virtual provocará eventualmente una mayor demanda de estas. Dada la complejidad de estos sistemas es necesario establecer metodologías y estándares, así como herramientas que faciliten este proceso y lo optimicen, sobre todo en términos de tiempo, lo cual repercutirá también en términos de costos.

Motores de desarrollo

Otras propuestas han optado por generar un entorno entero dedicado a las subestaciones eléctricas en realidad virtual, aislando características no necesarias y dedicando recursos enteramente a estas simulaciones. Los trabajos plantean el desarrollo de motores de desarrollo, similares a los utilizados para simulaciones 3D, como Unity 3D. En ellos se construyen facilidades que permiten optimizar el desarrollo de entrenadores de subestaciones en realidad virtual.

En [Fanqi, 2010] la propuesta es argumentada en la complejidad del desarrollo de estos entrenadores en realidad virtual. Se trata de la creación del Framework de

una subestación virtual, bajo un desarrollo flexible. El sistema se plantea ser capaz de ser reusable, ya que los proyectos desarrollados a la fecha (2010) eran realizados bajo pedido, con alcances y equipos fijos, así como modelos de datos limitados. Consta de módulos para adquisición de datos a través de SCADA, de comunicación, cálculos de simulación con base en modelos matemáticos integrados, display de los procesos y resultados en realidad virtual con dispositivos modelados y gráficos 3D, y el módulo kernel, llamado "VS engine". El framework provee funcionalidades de API en los componentes del motor. Maneja las funciones básicas como el movimiento de objetos (componentes del motor), modelado del entorno, "View prejudgement" que forma un prejuicio de las partes visibles del entorno observadas por la vista humana para su posterior renderizado, el renderizado de la escena, detección de colisiones, transacción de eventos y compilación de scripts. Como se puede notar, es un sistema muy completo para la generación de todo lo que es necesario en el desarrollo de subestaciones en realidad virtual, incluyendo el procesamiento de simulación del comportamiento de los componentes. Los resultados de este trabajo muestran una disminución en el ciclo de desarrollo en un 40%, en comparación con un método de desarrollo tradicional. Otro trabajo que propone un sistema similar bajo la misma premisa se puede ver en [Li, 2010], pero se enfocan más en la flexibilidad y en las "Transformer substations". Utilizan el Torque Game Engine y se reforma para generar el nuevo motor dedicado. De igual manera se identifica una optimización en relación con la eficiencia y costos de desarrollo en las simulaciones de subestaciones de transformador.

La constante demanda de entrenadores de subestaciones eléctricas ha provocado la necesidad de generar entornos dedicados en donde se cuente con todas las herramientas y mecanismos para un desarrollo integral de estos sistemas. Las capacidades de estos sistemas crecen a un ritmo acelerado, por lo que en ocasiones el ciclo de desarrollo comienza a aumentar en tiempo y no es posible satisfacer una demanda de sistemas bajo pedido. Estos motores solucionan ese problema, pues permiten disminuir el tiempo de varias partes del desarrollo de sistemas completos, como la programación de la lógica de simulación de los

componentes, el modelado de nuevos componentes, etc. Un motor dedicado acorta el ciclo de desarrollo, disminuyendo tiempos, y a su vez costos.

4. Discusión

Un aspecto que, si es mencionado en múltiples trabajos, pero al cual no se le da tanto protagonismo, es el diseño enfocado al usuario final de manera más definida. En los trabajos donde se toma en cuenta al usuario final, la definición de usuario se expresada generalmente como “técnicos eléctricos” o “ingenieros eléctricos”. Solamente en [Ayala, 2016] se da una definición más específica de “Adultos sin habilidades computacionales previas”. Como en todo proyecto de desarrollo, el usuario final debe ser una consideración importante, pues su definición es un apoyo para el desarrollador con respecto a la interfaz, controles, acciones, apariencia, entre otros. En simuladores de subestaciones eléctricas, diseñadas tanto para entrenamiento laboral como pedagógico, esto puede jugar un papel muy importante en producir una atracción e interés hacia el aprendizaje, e incluso en la retención del conocimiento, en comparación con los métodos tradicionales.

En [Ogbuanya, 2018] se hace un estudio detallado sobre la eficiencia de las aplicaciones de realidad virtual con respecto a la de los métodos de aprendizaje convencionales, en temas de eléctrica y electrónica. El análisis se basa en los logros obtenidos, el interés del aprendizaje y el compromiso de los estudiantes. En este estudio se define a los sujetos como estudiantes universitarios de 17 a 24 años, distribuidos en dos grupos: uno donde se aplicó la realidad virtual y otro donde se continuó con los métodos comunes. Como conclusión del estudio se encontró una diferencia significativa en los resultados de los parámetros evaluados entre los estudiantes, encontrando un efecto positivo en el grupo que recibe clases por medio de aplicaciones de realidad virtual. A pesar de los resultados obtenidos, el trabajo presenta también múltiples referencias a otros estudios, en los cuales no se encontró una ventaja significativa al usar la realidad virtual, y se comentan posibles razones, entre las que se encuentran las diferencias en la infraestructura donde se llevan a cabo los estudios. Infraestructuras más completas y equipadas podrían no generar en los sujetos estudiados ningún cambio emocional significativo al hacer

uso de la realidad virtual, pues no representa para ellos algo tan atractivo en comparación.

Es a raíz de lo anterior que destaca la necesidad de definir muy bien a el usuario final de los sistemas de entrenamiento o aprendizaje en realidad virtual. Además de cubrir los procedimientos deseados, estos entrenadores deben ser capaces de provocar en el usuario el interés por aprender, que se traduce en una mayor atención de lo que se experimenta, y esto a su vez en una mayor retención del conocimiento, y atracción a seguir adquiriéndolo. La definición del usuario puede estar dada con base en edades, conocimientos y experiencia previos del tema, experiencia previa con las herramientas de la interfaz y la complejidad de los temas tratados en el simulador. Esto puede llevar a mejores resultados en el aprendizaje de los aprendices que hagan uso de los sistemas de entrenamiento para subestaciones en realidad virtual, e incluso de otros temas.

5. Conclusiones

La realidad virtual es considerada una herramienta que promete mejorar los métodos de enseñanza, ya sea para entrenamiento laboral o pedagógico. Sus variadas ventajas sobre los métodos tradicionales la hacen increíblemente efectiva para superar barreras del conocimiento previas y actuales, como el aspecto de seguridad, o la complicada ubicación de lugares en los cuales se pudieran adquirir conocimientos prácticos.

Como se expuso en esta revisión, entrenadores de subestaciones eléctricas, y de otros sistemas de potencia, en realidad virtual, presentan características similares que se han convertido en estándares de futuros trabajos, como modos de exploración, aprendizaje básico de componentes y procedimientos, y cómo reaccionar ante eventos adversos. Esto dado que son estos tres temas en los cuales se requiere más experiencia, sobre todo el último. La libertad que tiene el usuario es una característica que afecta directamente a la inmersividad. Esta libertad e inmersión afectan la experiencia de usuario, existiendo una tendencia marcada hacia darle una mayor libertad al usuario de interactuar con los componentes del escenario virtual, y así generar una experiencia más realista, afectando también a

la inmersividad. Esta experiencia más realista contempla también las consecuencias simuladas de las decisiones del aprendiz, incluso de las no acertadas. A nivel inmersividad esto implica controles, interfaces, como los HMD, sonidos y entornos realistas, etc. La aplicación de entornos colaborativos en tiempo real es otro elemento que genera un mayor realismo en las simulaciones, y además cubre la necesidad entrenamientos de equipos completos.

Los sistemas han pasado a ser más complejos, debido a la demanda que existe, y esta complejidad se refleja en varios aspectos, en la evaluación de los usuarios y el desarrollo de los mismos sistemas. En términos de la evaluación de los usuarios, esta ha pasado de darse de manera directa, por un entrenador que monitorea personalmente al aprendiz, a darse por medio de módulos completos, desarrollados con el propósito de contabilizar errores y aciertos, e incluso proveer de retroalimentación específica con respecto a los errores. La complejidad del desarrollo ha llevado a la propuesta de motores enteramente dedicados a entornos virtuales de subestaciones eléctricas, con módulos y características mínimas necesarias para estas simulaciones. Se ha llegado incluso a sistemas de generación automática de los entornos simulados, por medio de reconocimiento de patrones y símbolos en planos 2D, que posteriormente son sustituidos por modelos 3D.

La realidad virtual y el desarrollo de nuevas herramientas aplicables a estos sistemas prometen en futuros proyectos una mayor inmersión y características que mejoran el aprendizaje de los usuarios. Afinar las características actuales pronostica que el alcance de estos proyectos no sea ya limitado por cuestiones técnicas o tecnológicas, sino solo por las decisiones y especificaciones de desarrollo, consiguiendo las capacidades necesarias, y desarrollos optimizados en tiempo y costos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ayala García, A., Galván Bobadilla, I., Arroyo Figueroa, G., Pérez Ramírez, M., Muñoz Roman, J., Virtual reality training system for maintenance and operation of high-voltage overhead power lines. *Virtual Reality* 20(1), 27–40, 2016.

- [2] Barata, P. N. A., Filho, M.R., Nunes, M. V. A., Consolidating Learning in Power Systems: Virtual Reality Applied to the Study of the Operation of Electric Power Transformers. *IEEE Transactions on Education* 58(4), 255–261, 2015.
- [3] Cardoso, A., Lamounier, E., Lima, G., Oliveira, L., Mattioli, L., Junior, G., Silva, A., Nogueira, K., Do Prado, P., Newton, J., VRCEMIG: A virtual reality system for real time control of electric substations. In: *Proceedings - IEEE Virtual Reality*. pp. 165–166, 2013.
- [4] Carvalho, A., Cardoso, A., Barreto, C., Lamounier, E., Lima, G. F., Mattioli, L. R., Miranda, M., Prado, P. R., A methodology for reducing the time necessary to generate virtual electric substations. In: *Proceedings - IEEE Virtual Reality*. vol. 2016July, pp. 163–164. IEEE Computer Society, 2016.
- [5] Chang, Z., Fang, Y., Zhang, Y., Hu, C., A Training Simulation System for Substation Equipments Maintenance. In: *2010 International Conference on Machine Vision and Human-machine Interface*. pp. 572–575, 2010.
- [6] Chiluisa, M. G., Mullo, R. D., Andaluz, V. H., Training in virtual environments for hybrid power plant. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. vol. 11241 LNCS, pp. 193–204. Springer Verlag, 2018.
- [7] Dai, W., Liu, W., Dong Zhao, X., Shao, J., Li, Q., kun Ma, S., Xiong, N., nianLin, C., A model and application of collaborative simulation training system for substation based on virtual reality. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering*. vol. 474, pp. 610–616. Springer Verlag, 2018.
- [8] Fanqi, M., Yunqi, K., An improved virtual reality engine for substation simulation. In: *2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication*. vol. 1, pp. V1–846–V1–849, 2010.
- [9] Hernandez, Y., Ramírez, M. P., Virtual Reality Systems for Training Improvement in Electrical Distribution Substations. In: *2016 IEEE 16th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*. pp. 75–76, 2016.

- [10] Lei, Z., Huang, J., Li, Z., Wang, L., Cui, J., Tang, Z., Research on Collaborative Technology in Distributed Virtual Reality System. *Journal of Physics: Conference Series* 960, 2018.
- [11] Li, G. X., Fengli, Hong, L., Application of the virtual reality technologies in power systems. In: 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication. vol. 3, pp. V3–41–V3–44, 2010.
- [12] Li, M., Wang, S., He, T., A Transformer Substation Simulation engine based on Virtual Reality. In: 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, CMCE 2010. vol. 2, pp. 41–44, 2010.
- [13] Liao, X., Niu, J., Wang, H., Du, B., Research on virtual reality simulation training system of substation. In: Proceedings - 2017 International Conference on Virtual Reality and Visualization, ICVRV 2017. pp. 413–414. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017.
- [14] Liao, X., Wang, H., Niu, J., Xiao, J., Liu, C., Research on Simulation Training System of Immersive Substation Based on Virtual Reality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 486, 12112, 2019.
- [15] Mattioli, L., Cardoso, A., Lamounier, E. A., do Prado, P., Semi-automatic generation of virtual reality environments for electric power substations. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. vol. 353, pp. 833–842. Springer Verlag, 2015.
- [16] Nasyrov, R. R., Excell, P. S., New Approaches to Training of Power Substation Operators Based on Interactive Virtual Reality. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. vol. 11082 LNCS, pp. 551–555. Springer Verlag. 2018.
- [17] Ogbuanya, T. C., Onele, N. O., Investigating the Effectiveness of Desktop VirtualReality for Teaching and Learning of Electrical / Electronics Technology in Universities. *Computers in the Schools* 35(3), pp. 226–248, 2018.
- [18] Ribeiro, T. R., Reis, P. R. J. D., Junior, G. B., De Paiva, A. C., Silva, A. C., Maia, I. M. O., Araujo, A. S., AGITO: Virtual reality environment for power

- systems substations operators training. In: *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries *Lecture Notes in Artificial Intelligence* and *Lecture Notes in Bioinformatics*). vol. 8853, pp. 113–123. Springer Verlag, 2014.
- [19] Wang, W., Li, G., Virtual reality in the substation training simulator. In: *The 2010 14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*. pp. 438–443, 2010.
- [20] Xue, Z., Gao, W., Li, X., Wu, W., Research on Operation, Repair and Simulation Training Method of Electrical Equipment in Substation Based on Virtual Reality Technology. *Journal of Physics: Conference Series* 1345, 62035, 2019.