

Laboratorios virtuales en Ingeniería Eléctrica **Caso de estudio Calidad de la Potencia Eléctrica**

Jairo Augusto Lopera, Ing. Electricista

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia, Colombia, jlopera@upb.edu.co

Eugenio Betancur Escobar, PhD

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia, Colombia, ebetancur@h-mv.com

Andrés Emiro Díez, Ing. Electricista

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia, Colombia, ediez@geo.net.co

Gabriel Jaime López, Ing. Electricista

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia, Colombia, jlopez@upb.edu.co

Armando Bohórquez Cortázar, Msc

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia, Colombia, armando@upb.edu.co

Abstract

In this article a proposal is made to include modern programs of computer in curriculum of the postdegree and predegrees in Electrical Engineering, in such form that offers a substantial support to the development of classic subjects like the Electrical Circuits, Power Systems and Electrical Machines, and also to facilitate the understanding of the modern subjects, fruit of the recent developments of the technology as the Power Electronics and the High Voltage Direct Current (HVDC). The experience shows here it's concernig to the software PSCAD (Power System Computer Aided Design), and the example of practical application presented, it's the denominated Power Quality Virtual Laboratory.

Resumen

En este artículo se hace una propuesta para incluir modernos programas de computador en el currículo de los postgrado y pregrados en Ingeniería Eléctrica, en tal forma que se brinde un sustancial apoyo al desarrollo de asignaturas clásicas como los Circuitos Eléctricos , Sistemas de Potencia y Máquinas Eléctricas, y también para facilitar el entendimiento de las asignaturas modernas, fruto de los desarrollos recientes de la tecnología como son la electrónica de potencia y los sistemas de transmisión en corriente directa (HVDC). Se presenta puntualmente la experiencia que se ha tenido con el software PSCAD (Power System Computer Aided Design), y se muestra un ejemplo de aplicación práctica, que se ha denominado como Laboratorio Virtual de Calidad de la Potencia.

Palabras Claves

Calidad de la Potencia, Educación en Ingeniería Eléctrica, Programas de Computador, PSCAD, Laboratorio Virtual.

1. Introduction

La Ingeniería Eléctrica produjo el computador, y este se ha constituido en uno de sus frutos más exitosos. A pesar de que al nacer ya hacía más de cuarenta años que el mundo brillaba con la luz de la electricidad y que la economía de las naciones se movía gracias a las máquinas eléctricas, en pocos años el computador se ha convertido en una de las herramientas esenciales del ser humano en todos los aspectos, y en particular, ha hecho que la propia Ingeniería Eléctrica parezca impensable sin él.

Los sistemas eléctricos son controlados, diseñados, analizados y construidos con la asistencia de computadores, y el automatismo, la confiabilidad y la seguridad de los procesos de potencia eléctrica se han incrementado día a día. Los programas computacionales aplicables al control, diseño y análisis de sistemas eléctricos tienen un especial interés académico, en la medida en que solucionan macro problemas de ingeniería, a partir de las leyes fundamentales estudiadas en las asignaturas básicas de la carrera.

Esta es la razón por la cual algunos de estos programas de computador han sido paulatinamente incorporados en el currículo, e inclusive en el seno mismo de las facultades de Ingeniería Eléctrica del mundo se han desarrollado sus programas propios. Este es el caso de la Universidad Pontificia Bolivariana, donde históricamente se han generado programas que si bien no presentaban una interfaz gráfica moderna o amigable para el usuario, fueron y han sido equiparables a los que ofrecen hoy en día en el mercado las poderosas compañías de desarrollo de programas, que sirven de herramienta a importantes empresas del sector eléctrico en Colombia. Un ejemplo de estos son los programas que permiten el cálculo de los flujos de carga, estudios de cortocircuitos simétricos y asimétricos, estabilidad dinámica para estudios de sistemas de potencia, desarrollados a principios de la década de los años setenta.

En los flujos de cargas se modeló detalladamente la red, pero para su extensión hacia los estudios de estabilidad fue necesario incluir además una modelación estacionaria, transitoria y subtransitoria de los generadores. Posteriormente se incluyeron algoritmos para el análisis del despacho técnico y económico térmico e hidráulico, siendo posible la optimización de los recursos, importante en épocas de crisis energética.

Actualmente las grandes compañías recurren lógicamente al software especializado de alto costo, desarrollado para estos propósitos, como el DIGSILENT entre otros, pero el valor académico de los programas básicos es innegable pues no solamente facilita al estudiante el enfrentarse en un futuro al software especializado, sino que lo obliga a un entendimiento de los algoritmos fundamentales y a efectuar una evaluación crítica de los resultados de las simulaciones. Estos programas básicos de carácter universal, son utilizados exitosamente en los cursos de Sistemas de Potencia de la UPB.

Otro programa que sirve de apoyo en el pregrado es el clásico ATP-draw (Alternating Transient Program), que es el programa para simulación digital de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica más ampliamente utilizado en todo el mundo. Este programa es la versión moderna del clásico y conocido EMTP (Electro Magnetic Transient Program). Con esta herramienta digital, se pueden simular redes topológicamente complejas y con todo el detalle de implementación, a partir de elementos eléctricos R, L, C lineales y no lineales, fuentes analíticas (paso, rampa, senoidal, exponencial, impulsiva, etc), líneas de transmisión y cables, máquinas eléctricas rotativas, interruptores sencillos o controlados, válvulas electrónicas como diodos y tiristores, entre otros; además de la opción de que el usuario puede crear su propio componente o elemento de control, apoyándose en las herramientas adicionales del programa como lo son el módulo de TACS que permite el análisis sistemas de control en el dominio del tiempo, y el lenguaje de programación MODELS, soportado con una gran cantidad de herramientas para el estudio y representación de sistemas variantes en el tiempo.

Las principales aplicaciones del ATP son:

- Estudio de sobre tensiones atmosféricas y ondas viajeras.
- Transitorios de maniobra, fallas y energización de condensadores, reactores y transformadores
- Estudios estadísticos o sistemáticos de sobrevoltajes.
- Transitorios de alta velocidad en sistemas, para evaluar el apantallamiento y la puesta a tierra.
- Modelamiento de máquinas eléctricas, sus transitorios electromecánicos como oscilaciones torsionales, y arranque de motores.
- Ferro-resonancia
- Electrónica de potencia.
- Modelamiento de dispositivos FACTS (Sistema flexibles de Transmisión en corriente alterna FACTS)
- Pruebas a dispositivos de protección.
- Análisis de armónicos y de resonancia en redes.

Por su flexibilidad y aplicabilidad, este programa es utilizado intensivamente en las materias de alta tensión y sistemas de potencia como soporte a la teoría de líneas de transmisión, y como alternativa por excelencia para estudiar el efecto de fenómenos como las descargas atmosféricas en los sistemas eléctricos. En la Especialización y Maestría con énfasis en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la UPB, una asignatura completa es dedicada al estudio y aplicaciones del programa ATP.

Recientemente la UPB adquirió, mediante convenio con la empresa SIEMENS, una licencia del paquete de programas PSCAD (Power System Computer Aided Design - Diseño Asistido con Computadora de Sistemas de Potencia). El PSCAD es una poderosa y flexible interfaz gráfica para el software EMTDC (Electromagnetic Transient Program + DC), una de las soluciones de ingeniería mundialmente reconocida para la simulación y diseño de sistemas eléctricos, tanto en AC como en DC. Puede decirse que es un EMTP con características especiales que lo hacen capaz de simular redes de alto voltaje y otros equipos (FACTS) en corriente directa.

El EMTDC surgió en 1975 para poder modelar el sistema de potencia a alto voltaje en corriente directa (HVDC) del complejo hidroeléctrico del río Nelson en Manitoba, Canadá, porque las herramientas existentes en ese entonces eran insuficientes, al no ser especializadas para estudios en corriente directa.

La actual versión del PSCAD de la que dispone la UPB (versión 4), reúne entonces toda la capacidad del ATP, más la especialización en sistemas de corriente directa del EMTDC. La interfaz gráfica de este software es mucho más amigable que la del ATP, y se presta menos para errores en la creación gráfica del circuito; se dispone de una mayor cantidad de módulos auxiliares de control, entre los que llama la atención aquellos que permiten al usuario modificar parámetros del circuito mientras la simulación está en curso; nuevos dispositivos especialmente basados en electrónica de potencia han sido adicionados, se ofrecen diversos formatos de presentación gráfica de resultados y probablemente lo más importante son los ejemplos incluidos, el sistema de ayuda y el de detección de errores que son tan completos y útiles, que permiten una familiarización rápida con el programa.

Uno de los aspectos detectados que habían dificultado la incorporación de programas de computador tipo EMTP como apoyo pedagógico a los temas teóricos, eran las tediosas y complejas interfaces para el usuario, perdiéndose el enfoque del tema que se deseaba explorar. En las nuevas versiones del ATP, y sobretodo en el PSCAD sobresale la perfección y la facilidad de operar su interfaz gráfica amigable y útil, que permite finalmente al usuario concentrarse en los aspectos relevantes de la simulación.

A pesar de ser una adquisición relativamente reciente, la experiencia obtenida gracias a la utilización del programa en la Facultad IE de la UPB, ha mostrado que este posee un gran potencial académico y pedagógico al facilitar a los estudiantes el estudio de temas en los que históricamente ha habido dificultades de asimilación del conocimiento. Ejemplos de estos temas, son la respuesta transitoria de los

sistemas de potencia, las teorías de control y estabilidad, y puntualmente los concernientes al funcionamiento de los dispositivos generados por las nuevas tecnologías como los rectificadores e inversores, cuya complejidad los hace inclusive de difícil asimilación para los investigadores del grupo.

Se propone entonces que estos nuevos programas disponibles sean aprovechados para la explicación de temas tan complejos, sin dejar nunca de lado la importante clase magistral sobre los fundamentos, cuya efectividad ha sido demostrada a lo largo de los años. Es importante resaltar la notable eficiencia con que se ha transmitido el conocimiento científico de la mano de los modelos clásicos de enseñanza, los cuales lógicamente se ven enriquecidos con ayudas pedagógicas, como la experimentación virtual mediante computador, creando un interesante círculo virtuoso entre teoría y práctica.

El concepto de Laboratorio Virtual surge entonces, entendido como el sustitutivo computacional del equipamiento y entramado físico real, pero con capacidad de producir respuestas coherentes con el fenómeno real, las cuales se convierten en el fundamento de investigaciones, experimentos y trabajos de carácter científico o técnico. La simulación en efecto produce un espacio virtual, que ofrece las mismas virtudes paramétricas de un laboratorio real, siendo imposible disponer de este último por motivos técnicos o económicos.

Si bien siempre es deseable tener en ocasiones laboratorios reales, y de hecho esto es una de las principales fortalezas de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la UPB, para cierto tipo de investigaciones y estudios la simulación es la única alternativa viable para propiciar el aprendizaje o el estudio del comportamiento de un sistema dado. La naturaleza misma de las redes de potencia eléctrica y de sus grandes y costosos elementos constitutivos, la gran magnitud de las variables físicas involucradas, y las enormes distancias que cubren, hizo en principio que la predicción de su comportamiento se obtuviera mediante lo que podría llamarse simulaciones numéricas, en principio sin apoyo del computador, basadas en la teoría electromagnética, y en experimentación a escala. A partir de estas experiencias iniciales, pudo llegarse posteriormente a la sistematización de los procedimientos de diseño y análisis, y se hizo así posible su programación, de manera que los nuevos casos de estudio son resueltos por computadores a alta velocidad, sin que podamos perder de vista que todo se sustenta en los esfuerzos de los primeros investigadores.

Todo programa digital de simulación se puede entender entonces como un Laboratorio Virtual, en el cual la realidad intenta ser emulada, de una manera tan aproximada como lo permita la capacidad del software, la pertinencia de los modelos utilizados y la habilidad de usuario para ingresar la información requerida para la ejecución del algoritmo solución.

La fiabilidad de este Laboratorio Virtual en la Ingeniería Eléctrica es enorme, miles de millones de usuarios de electricidad en el mundo ven instantáneamente atendida su demanda de energía gracias a que su realidad actual está siendo emulada por computadores que controlan los sistemas de potencia con criterios técnicos, de seguridad, y de optimización económica.

No se quiere dejar de mencionar la muy grata experiencia que se ha tenido, desafortunadamente con versiones demostrativas, con los programas especializados para la educación desarrollados por la compañía Crocodile Clips, la cual ofrece programas para otras áreas de ingeniería como química y física. El “cocodrilo”, así llamado cariñosamente por los estudiantes es el programa favorito para la simulación de circuitos básicos en la Facultad de Ingeniería de la UPB. El programa es tan ilustrativo y tan fácil de manejar que algunos niños lo prefieren en ocasiones a sus juegos de video típicos, mientras aprenden prematuramente las leyes básicas de la Ingeniería Eléctrica.

2. Laboratorio Virtual de Calidad de la Potencia Eléctrica

El Laboratorio Virtual que se presenta para la ilustración de estos conceptos corresponde a un experimento desarrollado en la UPB para el estudio de la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE), la cual tiene raíces en la denominada Compatibilidad Electromagnética (CEM). Esta, establece las condiciones para que un equipo o sistema pueda funcionar de manera satisfactoria dentro de su ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables a ningún otro elemento en ese ambiente. La CEM profundiza hasta llegar al ser humano como fin último del sistema de potencia, el cual estando en inherente intercambio energético con el sistema, es el que finalmente establece los criterios de calidad.

Dentro de de la CEM, la CPE puede definirse como lo hace el instituto EPRI (*Electric Power Research Institute*) de los Estados Unidos: “CPE es cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario”. Esta definición puede complementarse con lo que dice la recomendación IEEE 519 de 1995: “El término CPE se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctrica, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia”; en esta recomendación se señala el carácter fenomenológico de las características de la potencia. El estudio de estos fenómenos se hace desde la teoría electromagnética, siendo de particular importancia el análisis de los circuitos eléctricos, y en consecuencia la disciplina de estudio de los Sistemas de Potencia, concebido como la aplicación práctica a redes eléctricas de los principios fundamentales electromagnéticos y circuitales.

Para facilitar la comprensión y estudio de los fenómenos que afectan la CPE, sus causas y los efectos sobre un usuario, se creó un ambiente de simulación en el cual se reproduce una red típica del sistema colombiano, en la que se dispone de elementos que causan distintos fenómenos que afectan la CPE, y de los algoritmos para evaluar la Calidad de la onda de voltaje, fundamento para la evaluación de la CPE

El caso esta diseñado de manera que tenga un valor pedagógico, para que el usuario, ya sea un estudiante de pregrado o de posgrado, pueda familiarizarse fácilmente con los diferentes elementos que causan perturbaciones en las redes eléctricas, el tipo de fenómeno ocasionado, y la medida de su severidad e impacto sobre el usuario. Se podrán fácilmente realizar modificaciones topológicas y de los parámetros de los elementos, de manera que puedan hacerse estudios de sensibilidad. Este tipo de simulación que facilita el aprendizaje, es de hecho utilizada por los diseñadores del PSCAD mismo, pues los ejemplos que presenta el programa siguen esta filosofía.

Además utilizando los distintos módulos desarrollados para el caso de estudio, se facilita la implementación para analizar un caso real en particular.

El objetivo del laboratorio es poder experimentar de manera didáctica, el impacto que en el usuario tienen distintos fenómenos de CPE asociados con la variabilidad (fluctuaciones) y la no linealidad (distorsión armónica) de los sistemas eléctricos; para esto se han implementado las causas más relevantes de perturbaciones, como fallas por cortocircuitos, arranque de motores de gran tamaño, cargas no lineales, etc; y los modelos de medición y análisis de indicadores de CPE que ha propuesto la regulación Colombiana para una evaluación integral de la CPE. Esta herramienta ha sido de mucha utilidad al grupo de investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, el cual ha trabajado apoyando a la Comisión de Regulación de Energía y Gas, en lo referente a la definición de indicadores adecuados para evaluar la CPE, y académicamente ha servido de apoyo a la enseñanza en cursos de posgrados y pregrado de Ingeniería Eléctrica de la UPB. También ha servido para evaluar el comportamiento de los dispositivos que involucran nuevas tecnologías para el mejoramiento de la CPE (dispositivos Custom Power).

La Figura 1 presenta una vista general del ambiente de simulación que se ha denominado Laboratorio virtual de la CPE:

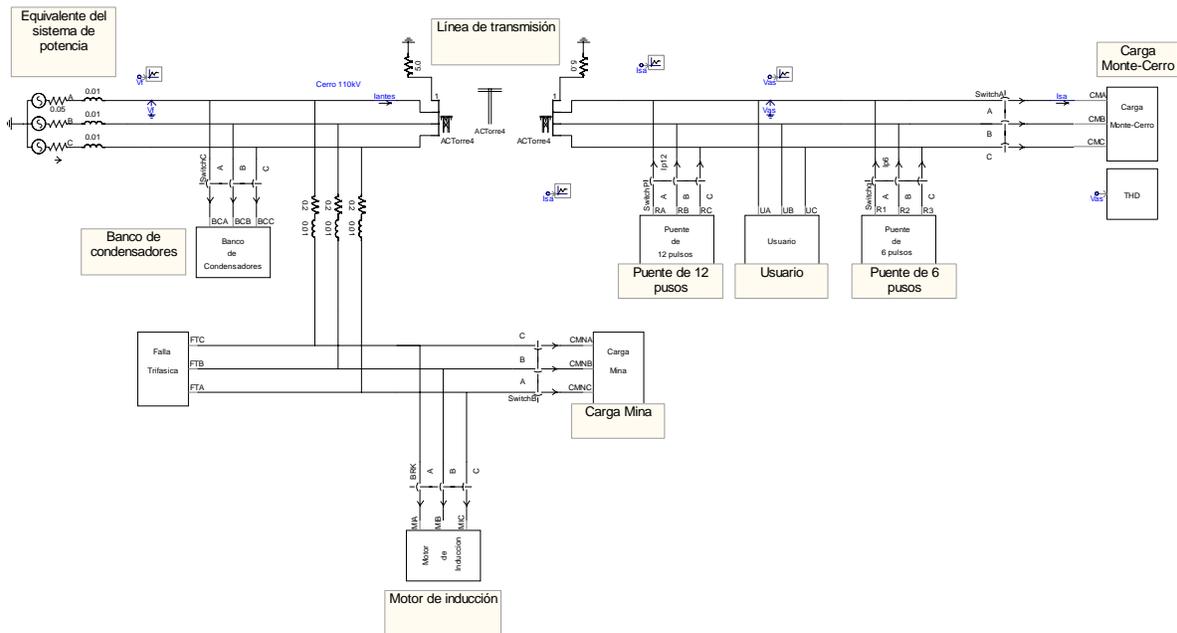


Figura 1. Red de prueba

En esta figura aparece un sistema eléctrico típico que comprende dos etapas de transmisión-distribución. La fuente de alimentación corresponde a un modelo simple mediante un equivalente de Thevenin del Sistema de Potencia en el punto de conexión. El concepto de rigidez de una fuente como ésta, puede ser verificado fácilmente si se evalúa la capacidad que tiene de asimilar perturbaciones, manteniendo un voltaje que cumpla con los requerimientos de calidad definidos por los estándares internacionales. Esta rigidez de la fuente está dada por su impedancia asociada: Así una fuente será más rígida mientras menor sea su impedancia asociada, y más débil, mientras mayor sea su impedancia. Esta impedancia es la misma impedancia del Thevenin, conectada en serie a la fuente ideal de voltaje. El valor de esta impedancia define también el nivel de cortocircuito en el punto de análisis, cuyo valor puede verificarse al suponer un corto circuito en el modelo.

Las desviaciones del régimen ideal son producidos en general por elementos de dos naturalezas, como ya se mencionó: Elementos que producen demanda y parámetros eléctricos variables y elementos no lineales generadores de armónicos.

2.1 Problemas asociados con la variabilidad

Los problemas asociados con la variabilidad de los sistemas eléctricos podemos sintetizarlos como:

- 1) Problemas de desviación de la magnitud o nivel de la tensión en estado estable, conocido también como regulación de voltaje.
- 2) Fluctuaciones y variaciones de corta duración producidas por cargas de demanda variable como motores o soldadores de arco, o fallas como las causadas por descargas atmosféricas.
- 3) Fenómenos transitorios de muy corta duración y de naturaleza generalmente impulsiva y oscilatoria. Generalmente son causados por maniobras de conexión de elementos o por descargas atmosféricas.

Estos elementos fueron incorporados a la simulación, en tal forma que puede aparecer arbitrariamente en la red, siendo posible evaluar su efecto conforme son modificados sus parámetros. Como ejemplo del resultado obtenido se presenta la Figura 2, en la cual se grafica el efecto en el voltaje de alimentación de un usuario de la red sometida a varios de estos fenómenos.

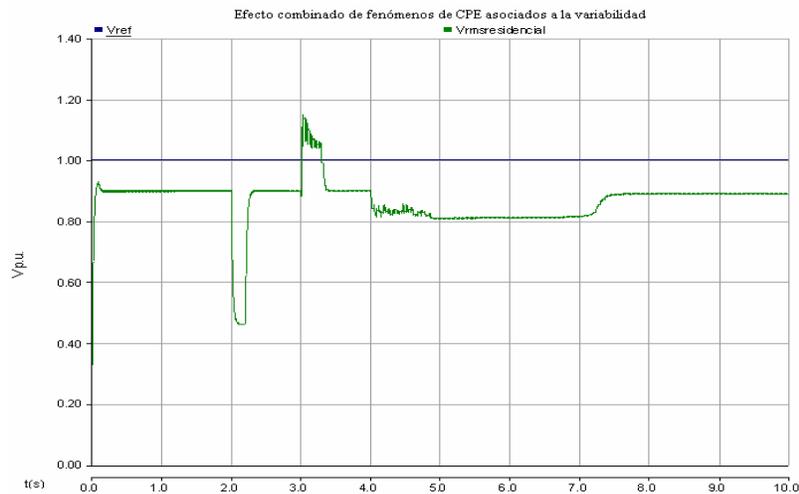


Figura 2. Diferentes eventos relacionados con la variabilidad del voltaje

La Figura 2 presenta el comportamiento del valor eficaz del voltaje, medido en por unidad, del usuario. La línea que mantiene un valor constante de la unidad es el valor ideal esperado por el usuario, mientras que la otra curva variable es el valor medido. La desviación que se presenta en estado estable corresponde a la regulación de voltaje debida a la presencia de cargas constantes. En $t = 2s$ se aplica una falla en un ramal cercano al usuario, cuyo efecto puede apreciarse, hasta que es despejada, después de 200ms. Luego es conectado un banco de capacitares en $t = 3s$, que además del impulso transitorio que produce (es más conveniente apreciarlo de un oscilograma de la forma de onda), causa una elevación estable del nivel de tensión, hasta su desconexión. Finalmente se puede apreciar el efecto del arranque a pleno voltaje de un motor de gran tamaño en la vecindad de la red.

Con este tipo de resultados es posible evaluar fácilmente la Compatibilidad Electromagnética entre los equipos y la red, para diagnóstico y solución de fallas potenciales. El algoritmo propuesto por la IEC basado en la respuesta del sistema lámpara-ojo-cerebro es ideal para evaluar la severidad de las fluctuaciones de voltaje.

2.2 Problemas asociados a la no linealidad

Los elementos no lineales son los responsables de la deformación de la onda de voltaje compuesta por la supersposición de senoidales de diferente frecuencia. El mecanismo es simple: La corriente no senoidal que demanda el elemento no lineal, produce caídas de tensión no senoidales en la impedancia de fuente, y por tanto el problema se transmite a otros usuarios o equipos, los cuales aprecian una distorsión de su onda de voltaje de alimentación. Cuando la señal distorsionada es periódica, su análisis puede hacerse a partir de su descomposición armónica, de aquí que la palabra armónico haga parte de la jerga diaria de los estudiosos de la CPE. Mientras más distorsionada es una señal, mayores son sus componentes armónicas, en comparación con la señal fundamental, por esto el indicador por excelencia para evaluar la forma de la onda de voltaje en el THD (distorsión armónica total) que se calcula porcentualmente como la relación entre el valor eficaz de las componentes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental. Los efectos de la distorsión del voltaje (o presencia de armónicos) van desde el funcionamiento ineficiente y

sobre calentamiento de conductores y máquinas eléctricas, hasta consecuencias destructivas cuando se presentan fenómenos de resonancia, generalmente involucrando bancos de condensadores.

Para la simulación de estos fenómenos, el PSCAD permite la modelación de las curvas no lineales de histéresis de los elementos que funcionan por acción de campos magnéticos variables, como máquinas rotativas y transformadores. El efecto de esta no linealidad magnética, produce sobretodo la presencia del familiar tercer armónico y en menor grado de otros de mayor orden. El otro gran generador de distorsión armónica son los equipos electrónicos, los cuales no pueden faltar hoy día para el control de los equipos eléctricos, y del universo de aplicaciones que tienen en la actualidad. Por esto en el caso de simulación fueron añadidos dos módulos correspondientes a cargas en corriente directa controladas con puentes rectificadores de 6 y 12 pulsos. Estos generan armónicos de orden $np \pm 1$ donde n es un número entero y p es el número de pulsos del rectificador. La magnitud del armónico disminuye de manera importante conforme aumenta su orden, por lo tanto las componentes armónicas de mayor importancia generadas por un puente rectificador de 6 pulsos, son el quinto y el séptimo.

La Figura 3 presenta el comportamiento del indicador THD en el tiempo.

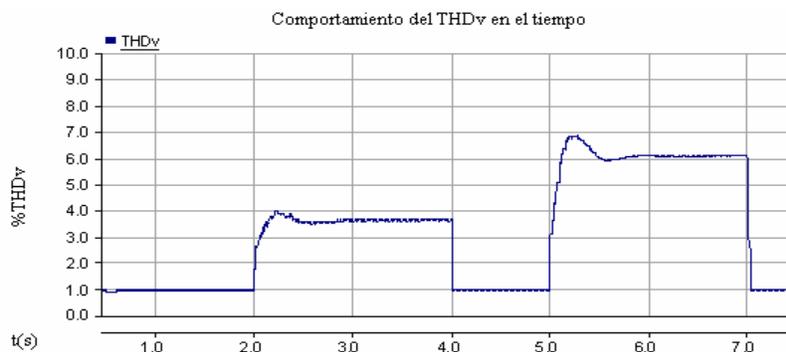


Figura 3. Comportamiento del THD en el tiempo

En la Figura 3, la distorsión inicial (THD=1) corresponde a la producida en la red únicamente por efectos de histéresis magnética, siendo preponderante el tercer armónico. A los dos segundos de la simulación es conectado un puente rectificador de 6 pulsos, el cual ocasiona una distorsión armónica que apenas cumple con el límite recomendado por el estándar IEEE 519 de 1992 para este nivel de voltaje (THD=5%), este nivel permanece constante hasta la desconexión del mismo a los 4 segundos de la simulación. En $t = 5$ s es conectado el puente rectificador de 12 pulsos, alimentando el doble de la potencia del primer caso. Al evaluar las componentes armónicas en cada caso, se comprueban las reglas teóricas formuladas inicialmente, sobre la composición espectral de las mismas. Para ilustrar el fenómeno de la distorsión armónica se presentan dos gráficas en la Figura 4, la primera, cercana a la referencia ideal (THD =1%) y la segunda con una severa distorsión (THD=11%).

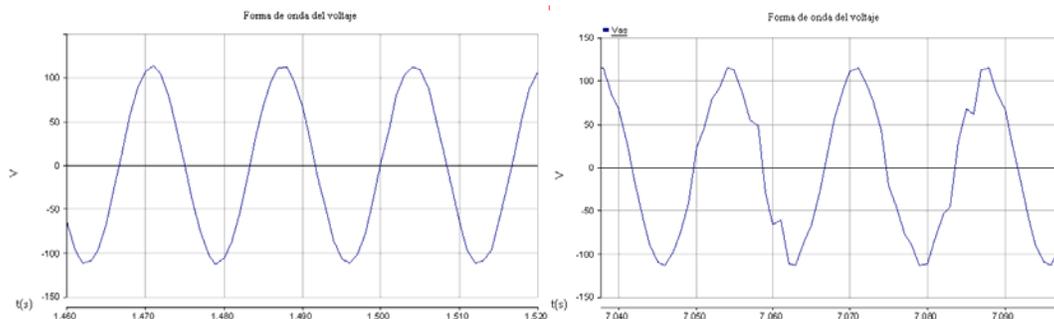


Figura 4. Onda con baja distorsión armónica y onda con inaceptable distorsión armónica

3. Conclusiones

La importancia de los programas de computador para el diseño y análisis de sistemas eléctricos mediante simulaciones, es tal, que hoy en día son imprescindible complemento de la Ingeniería aplicada y de la moderna pedagogía de la Ingeniería. En efecto se hace necesario no solo la inclusión de asignaturas para el estudio de simulaciones modernas en los programas tanto de pregrado como de posgrado relacionados con la Ingeniería Eléctrica, sino también, que sean considerados para el apoyo de asignaturas clásicas de la carrera entre las que se pueden mencionar los circuitos eléctricos, las máquinas y los Sistemas de Potencia. El avanzado estado del arte de estos programas es favorable a estos propósitos, porque a la gran capacidad de procesamiento de los computadores actuales, hay que sumarle la preocupación de los diseñadores de software de hacer cada vez más amigables las interfaces a fin de que los usuarios interactúen muy natural y fácilmente con la máquina.

Se presentó el ejemplo del Laboratorio Virtual de la CPE desarrollado bajo el software PSCAD en la UPB que ilustra cómo un tema de difícil comprensión y que atañe a profesionales de diversa índole, puede ser presentado y tratado de una manera pedagógica e incluso interactiva, permitiendo al interesado utilizar fácilmente módulos diseñados con antelación para enfocarse exclusivamente en los aspectos de su interés.

Referencias

- [1] BOLLEN, Math H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and interruptions. New York: IEEE Press, 2.000. 200 p.
- [2] CREG. Comisión De Regulación De Energía y Gas. Bogotá: CREG, 1.998. 30 p. (Resolución 070 / 98).
- [3] IEC. International Electro-technical Commission - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication: IEC, 1996. 45 p. (IEC/TR3 61000-3-6 (1996-10)).
- [4] IEEE. Institute of Electric and Electronic Engineers - Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, New York: IEEE, 1.996. 101 p. (IEEE Standard 519 – 1.996 Draft 5).

Informacion Biográfica

IE, MSc, Dr. Eugenio B. ESCOBAR. Profesor Universitario en UPB y en Universidades nacionales y extranjeras, con una vasta experiencia docente por más de 30 años en áreas teóricas, fundamentales y aplicadas de la Ingeniería Eléctrica, especialmente en análisis, planeación, operación y síntesis de Sistema de Potencia. Ex Decano de la Escuela de Ingeniería de la UPB. También se ha desempeñado como consultor de Estudios de Sistemas Interconectados, en aplicaciones de Planeación, Operación, conexión de centrales y Diseño de Sistemas Eléctricos de tipo nacional, regional o industriales. Recientemente fue distinguido con el Doctorado Honoris Causa en Ingeniería por la UPB.

IE. Jairo A. LOPERA se desempeña como profesor titular y decano actual de la Escuela de Ingeniería de la UPB. Ingeniero Electricista, Especialista en Transmisión y Distribución de Energía y Especialista en gerencia de la misma universidad.

IE. Andrés E. DÍEZ es profesor de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la UPB. Es ingeniero Electricista de la misma universidad. Actualmente es estudiante de la Maestría en Ingeniería con énfasis en T&D de la UPB.

IE. Gabriel J. LÓPEZ es profesor de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la UPB. Es ingeniero electricista de la misma universidad. Actualmente es estudiante de la Especialización en T&D de la UPB.

IE Msc Armando BOHÓRQUEZ es profesor titular de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la UPB. Ingeniero Electricista, Magíster en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la misma universidad.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the papers in the conference proceedings on CD and on the web. Neither LACCEI nor the editors will be responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.