

Desafíos en la Implementación de un Laboratorio de Simulación Digital en Tiempo Real de Sistemas Eléctricos de Potencia

G. Argüello¹ J. Cepeda¹ D. Echeverría¹ S. Falcones² J. Layana²

¹Operador Nacional de Electricidad, CENACE

E-mail: garguello@cenace.org.ec; jcepeda@cenace.org.ec; decheverria@cenace.org.ec

²Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL

E-mail: sixifo@espol.edu.ec; jlayana@espol.edu.ec

Resumen

La simulación en tiempo real de sistemas eléctricos de potencia es una herramienta tecnológica que permite simular el comportamiento de las variables eléctricas y obtener resultados en el mismo período de tiempo en el que evolucionaría el fenómeno eléctrico que ocurre en el sistema de potencia real. Esto permite realizar estudios especializados que involucren la puesta en sincronismo de las simulaciones digitales con elementos reales del sistema. El presente artículo presenta una descripción conceptual de la simulación en tiempo real y describe las principales características del proyecto de implementación de un laboratorio de simulación en tiempo real que llevan a cabo CENACE y ESPOL, incluyendo algunos de los desafíos esperados en su operación futura.

Palabras clave— Simulación Digital en Tiempo Real, Sistemas Eléctricos de Potencia, Red de Transmisión Inteligente, WAMS, SCADA/EMS.

Abstract

Real-time simulation of power systems is a technological tool that allows simulating the behavior of electrical variables and getting results in the same timeframe within which the actual electric phenomenon evolves. This allows the development of specialized studies involving the synchronism of the digital simulations with real elements of the system. This paper presents a conceptual description of the real-time simulation and describes the main features concerning the implementation of a real-time simulation laboratory, which is currently carried out by CENACE and ESPOL, including some of the challenges expected in its future operation.

Index terms— Real-Time Digital Simulation, Electric Power System, Smart Transmission Grid, WAMS, SCADA/EMS.

Recibido: 21-10-2015, Aprobado tras revisión: 24-12-2015.

Forma sugerida de citación: Argüello, G.; Cepeda, J.; Echeverría, D.; Falcones, S. y Layana, J. (2016). "Desafíos en la Implementación de un Laboratorio de Simulación Digital en Tiempo Real de Sistemas Eléctricos de Potencia". Revista Técnica "energía". N° 12, Pp. 239-250.

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia (SEPs) actualmente enfrentan varios desafíos técnicos asociados a nuevos retos tanto de diseño y planeamiento como operativos. Dentro de las variables que más inciden en estos desafíos se encuentran las fluctuaciones de generación de centrales convencionales o la distribución variante de flujos de potencia en la red de transmisión, debido por ejemplo, a modificaciones topológicas importantes, consecuencia de la interconexión con sistemas regionales o la diversificación de fuentes primarias de energía, motivada por el desarrollo acelerado de tecnologías de generación renovable y la promoción de políticas medioambientales. En este sentido, las tareas de planeamiento y operación de un SEP deben realizarse cada vez mayor precisión, para lo cual es indispensable el uso de tecnología altamente sofisticada que permita realizar los estudios eléctricos pertinentes que viabilicen los procesos asociados a la administración técnica de los SEPs. Estos estudios están asociados tanto al monitoreo del estado operativo actual del SEP (SCADA/EMS para operación en tiempo real) como a la simulación de eventos que podrían ocurrir en el SEP e influir en la seguridad y la confiabilidad del sistema (Software de simulación de Sistemas de Potencia para diseño, planeamiento o análisis post-operativo). Bajo esta perspectiva, la toma de decisiones, ya sea en la etapa de planeamiento o durante la operación en tiempo real del sistema de potencia, depende directamente de las predicciones del comportamiento del sistema, que se obtienen a partir de simulaciones realizadas en computadora [1]. A este respecto, un modelo matemático adecuado del sistema, en conjunto con un software de simulación robusto, asegurarán simulaciones suficientemente precisas, y por lo tanto, una toma de decisiones adecuada en relación con acciones operativas o de planeamiento [2]. En este sentido, diferentes simuladores han sido ampliamente utilizados en el planeamiento y la operación de los sistemas eléctricos durante décadas, siendo usados para una gran cantidad de aplicaciones [3], relacionadas tanto con simulaciones estáticas como con simulaciones dinámicas, ya sean RMS (simulaciones fasoriales para transitorios electromecánicos) o EMT (simulaciones en valores instantáneos para transitorios electromagnéticos). Estos simuladores pueden operar tanto fuera de línea como en tiempo real [3], [4], dependiendo de las características funcionales con las que hayan sido diseñados. Los simuladores fuera de línea han sido empleados en la mayoría de análisis eléctricos, existiendo en la actualidad

varios programas que han adquirido prestigio internacional por sus capacidades de análisis y robustez de convergencia. Así por ejemplo, entre los programas de mayor aceptación técnica que permiten realizar simulaciones RMS se pueden mencionar a PowerWorld, NEPLAN, o PSS/E. Por otro lado, un software ampliamente utilizado para realizar simulaciones EMT es el ATP, en tanto que también existen programas que permiten realizar los dos tipos de simulaciones con una base de datos común como PowerFactory de DIgSILENT o ETAP. Sin embargo, la limitación de estos programas es que no permiten realizar simulaciones que corran en sincronismo con el desarrollo del fenómeno eléctrico que se esté analizando [3], característica que es fundamental para aplicaciones especializadas tales como la ejecución de pruebas en equipos (simulación tipo hardware-in-the-loop HIL). Por este motivo, desde hace apenas un par de décadas, simuladores en tiempo real han sido desarrollados y puestos a disposición tanto de la industria como de la academia relacionada con el análisis de SEP. Dentro de este tipo de simuladores, los dos de mayor prestigio actualmente son los desarrollados por RTDS y OPAL-RT, los cuales permiten realizar simulaciones tanto RMS como EMT.

Sobre la base de lo anteriormente mencionado, y considerando que actualmente en Ecuador es indispensable llevar a cabo una adecuada simulación del Sistema Nacional Interconectado (SNI), que permita analizar los efectos producidos por cambios en la demanda, cambios e incremento de la generación, introducción de nuevas tecnologías, cambio climático, entre otros, tanto a nivel académico como en la industria involucrada en el sector, la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, en conjunto con el Operador Nacional de Electricidad CENACE han determinado la necesidad de implementar un Laboratorio de Simulación Digital en Tiempo Real de Sistemas Eléctricos de Potencia, cuyo componente fundamental sea un Simulador Digital en Tiempo Real.

El presente artículo presenta, en primer lugar, una conceptualización sobre la tecnología de simulación en tiempo real. Posteriormente, se presenta el Proyecto de Implementación del Laboratorio de Simulación en Tiempo Real de Sistemas Eléctricos de Potencia que llevan a cabo CENACE y ESPOL. Finalmente, se describen los desafíos que enfrentará el laboratorio, tendientes a coadyuvar el desarrollo de una red de transmisión inteligente en Ecuador, luego de lo cual se muestran las conclusiones de este trabajo.

2. SIMULACIÓN DIGITAL EN TIEMPO REAL

Una simulación es una representación de la operación, funcionamiento o características de un sistema a través del uso o ejecución de otro sistema [3]. La simulación del funcionamiento de un SEP se lleva a cabo con sistemas computacionales que resuelven un conjunto de ecuaciones algebraico-diferenciales (DAE), como las mostradas en [1]. Para este propósito, los diversos componentes físicos del sistema se modelan adecuadamente con el fin de representar con precisión el rendimiento del sistema de potencia y posteriormente las DAE son resueltas a través de un software de simulación digital.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t), & \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t), & \mathbf{y}(t_0) &= \mathbf{y}_0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde \mathbf{f} es el conjunto de ecuaciones diferenciales, \mathbf{g} es el conjunto de ecuaciones algebraicas, \mathbf{x} es el vector de variables de estado y \mathbf{y} es el vector de variables algebraicas.

Como se mencionó anteriormente, los tipos de simulación digital pueden ser fuera de línea y en tiempo real y usan generalmente una simulación con tiempo discreto y duración de paso constante. Durante la simulación de tiempo discreto, el tiempo avanza en pasos de igual duración. Esto se conoce comúnmente como simulación de paso de tiempo fijo. Es importante tener en cuenta que existen otras técnicas de resolución que utilizan pasos de tiempo variables. Tales técnicas se utilizan para resolver dinámica de alta frecuencia y sistemas no lineales, pero no son adecuados para la simulación en tiempo real [3].

Para resolver las DAE en un paso de tiempo dado, cada variable (o sistema) de estado se resuelve sucesivamente como una función de las variables y los estados en el final del tiempo de paso precedente [3], mediante la aplicación de diferentes tipos de métodos numéricos. Durante una simulación de tiempo discreto, la cantidad de tiempo real requerido para resolver todas las DAE que representan un sistema en un tiempo de paso dado (tiempo de ejecución T_e) puede obedecer a dos situaciones: i) ser menor o igual que la duración del paso de tiempo seleccionado (correspondiente a la duración del fenómeno eléctrico real – Real-time clock Rtc); y, ii) ser mayor que la duración del paso de tiempo (Rtc) [4]. En la primera situación

la simulación se considera en tiempo real (si T_e es menor que Rtc, la diferencia $Rtc - T_e$ constituirá el tiempo de espera *Idle Time*). La segunda situación, en cambio, se refiere a simulación fuera de línea (en este caso la diferencia $T_e - Rtc$ constituirá el tiempo de atraso *Overrun*) [4]. En la simulación en tiempo real es posible lograr el sincronismo entre la simulación y el evento eléctrico real [3]. La Fig. 1 ilustra la diferencia existente entre la simulación fuera de línea y la simulación en tiempo real.

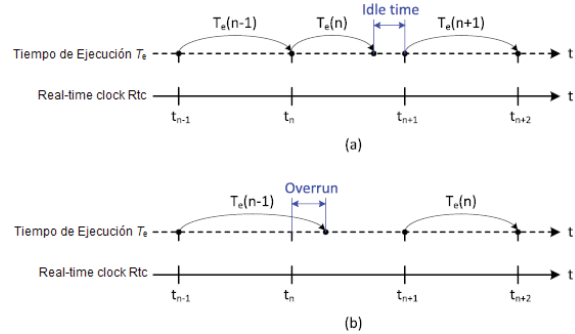


Figura 1: a) Simulación en Tiempo Real, b) Simulación Fuera de Línea [4]

Sobre la base de lo antes mencionado, para que una simulación en tiempo real sea válida, el simulador en tiempo real utilizado debe ser capaz de producir con precisión las variables internas y los resultados de la simulación en el mismo período de tiempo en el que evolucionaría su contraparte física, la cual corresponde al desarrollo del fenómeno eléctrico que ocurre en el sistema de potencia real [3], [4]. Esta característica permite que el simulador en tiempo real pueda llevar a cabo todas las operaciones necesarias para ejecutar una simulación especializada del sistema de potencia, incluido el manejo de entradas y salidas (I/O) que permitan incorporar dispositivos externos a la simulación (HIL) [3].

En general, la simulación digital en tiempo real de sistemas eléctricos de potencia permite simular la respuesta dinámica (transitoria) del sistema a través de la solución en el dominio del tiempo de las DAE mediante computación digital (utilizando por ejemplo un enfoque de tipo transitorio electromagnético). En esta simulación, los SEP son representados mediante los modelos matemáticos de los componentes disponibles en la librería del software correspondiente, usando por lo general una interfaz gráfica, y son simulados en una plataforma especializada de hardware basada en procesadores en paralelo (High Performance Computing HPC) [3], [4], [5].

2.1. Categorías de Simulación en Tiempo Real

La simulación digital en tiempo real puede clasificarse en dos categorías: i) simulación en tiempo real completamente digital (software-in-the-loop SIL); y, ii) simulación en tiempo real tipo hardware-in-the-loop (HIL). Una simulación en tiempo real totalmente digital requiere de la modelación de todos elementos del sistema (incluidos los sistemas de control, protección y otros accesorios y dispositivos) y no implica interfaces externas o relacionadas con entradas y salidas (I/O). Por otro lado, la simulación HIL se refiere a la condición en la que ciertos componentes modelados en la simulación en tiempo real totalmente digital han sido reemplazados con componentes físicos reales [4] (por ejemplo controladores, dispositivos de protección, o incluso elementos de potencia – power-hardware-in-the-loop PHIL). En este caso, es indispensable el diseño de interfaces apropiadas que viabilicen la interoperabilidad del simulador con los elementos externos a través de las I/O del simulador.

2.2. Simuladores Digitales en Tiempo Real

Los simuladores digitales en tiempo real hacen uso de las tecnologías de computación modernas tipo HPC a través de varios procesadores en paralelo. Este hardware, en conjunto con técnicas sofisticadas de análisis numérico, permiten un proceso de solución de las DAE cuyo tiempo de ejecución es menor o igual que la duración del paso de tiempo correspondiente a la duración del fenómeno eléctrico real [4].

El primer simulador digital en tiempo real comercial fue el RTDS (Real-Time Digital Simulator), desarrollado por RTDS Technologies Inc. en 1991 y basado en la tecnología de procesador de señal digital (digital signal processor DSP) [5]. Este simulador fue inicialmente conectado a un controlador de un convertidor de corriente continua en alto voltaje (HVDC) y fue construido con una combinación de partes digitales y analógicas. Desde entonces, este simulador ha evolucionado y hoy en día es uno de los simuladores comerciales más usados a nivel mundial [4]. La Fig. 2 muestra la estructura de hardware de los simuladores RTDS [5].

En la literatura es posible encontrar otras propuestas de simuladores digitales en tiempo real, con diferentes características y aplicaciones ya sean de pequeña o gran escala. Así por ejemplo, el Digital Transient Network Analyzer (DTNA)

que se presenta en [6] es capaz de simular al mismo tiempo fenómenos electromagnéticos y electromecánicos, por otro lado ARENE, de Électricité de France, fue un simulador digital en tiempo real usado para simular fenómenos de alta frecuencia en una computadora multipropósito paralelo estándar [7], en cambio que NETOMAC de SIEMENS puede ser usado para simular grandes sistemas de potencia [8].



Figura 2: Simuladores RTDS [5]

OPAL-RT Technologies, estructurada en 1997, ha desarrollado una serie de soluciones encaminadas a brindar un servicio completo de simulación digital en tiempo real [9]. La tecnología de OPAL-RT integra herramientas de computación en paralelo y distribuida con tecnología commercial-off-the-shelf, que le ha permitido desarrollar una serie de simuladores con diferentes aplicaciones, tales como: i) análisis de transitorios electromagnéticos: eFPGAsim para simular electrónica de potencia (paso de tiempo: 100 ns – 1 ms), eMEGAsim para simular electrónica de potencia conectada en la red (paso de tiempo: 10 ms – 100 ms), HYPERsim para simular transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia de gran escala (paso de tiempo: 25 ms – 100 ms); y, ii) análisis de transitorios electromecánicos: ePHASORsim (paso de tiempo: 10 ms) [10]. La Fig. 3 presenta un resumen de las escalas de tiempo de simulación de cada uno de los simuladores de OPAL-RT, en tanto que la Fig. 4 presenta la estructura de hardware que viabiliza estas simulaciones.

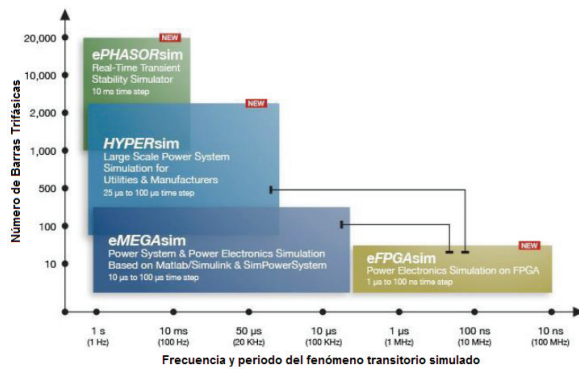


Figura 3: Escalas de tiempo de simulación - OPAL-RT [10]



Figura 4: Simulador OPAL-RT [10]

De todos los simuladores descritos en la literatura, los que han adquirido mayor prestigio comercial a nivel mundial son los productos de RTDS y OPAL-RT. Para mayor referencia, análisis adicionales del estado del arte de simuladores digitales en tiempo real pueden ser encontrados en [4] y [11].

3. PROYECTO DE LABORATORIO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL

En la actualidad, la industria eléctrica ecuatoriana se encuentra afrontando muchos desafíos, entre los que se encuentra un fuerte crecimiento de demanda de energía. Asimismo, las empresas del sector eléctrico requieren procesos operativos más eficientes para gestionar sus activos. Por otra parte, la búsqueda de soluciones para mitigar las dificultades ambientales que sufre nuestro planeta es un tema de debate que realiza la comunidad mundial incluyendo al sector energético.

Bajo este contexto, es indispensable que la industria y la academia estructuren procesos tendientes a llevar a cabo sofisticadas simulaciones del comportamiento de los sistemas eléctricos, y de energía en general, que permita analizar los efectos producidos por los diferentes fenómenos eléctricos que se producen en el sistema en respuesta a la aplicación de nuevos paradigmas de diseño, planificación, operación y mantenimiento del SNI.

Es necesario investigar la afectación de las energías renovables no convencionales (ERNC) en la red eléctrica, para lo cual se deben analizar temas como el impacto en la calidad del producto y del servicio, la afectación en las corrientes de cortocircuito, el impacto en la calibración de protecciones, el impacto en la seguridad del sistema, entre otros. Adicionalmente, considerando el rápido desarrollo de los sistemas eléctricos a nivel regional, la futura operación de un sistema de potencia mucho más grande y complejo es una realidad inminente. En este sistema, la ocurrencia de contingencias que provoquen transitorios electromagnéticos o electromecánicos de consecuencias moderadas o graves es mucho más probable. En este sentido, el análisis dinámico del sistema de potencia se torna cada vez más necesario con el objetivo de mejorar las tareas de planeamiento y operación en tiempo real.

Por lo indicado, la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, en conjunto con el Operador Nacional de Electricidad CENACE han planteado el ambicioso proyecto de implementar un Laboratorio de Simulación en Tiempo Real, sobre la base fundamental de instalar un simulador digital en tiempo real.

El Laboratorio debe contar con instalaciones agrupadas en una unidad técnica, académica y científica que apoye a las instituciones públicas y privadas en el análisis técnico y la investigación científica que lo requieran. Este Laboratorio debe permitir realizar lo siguiente:

- Estudiar los problemas de los sistemas eléctricos de potencia que se presentarán en el largo y mediano plazo por la incorporación de nuevos sistemas de generación de energía y el aumento de carga, lo que afectará el medio ambiente y a la calidad de servicio a los consumidores.
- Contar con un laboratorio de simulación en tiempo real que sea una herramienta de la investigación científica y apoye al

mejoramiento académico de la universidad a la vez que permita mejorar los procesos operativos de las empresas del sector eléctrico.

- Para el mediano y largo plazo, desarrollar metodologías de análisis y pruebas de equipos eléctricos que se vayan a conectar en el Sistema Nacional Interconectado.

Los propósitos específicos del Laboratorio son:

- Realizar simulaciones digitales en tiempo real de Sistemas Eléctricos de Potencia Eléctrica complejos y pruebas de equipos especializados utilizados en la cadena de generación, transmisión y distribución de energía, incluyendo cargas simétricas y asimétricas con comportamiento real.
- Evaluar la calidad de la energía y confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia actuales frente a la inclusión de nuevas fuentes de generación renovable y sistemas de almacenamiento de energía.
- Diseñar y desarrollar nuevos dispositivos de gestión del flujo de energía y la validación de los mismos en tiempo real.
- Realizar estudios y proyectos sobre la implementación, difusión y el impacto de la conexión de energía renovable.
- Estudiar la calidad y la productividad de las industrias, los sistemas de transporte con la finalidad de realizar propuestas que mejoren la competitividad del país.
- Desarrollar sistemas de monitoreo y control que permitan conocer el impacto en la operación del sistema de la aplicación de nuevas tecnologías.
- Evaluar continuamente la afectación de generación de energía eléctrica distribuida en la calidad del servicio a clientes.
- Poner a prueba la respuesta de sistemas de protección especializados y de sistemas de monitoreo de área extendida.
- Diseñar o actualizar filosofías de protección y control tanto de los elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia como del sistema en su conjunto.
- Desarrollar nuevos esquemas de control de sistemas de generación distribuida que incluya energías renovables, almacenamiento de energía y equipos de compensación de reactivos.

3.1. Descripción del Proyecto y Entregables

El Laboratorio podrá realizar simulaciones digitales en tiempo real de sistemas eléctricos y termoelectrónicos, incorporando equipos de control, protección y medición en las simulaciones que serán aplicadas a grandes sistemas de potencia, como el SNI, a sistemas con generación distribuida en niveles de medio y bajo voltaje, y a instalaciones industriales.

Los entregables del proyecto se agrupan en tres áreas de aplicación: a) la Simulación en Tiempo Real, b) la Investigación y Desarrollo, c) la Mejora de los procesos operativos de CENACE y la industria eléctrica.

En el área de Simulación en Tiempo Real se podrán desarrollar las siguientes actividades principales:

- Simulación en tiempo real de sistemas de potencia complejos.
- Fomentar la investigación en el campo de sistemas de potencia incluyendo Electrónica de Potencia, Redes Inteligentes, e Integración de generación renovable.
- Realizar estudios eléctricos en sistemas industriales, de distribución y transmisión, a fin de determinar opciones de mejoras, reducción de pérdidas, aumento de la confiabilidad del sistema.
- Determinar el impacto de la conexión de equipos basados en electrónica de potencia al sistema eléctrico.
- Simular diferentes tipos de tecnologías de plantas de generación no convencional (ERNC) (e.g. full converter, DFIG, fotovoltaicos, geotérmico, etc.), diferentes sistemas y estrategias de control (potencia activa, reactiva, voltaje, frecuencia) y diferentes dispositivos de compensación (pasiva o activa como FACTS, almacenadores), incluyendo el análisis de calidad de la energía.
- Análisis de la afectación a la seguridad estática y dinámica del sistema.
- Análisis a la afectación al sistema de protecciones de la red por la inserción de la generación de ERNC, se debe realizar un análisis de calibración de protecciones de todo el sistema, debido al posible cambio de la dirección de los flujos de potencia en las redes de medio y bajo voltaje.

- Definición de requerimientos técnicos, operativos y de calidad para el ingreso de ERNC al sistema eléctrico ecuatoriano, incluyendo la entrega de información pertinente para la supervisión y coordinación operativa. Desarrollo de la normativa respectiva.
- Análisis de calibración de protecciones, pruebas en relés. Análisis de equipos de medición (PMU, AMI, RTU)
- Pruebas de equipos de control y diseño de estrategias de control.
- Pruebas de estrategias de control de emergencia (SPS) y rediseño de filosofías de actuación.
- Análisis de transitorios electromagnéticos y electromecánicos.
- Pruebas de calibración de aislamiento e impacto de muy alta tensión (500 kV) en la operación del sistema.
- Pruebas de Unidades de Medición Sincrofasorial (PMU) y análisis de su ubicación óptima.
- Pruebas del Sistema de Protección Sistemática (SPS) y análisis de estrategias de reconfiguración y re-calibración del SPS.
- Evaluación de estrategias de ubicación y sintonización de Estabilizadores del Sistema de Potencia (PSS).
- Evaluación de la seguridad dinámica del Sistema Nacional Interconectado en tiempo real para brindar al operador un rápido análisis de fenómenos dinámicos transitorios (electromagnéticos y electromecánicos).
- Herramienta de decisión para la operación en tiempo real del nuevo sistema de transmisión de 500 kV.
- Análisis del impacto de la puesta en funcionamiento de plantas de generación no convencional (ERNC) para el planeamiento y la operación en tiempo real.
- Validación de los modelos de sistemas de control (reguladores de voltaje y velocidad) para mejorar los resultados de las simulaciones dinámicas de los estudios de planeamiento eléctrico.
- Verificación y desarrollo de modelos de carga y determinación de equivalentes dinámicos de sistemas interconectados o de plantas de generación.
- Análisis del impacto de la inclusión de dispositivos basados en electrónica de potencia (dispositivos FACTS, almacenadores de energía) en la operación del Sistema Nacional Interconectado.
- Estructuración de planes de capacitación para los funcionarios técnicos de CENACE, así como para los diferentes actores del sector eléctrico.
- Diseño de actividades de cooperación académica con institutos de educación superior encaminadas al desarrollo de recurso humano así como de proyectos de innovación conjuntos.

En el área de Investigación y Desarrollo, el Laboratorio deberá realizar lo siguiente:

- Promover la investigación académica y aplicada en sistemas eléctricos de potencia.
- Prestar apoyo en los procesos de control y mejora de calidad y seguridad del servicio de energía eléctrica.
- Incrementar el conocimiento referente a desarrollos tecnológicos modernos relacionados con los sistemas eléctricos de potencia.
- Mejorar el nivel de formación académica de los profesionales en ingeniería eléctrica, electrónica, telecomunicaciones y control con los últimos desarrollos del estado del arte.
- Formar recurso humano ecuatoriano altamente calificado que contribuya con el desarrollo técnico y académico del país.
- Desarrollar e implementar tecnologías de punta que se adapten a las necesidades y realidad de los sectores eléctricos y energéticos.
- Colaborar con las industrias de los sectores de electricidad y energía dotando de soluciones técnicas a sus necesidades específicas.

Las aplicaciones comerciales especializadas que serán de apoyo directo para el mejoramiento de los procesos que lleva a cabo CENACE y que le permitirán asegurar el abastecimiento eléctrico del país bajo las mejores condiciones de calidad, seguridad y economía, son:

3.2. Requerimientos del Laboratorio

El requerimiento principal del laboratorio es la implementación de equipos de simulación digital en tiempo real con tecnología de punta, capaces de interactuar con equipos y sistemas eléctricos de potencia reales.

El simulador en tiempo real deberá tener las siguientes características generales:

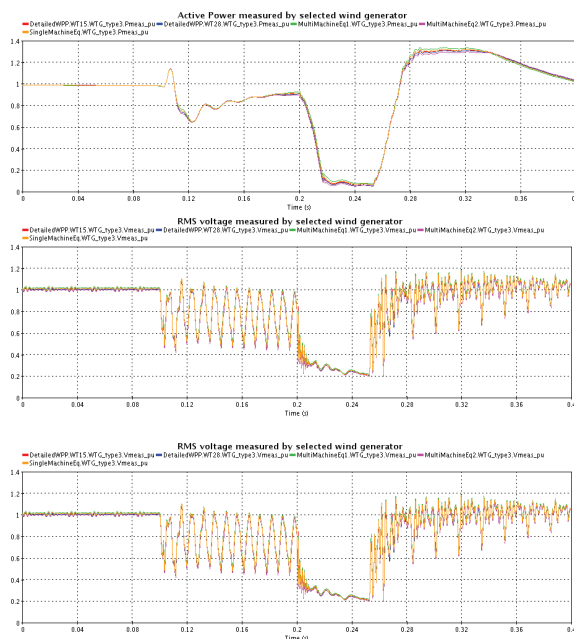


Figura 7: Resultados de la simulación: Potencia Activa y Voltaje

4. DESAFÍOS DEL LABORATORIO PARA EL DESARROLLO DE UNA RED DE TRANSMISIÓN INTELIGENTE

Uno de los propósitos más ambiciosos que tiene CENACE con la implementación del Laboratorio de Simulación en Tiempo Real es el desarrollo de una estructura de análisis integral SCADA/EMS-WAMS-Laboratorio para desarrollo de esquemas WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection and Control) adaptivos. En este sentido, la infraestructura WAMS implementada en CENACE [12], en conjunto con la información proveniente del Esquema de Protección Sistemática (SPS) que está operando desde enero de 2015 en el SNI [13] y la información disponible del nuevo SCADA/EMS [14] serán conectadas con el Simulador en Tiempo Real con el propósito de robustecer los desarrollos matemáticos que ya se han realizado referentes a tecnología WAMS [15] y los que se continuarán realizando a partir de la información real del sistema eléctrico ecuatoriano tomada de los sistemas WAMS, SPS y SCADA/EMS, lo que viabilizará la incursión en desarrollos mucho más especializados de metodologías de protección del sistema eléctrico que permitan evitar colapsos. Estos desarrollos más especializados podrán, en el mediano plazo (2 – 3 años), ser implementados en el Sistema Nacional Interconectado para incrementar su confiabilidad y por consiguiente la calidad del suministro de energía eléctrica en Ecuador. El

propósito es implementar un esquema integral de evaluación de vulnerabilidad del sistema de potencia, que posteriormente permita realizar acciones de control, ya sean de tipo correctivo o preventivo. Por tanto, se requiere de un esquema inteligente que entregue información crítica en tiempo real, evalúe la vulnerabilidad del sistema rápidamente y lleve a cabo acciones automáticas de reconfiguración capaces de remediar las condiciones de estrés del sistema, basados en análisis de red extendida que idealmente sea de tipo “closed loop”. Todo esto con el objetivo de estructurar lo que se llama una “red auto-curable” (Self-Healing Grid) [1]. Para esto es fundamental estructurar una adecuada interrelación SCADA/EMS-WAMS-Laboratorio que permita, a través de la investigación aplicada, desarrollar los esquemas WAMPAC adaptivos apropiados para el S.N.I. La Fig. 8 presenta la estructura integral que se ha planificado implementar en CENACE hasta el 2017.

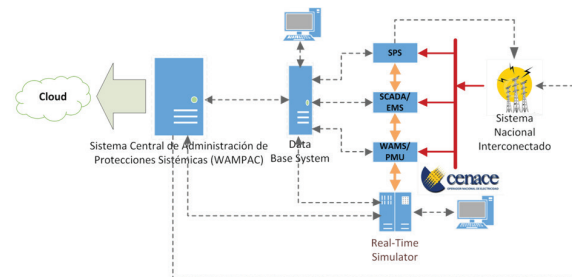


Figura 8: Esquema Integral SCADA/EMS-WAMS-Laboratorio para desarrollo de esquemas WAMPAC adaptivos

El propósito final es lograr que el Sistema Nacional Interconectado de Ecuador se transforme en una Red de Transmisión Inteligente y auto-curable. Para esto, todos los esquemas WAMPAC que se desarrollen serán implementados en el sistema a partir de 2017 o 2018. Todos estos esquemas permitirán evaluar la vulnerabilidad del sistema, comparándola con patrones de comportamiento estático y dinámico que permitan alertar sobre la ocurrencia de eventos altamente críticos y que tengan la posibilidad de provocar eventos en cascada y posteriores colapsos. Posteriormente, adecuadas acciones de control inteligentes permitirán realizar las tareas de reconfiguración del sistema necesarias para llevarlo a condiciones de operación más seguras. Un esquema conceptual de esta visión es presentado en la Fig. 9.

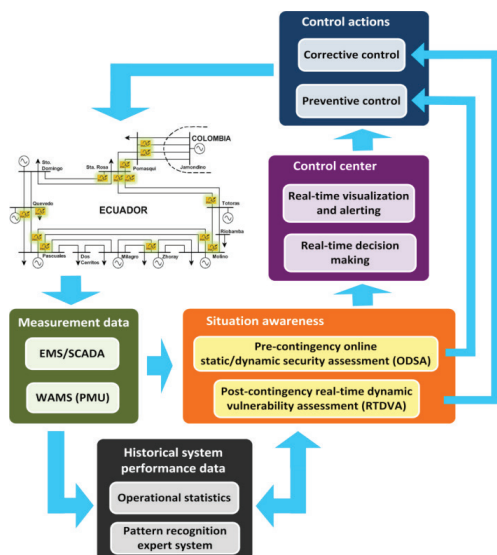


Figura 9: Esquema WAMPAC integral para el Sistema Nacional Interconectado

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La simulación digital en tiempo real es una potente herramienta que viabiliza la ejecución de estudios sofisticados que involucren la necesidad de disponer las señales eléctricas simuladas sincronizadas con las variables eléctricas de un sistema real. Esta característica permite conectar incluso equipos físicos reales al ambiente de simulación (hardware-in-the-loop HIL). Para conseguir su cometido, los simuladores digitales en tiempo real son diseñados conjugando software basado en algoritmos de alta velocidad y procesamiento en paralelo o distribuido (high performance computing HPC).

CENACE y ESPOL han estructurado en ambicioso proyecto de implementar un laboratorio de simulación en tiempo real de sistemas de potencia para el Sector Eléctrico y Energético del Ecuador. El propósito es desarrollar actividades de investigación, docencia y servicios especializados que permitan analizar la dinámica del sistema eléctrico ante el cambio de paradigmas de evolución del servicio eléctrico del Ecuador. A este respecto, uno de los propósitos más desafiantes es el coadyuvar a la estructuración de una red inteligente en Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Dr. Esteban Alborno, Ministro de Electricidad y Energía Renovable, por el apoyo brindado a la ejecución del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Cepeda, "Evaluación de la Vulnerabilidad del Sistema Eléctrico de Potencia en Tiempo Real usando Tecnología de Medición Sincrofasorial", Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, Diciembre 2013.
- [2] CIGRE Task Force, "Analysis and Control of Power System Oscillations", Study Committee 38, final report, December 1996.
- [3] J. Bélanger, P. Venne, and J. Paquin, "The what, where and why of real-time simulation," Opal-RT, 2010, [Online] Available: <http://www.opal-rt.com/technical-document/what-where-and-why-real-time-simulation>.
- [4] M. Faruque, T. Strasser, G. Lauss, et. al, "Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis," in IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, vol.2, no.2, pp.63-73, June 2015.
- [5] RTDS Technologies Inc., Winnipeg, MB, Canada, Real-Time Simulation. [Online] Available: <http://www.rtds.com>.
- [6] O. Devaux, L. Levacher, and O. Huet, "An advanced and powerful real-time digital transient network analyser," IEEE Trans. Power Del., vol. 13, no. 2, pp. 421-426, Apr. 1998.
- [7] I. Etxeberria-Otadui, V. Manzo, S. Bacha, and F. Baltes, "Generalized average modelling of FACTS for real time simulation in ARENE," in Proc. 28th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), vol. 2. Seville, Spain, Nov. 2002, pp. 864-869.
- [8] R. Krebs and O. Ruhle, "NETOMAC real-time simulator. A new generation of standard test modules for enhanced relay testing," in Proc. 8th IEE Int. Conf. Develop. Power Syst. Protection, vol. 2. Amsterdam, The Netherlands, Apr. 2004, pp. 669-674.
- [9] OPAL-RT Technologies, Montreal, Canada, Real-Time Simulation. [Online] Available: <http://www.opal-rt.com>.

- [10] OPAL-RT Technologies, “HYPERSIM Real-Time Digital Simulator for Electric Power System Studies”, Technical Proposal for CENACE and ESPOL, 2015.
- [11] F. Martínez, “Desarrollo de una Herramienta de Simulación Digital para el Análisis de la Operación Dinámica de Redes Eléctricas No Lineales interactuando con Sistemas Físicos en Lazo Abierto y Lazo Cerrado”, Tesis Doctoral, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Febrero 2008.
- [12] J. Cepeda, D. Echeverría, and G. Argüello, “CENACE’s Experiences on Implementing a Wide Area Monitoring System (WAMS) in the Ecuadorian Power System”, 2014 IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV), Noviembre de 2014.
- [13] M. Flores, D. Echeverría, R. Barba, and G. Argüello, “Architecture of a Systemic Protection System for the Interconnected National System of Ecuador”, IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering APCASE 2015, Quito, Ecuador, Julio 2015.
- [14] J. Cepeda, G. Rivera, and L. Farinango, “Improving the Computer Aided Power System Operation in Ecuador: Enhancements to SCADA/EMS”, IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering APCASE 2015, Quito, Ecuador, Julio 2015.
- [15] J. Cepeda, G. Argüello, P. Verdugo, and A. De La Torre, “Real-time Monitoring of Steady-state and Oscillatory Stability Phenomena in the Ecuadorian Power System”, IEEE Transmission and Distribution Latin America (T&D-LA) 2014, Medellín, Colombia, Septiembre 2014.



Gabriel Argüello Ríos.- Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador y el de Master en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Idaho, USA en 1975. Desde 1995 se ha desempeñado como

el Director Ejecutivo del Operador Nacional de Electricidad CENACE. Adicionalmente, se desempeña como profesor del área de sistemas eléctricos de potencia en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus principales áreas de interés comprenden la operación y control de los sistemas eléctricos de potencia y la economía de la energía.



Jaime Cristóbal Cepeda.- Nació en Latacunga en 1981. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2005 y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de

San Juan en 2013. Entre 2005 y 2009 trabajó en Schlumberger y en el CONELEC. Colaboró como investigador en el Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina y en el Instituto de Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad Duisburg-Essen, Alemania entre 2009 y 2013. Actualmente, se desempeña como Jefe de Investigación y Desarrollo del CENACE. Sus áreas de interés incluyen los sistemas de medición fasorial, la evaluación de vulnerabilidad en tiempo real y el desarrollo de Smart Grids.



Diego E. Echeverría Jurado.- Nació en 1982 en la ciudad de Puyo, Ecuador. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, en 2006. Desde 2008, ha estado realizando

sus estudios de Doctorado en Ingeniería Eléctrica en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE), de la Universidad Nacional de San Juan. Actualmente trabaja en CENACE en el Área de Investigación y Desarrollo. Sus áreas de interés son: Estabilidad de Sistemas de Potencia en Tiempo Real, Sistemas de medición sincrofasoriales PMU’s y Control de Emergencia de Sistemas de Potencia.



Síxifo Daniel Falcones.-

Nació en Guayaquil en 1973. Recibió su título de Ingeniero en Electricidad de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) en 1999. Los títulos de Master y Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Estatal de Arizona en 2005 y 2011, respectivamente. Actualmente, se desempeña como coordinador de la carrera de Ingeniería en Electricidad de la ESPOL así como docente e investigador. Entre sus áreas de interés están la integración de energías renovables y el control de sistemas de generación distribuidos en base a convertidores estáticos.



José Layana.- Nació en la

ciudad de Guayaquil (1950). Recibió su título de Ingeniero en Electricidad en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) en 1975 y el Master of Engineering en el Rensselaer Polytechnic Institute de New York (USA) en 1978. Es asesor del sector eléctrico en las áreas de generación, transmisión y distribución. Actualmente es profesor honorario de la ESPOL en la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación en el área de Sistemas Eléctricos de Potencia. Entre sus áreas de interés está la planificación de los sistemas de potencia, la economía del sector eléctrico y la integración de la generación distribuida en los sistemas eléctricos.