

# PYSYST - DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL EN CODIGO ABIERTO PARA ESTUDIOS DEL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

Paulo De Oliveira-De Jesus<sup>1,2\*</sup> Andrés Rojas<sup>1,2</sup> Carlos Ruiz<sup>1</sup> René Ortiz<sup>1</sup> Johnny Rengifo<sup>2</sup>  
Manuel Alvarez<sup>1,2</sup>, Francisco Ochoa<sup>1,2</sup> Silvana Delgado<sup>1</sup> Ronald Sousa<sup>1</sup> Daniel Vitulli<sup>1</sup>  
Andrea Mazzei<sup>1</sup> Walter Muñoz<sup>1</sup> Karla Velarde<sup>1</sup> Jose Rafael Pérez<sup>1</sup> Henry Escobar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Energía de la Universidad Simón Bolívar.

<sup>2</sup>Universidad Simón Bolívar, Departamento de Conversión y Transporte de Energía.

\*pdeoliveira@usb-ve

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del proyecto "PYSYST - Desarrollo de una Herramienta Computacional en Código Abierto para Estudios del Sistema Eléctrico Nacional" financiado durante 18 meses por PEI-FONACIT-MPPCTII 2012000092 en el lapso Julio 2012-Diciembre 2013. Los productos presentados en este documento corresponden a Julio de 2013 correspondiente al 66% de avance del proyecto. Este proyecto surge de la necesidad de desarrollar mejores herramientas de análisis que permitan hacer mas eficiente la toma de decisiones en los distintos procesos medulares (generación, transmisión, distribución y comercialización) así como en las distintas etapas de la cadena de valor de la industria eléctrica: planificación, ingeniería, procura, construcción, operación y mantenimiento. Actualmente, la mayoría de las herramientas informáticas utilizadas en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) son del tipo propietario, con altos costos en divisas y un número limitado de licencias. Este proyecto presenta un desarrollo en software libre alternativo que permita masificar la utilización de herramientas de análisis de sistemas de potencia a todos los analistas del sector eléctrico independientemente de la actividad que desempeñen. En este proyecto se define una estructura básica para la herramienta y se justifica la necesidad de adoptar el estándar IEC61970/68, lo que permitiría mejorar la integración del sistema mediante un Modelo de Datos Común (Common Information Model, CIM). Se presentan varios módulos o aplicaciones de la herramienta desarrollados en Python: Flujo de Carga, Corto Circuito y Estimación de Estado de Redes de Distribución Esta aplicación permite determinar la pérdidas de energía y potencia del sistema a tiempo real siendo una valiosa herramientas para estudios de eficiencia energética, confiabilidad y calidad del servicio eléctrico.

**Palabras Clave:** Software Libre, Common Information Model, Flujo de Carga, Estudio de Cortocircuito, Estimación de Estado.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años se ha observado un incremento considerable en la oferta comercial de software de análisis de sistemas eléctricos. Si bien, tales herramientas constituyen una alternativa robusta y eficiente para realizar estudios de diagnóstico en el corto y muy corto plazo, la complejidad derivada de la arquitectura cerrada del software comercial impide a los ingenieros solucionar muchos problemas debido a las especificidades de cada empresa de servicio. Para solventar esta situación, muchas empresas de servicio eléctrico a nivel mundial, en búsqueda de la eficiencia económica, han optado por reforzar los análisis realizados mediante las herramientas comerciales con programas optimizados ajustados a la realidad técnico-económica de la empresa, muchos de ellos con arquitecturas cerradas. Sin embargo, en el mundo real, las condiciones operativas de la red, el crecimiento de la demanda y la expansión de la red generan múltiples soluciones de compromiso que deben ser analizadas desde la óptica de la investigación operacional y que generalmente no es tratada por plataformas comerciales. Surge entonces, la necesidad de desarrollar nuevos sistemas de análisis de sistemas eléctricos de distribución con una estructura abierta y modular a fines de integrar efectivamente los avances científicos logrados por los investigadores en las academias en la resolución de los problemas que se presentan día a día. Actualmente, los análisis requeridos por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se encuentran soportados en la utilización mayoritaria de software propietario. Esto es así en todos los procesos medulares del SEN

(generación, transmisión, distribución y comercialización) así como en las distintas fases de la cadena de valor de la industria eléctrica: planificación, ingeniería, procura, construcción, operación y mantenimiento. Las licencias de software propietario son costosas y limitadas, por lo que no todos los analistas del SEN tienen acceso a ellas. Deben ser renovadas periódicamente y en muchos casos poseen importantes problemas de compatibilidad por cuanto sus bases de datos no se encuentran estandarizadas. Por ejemplo en los estudios de expansión de generación se utiliza un software desarrollado por PSR denominado OPTGEN(1). Otro software propietario desarrollado por PSR, el SDDP(2) es utilizado para la coordinación hidrotérmica. Para el análisis de sistemas de transmisión, se ha adoptado recientemente en CORPOELEC la utilización de la herramienta propietario Digsilent Power Factory (3). Esta herramienta ha incluido recientemente una compatibilidad con las normas de integración IEC61970/61968. Por otra parte, en la industria petrolera esta muy extendida la utilización de la herramienta propietario ETAP (4). Sin embargo es importante destacar que todos los proveedores de equipos de monitorización y control para los despachos de carga (SCADA/EMS/DMS) poseen sus propias herramientas propietario. Por ejemplo, Siemens tiene el PTI-PSSE (4), SNC-LAVALIN-GE posee el Concorda PSLF (5).

En cuanto al proceso de distribución, algunas antiguas empresas de servicio como La Electricidad de Caracas adquirieron software propietario como el PPSE Adept (4) de PTI. Enelven adquirió el Feederall (6) de ABB. El ETAP es utilizado extensamente por la industria petrolera para el análisis de sistemas de distribución del tipo industrial. Sin embargo, la adopción de software del tipo caja negra encontró serias dificultades de integración una vez las empresas eléctricas comenzaron a construir sus propios sistemas de información geográfica. Este es el caso de La Electricidad de Caracas que a inicios de los años 90 adoptó la solución Microstation (7) de Bentley y CADAPE que adoptó la plataforma AutoCAD (8). Para resolver los problemas de integración, La Electricidad de Caracas adquirió un software propietario, desarrollado en Delphi por el Prof. Alberto Naranjo denominado ASP (9), el cual se encontraba completamente adecuado a la empresa y que aun hoy se encuentra en producción aunque con un soporte muy limitado. Por otra parte, CADAPE adquirió otro software de análisis desarrollado localmente. Primero el SID y después el PADEE (10), ambas aplicaciones desarrolladas sobre AUTOCAD.

## **ANTECEDENTES EN DESARROLLO DE PLATAFORMAS DE ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA EN CODIGO ABIERTO**

La creación de aplicaciones de análisis de sistemas eléctricos en código abierto es relativamente reciente. Quizá la mas representativa sean los desarrollos de Mike Zhu en Java, InterPSS (11) y los desarrollos de Federico Milano en Octave y Python, PSAT y DOME (12). Otros desarrollos como MatPower (13) son en código abierto pero bajo una plataforma propietario MATLAB (14) aunque pueden ser ejecutados en una plataforma libre como Octave (15). Existen otras aplicaciones un código abierto como Pypower(16) o el EPRI OpenDSS(17) de muy fácil integración. En Venezuela, se presentó en 2003 un importante aporte del GIELEC-UNEFA con el desarrollo de un software de análisis denominado ASP (18). Posteriormente en 2009, en el marco de la LOCTI, el Instituto de Energía de la Universidad Simón Bolívar desarrolló un proyecto para la actualización de la plataforma tecnológica del Departamento de Planificación de Electricidad de Caracas, proyecto éste que se encuentra paralizado por falta de recursos.

## **PROYECTO PEI-FONACIT-MPPCTI 201200092 – PYSYST: PYTHON POWER SYSTEM ANALISYS SUITE**

En el año 2011, el Instituto de Energía de la USB crea un centro especializado en análisis de sistemas de potencia (CESEP, Centro de Estudios de Sistemas de Potencia). En 2012 el centro fue beneficiado mediante una subvención del Programa de Estimulo a la Innovación para el Desarrollo de una Herramienta Computacional en Código Abierto para Estudios del Sistema Eléctrico Nacional. El proyecto ha contado con la participación de 20 personas: 4 profesores universitarios, 6 ingenieros, 1 TSU y 9 bachilleres (estudiantes universitarios, tesis y pasantes becados). Los recursos de este proyecto se han utilizado únicamente para la contratación del recurso humano. No se han adquirido equipos ni adecuado espacios para la realización del proyecto.

## ARQUITECTURA DEL SISTEMA - PYSYST

La Herramienta Computacional PYSYST se desarrolla en una plataforma en código abierto (PYTHON) permitiendo la construcción de un sistema de forma modular mediante aplicaciones descentralizadas. El sistema consta de tres tipos de módulos u aplicaciones:

1. Módulos para el Intercambio de Datos con las Bases de Datos Existentes (M)
2. Módulos Controladores o de Proceso (C)
3. Módulos de Visión o Interfaz con el Usuario (V)

Cada módulo desarrollado es una herramienta stand-alone. En este sentido cada módulo de análisis tendrá una estructura modular de modo que su modificación y/o adecuación sea facilitada para las tareas de programación y extensión futuras. El código fuente de cada módulo de análisis será apropiadamente documentado en cada uno de sus sub-módulos y procesos. Se elaborará un Manual de Usuario del Software, que incluya los métodos de cálculo utilizados en cada uno de los módulos.

La herramienta se plantea desarrollar en tres etapas. En este proyecto se han presentado aplicaciones en las dos primeras etapas. La tercera etapa requiere de financiamiento adicional.

En la Etapa 1 se presenta un prototipo básico cuyas funcionalidades permitan realizar un diagnóstico básico del sistema eléctrico. El prototipo propuesto para la Fase 1 se muestra en la Figura 1.

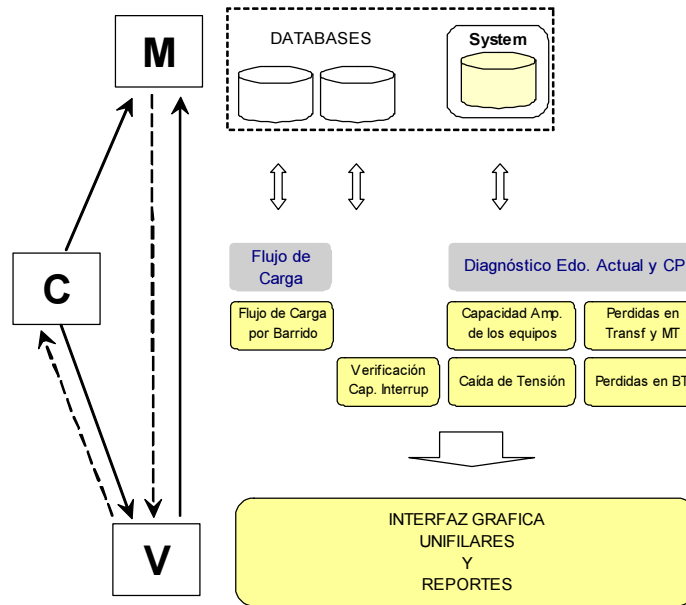


Figura 1: PYSYST - Prototipo Fase 1

En la Fase 1 se han desarrollado algoritmos de solución al problema de flujo de carga para redes reales de gran tamaño. Esta herramienta permitirá analizar el sistema eléctrico en régimen permanente sobre una plataforma de información geográfica. En este sentido, el analista será capaz de determinar la severidad en de las sobrecargas en líneas y transformadores así como la calidad de la tensión de servicio.

En la Fase 2, se incluyen herramientas especializadas que permitan realizar análisis de cortocircuito y estimación de estado. Los estudios de cortocircuito permitirán mejorar la coordinación de las protecciones con un efecto positivo en los índices de confiabilidad del sistema. También se ha presentado un módulo de estimación de estado, que mediante la utilización de la base de datos de facturación (comercial) y la información disponibilizada por los sistemas SCADA/EMS/DMS permite determinar el estado de la red con gran precisión. El estimador de estado permite determinar a tiempo real el estado de los

transformadores y líneas que no son objeto de medición, lo que permite remediar las sobrecargas a tiempo, redundando en una mejora de los indicadores de confiabilidad. En la Figura 2, se muestra la estructura propuesta para el prototipo en su segunda fase.

Adicionalmente el estimador permite verificar los niveles de pérdidas técnicas y no-técnicas sin la necesidad de realizar costosas campañas de registros de parámetros eléctricos. Lo más importante es que la información del usuario final de la energía sea consistente, se disponga de la relación USUARIO-TRANSFORMADOR-SUBESTACION y un estudio de caracterización de carga riguroso.

La caracterización de la demanda mediante las curvas de carga típicas por tipo de usuario (residencial, industrial, comercial, sector público) y nivel tarifario debe realizarse mediante muestreo estadístico que permita realizar los estudios de estimación dentro del intervalos de confianza y errores razonables. En nuestro criterio, la masificación de una herramienta de análisis básica en código abierto para todos los analistas del sistema eléctrico, con una capa de datos normalizada es el punto de partida para la regularización de servicio de electricidad en Venezuela.

Las funcionalidades de la herramienta en sus fase 1 y 2 se especifican a continuación. Esquemáticamente se pueden diferenciar cinco (5) bloques:

- Bloque 1. Interfaz Grafica y Reportes Técnicos y Económicos
- Bloque 2. Traducción de Base de Datos
- Bloque 3. Procesamiento de datos proveniente del SCADA y SIG
- Bloque 4. Análisis Preliminar

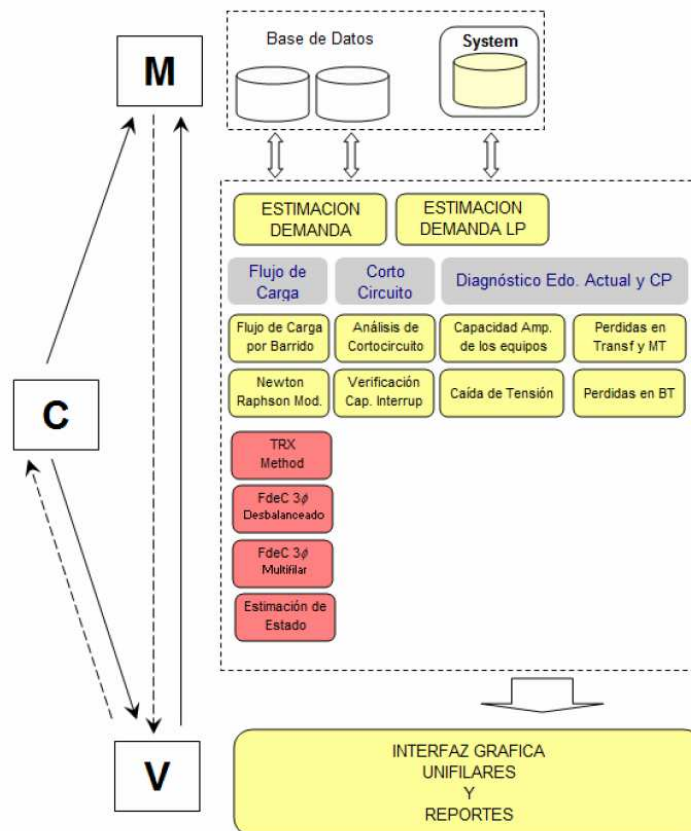


Figura 2: PYSYST - Prototipo Fase 2

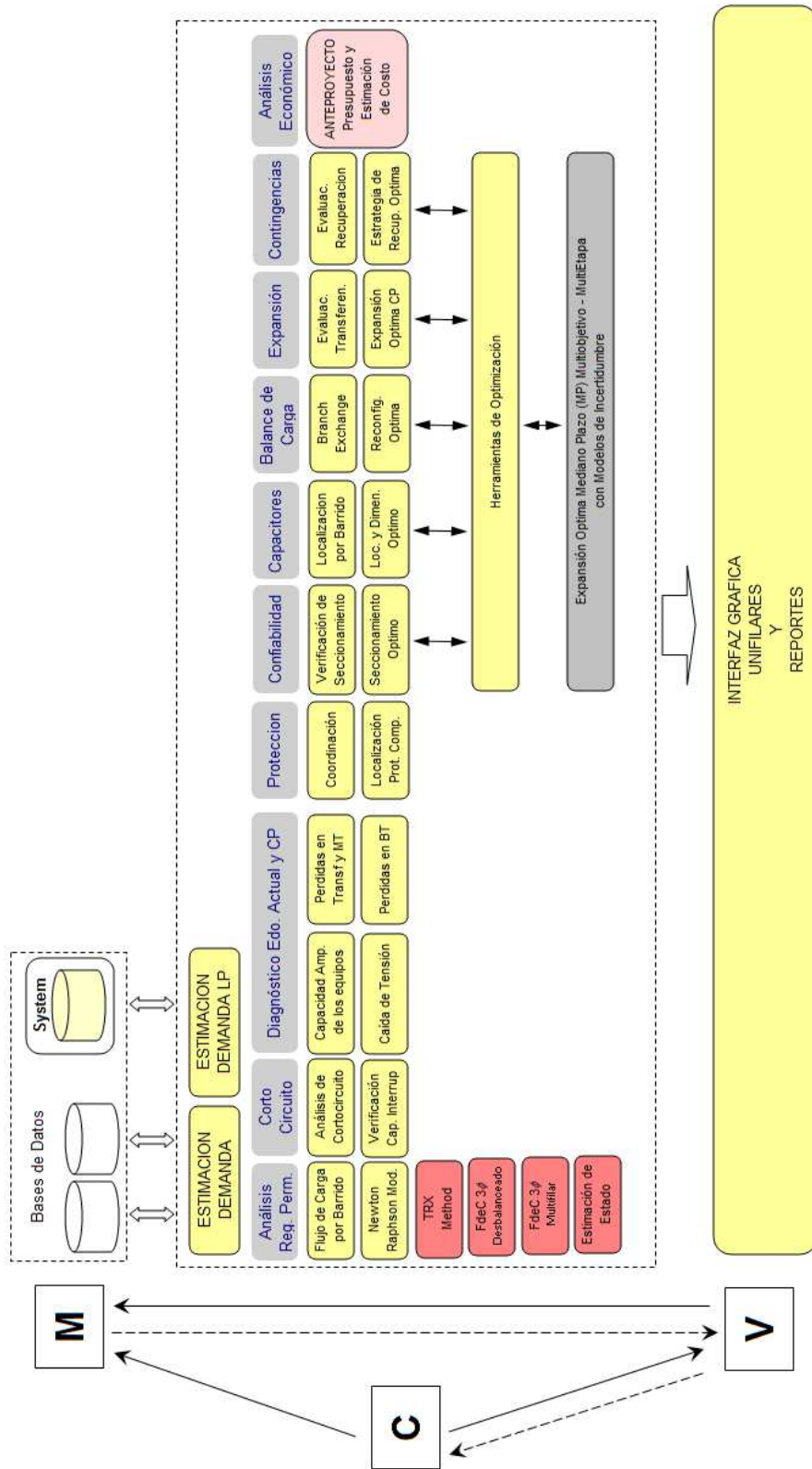


Figura 3: PYSYST - Prototipo Fase 3

El Bloque 1, corresponde a la interfaz grafica con el usuario y se representará en un ambiente integral todos los casos de análisis cargados en memoria con modos edición, análisis, reporte técnico y económico claramente diferenciados. Todos los módulos de análisis estarán visibles en el ambiente general. Para la realización de los estudios se requiere importar y procesar datos de todos los sistemas disponibles: bases de datos del sistema (Bloque 2), medidas del SCADA (Bloque 3) y datos del sistema de información geográfica (Bloque 1). El Bloque 4 es dedicado al análisis preliminar del sistema con el fin de detectar los problemas existentes en la red en la condición actual y en el corto plazo. El diagnostico preliminar puede ser ejecutado en forma individual o de forma automatizada analizando una porción del universo de la red. Se identifican básicamente las siguientes deficiencias críticas:

- 1) Problemas operacionales: capacidad de interrupción, sobrecarga y caída de tensión,
- 2) Costo de las pérdidas
- 3) Costo de la energía no suministrada debido a falla, y
- 4) Factibilidad de expansión en el corto plazo.

El Bloque 4 consta de (8) módulos para el análisis preliminar: 3 algoritmos de flujo de carga, análisis de cortocircuito, módulos de evaluación de la tensión, capacidad amperimétrica, de cortocircuito, costos de pérdidas y falla. Finalmente, en una Fase 3, no incluida en el alcance de este proyecto, se proyectan la inclusión de funciones especializadas para la optimización del sistema. El prototipo propuesto para la Fase 3 se muestra en la Figura 3.

### IMPLEMENTACIÓN DE BASE DE DATOS CONFORME A IEC61970/ IEC61968

Un aspecto fundamental a considerar, es que no es necesario convertir todas las base de datos que coexisten en la empresa eléctrica. Lo importante es que se puedan intercambiar datos en forma estandar (CIM, Common Information Model) utilizando archivos XML, tal como se especifica en las normas IEC61968/61970 y como se muestra a tutulo de ejemplo en la Figura 4

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <cim:cim xmlns:cim="http://packages.python.org/PyCIM/">
3 <cim:case>
4 <cim:id>SEN_765kV</cim:id>
5 <cim:networkCategory>Transmission</cim:networkCategory>
6 <cim:Core.BasePower>
7   <cim:basePower>100</cim:basePower>
8   <cim:Core.Unit>MVA</cim:Core.Unit>
9 </cim:Core.BasePower>
```

Figura 4: Ejemplo de Codificación CIM

### MOTORES DE CÁLCULO: FLUJO DE CARGA TRX SECUENCIA POSITIVA Y TRIFASICO:

Este proyecto al estar fundamentado en el desarrollo de plataformas en software libre, utiliza distintos motores de cálculo disponibles, como por ejemplo un robusto Newton Raphson (Pypower, 16).

Sin embargo para resolver los problemas de distribución a gran escala, el INDENE-USB ha desarrollado nuevos algoritmos que permitan realizar análisis de gran escala en tiempo útil. En este proyecto se ha desarrollado un motor de calculo sobre la base de un algoritmo denominado TRX. Dicha contribución se encuentra publicada en una revista internacional de alto impacto (20). En la Figura 5 se muestra el esquema básico del algoritmo:

El algoritmo se ha aplicado a una red de gran tamaño. En este caso se ha elegido utilizar la red de distribución hipotética para atender un total de 1,3 millones de usuarios.

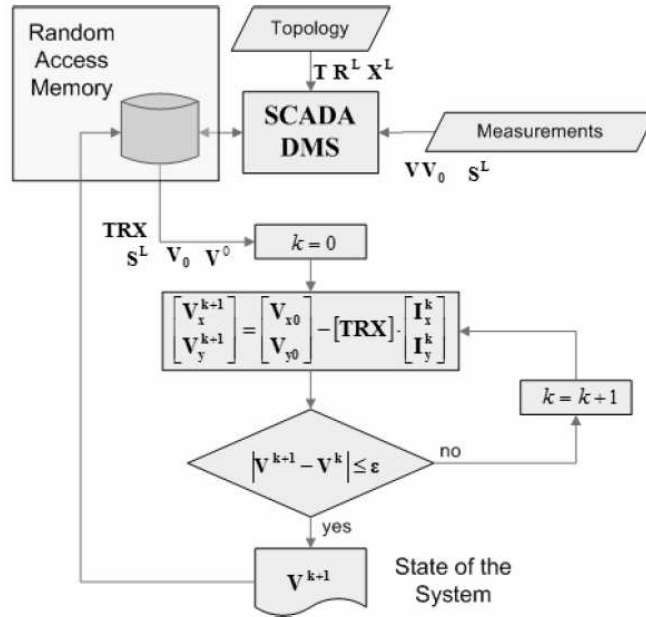


Figura 5: Algoritmo Flujo de Carga TRX

La topología de la red y las condiciones de demanda han sido tomadas de los registros históricos almacenados en la base de datos del DMS/SCADA. Los datos topológicos han sido traducidos de una base de datos que contienen los circuitos de la red. El sistema de estudio consiste en 75 subestaciones (12.47kV y 5kV) con 488 circuitos primarios y 49032 nodos de interconexión donde 9707 de ellos son transformadores. La capacidad total de transformación distribuida a lo largo de la red es 3800MVA y la demanda máxima diversificada fue de 1979MVA, registrada a las 15:00 horas. Se ha construido una matriz TRX para cada uno de los 488 circuitos primarios utilizando el modelo de secuencia positiva y su ubicación geográfica ha sido ajustada utilizando un Sistema de Información Geográfica. El tiempo requerido para determinar el estado de la red a lo largo de los 49032 nodos es apenas 0.6 segundos. El tiempo obtenido es significativamente bajo ya que el tamaño de cada circuito varía entre 500 a 3500 nodos.

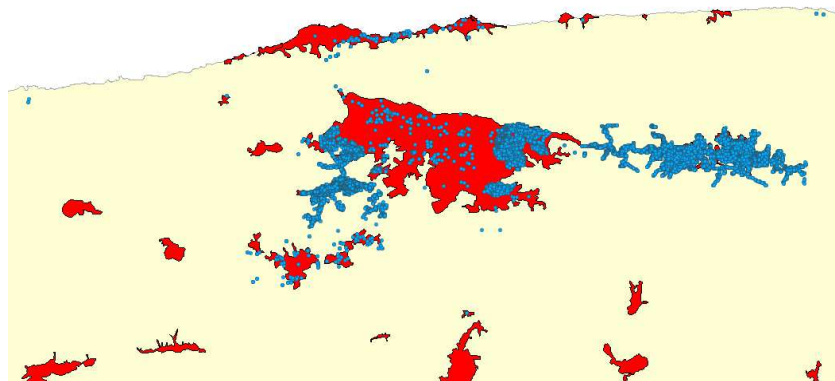


Figura 6: Localización de las Tensiones de Servicio fuera de estándar en una Zona Geográfica dada

Las Figura 6 y 7 muestran la solución de caída de tensión para todos los nodos de la red. El peor resultado es reportado en el circuito 103, nodo 4522 - 518, VD% =8.91%. Globalmente, solo 2.82% del universo de los nodos del sistema no cumple con los límites operacionales establecidos según diseño (5%). Esta aplicación permite determinar la PERDIDAS del sistema a tiempo real siendo una valiosa para estudios de eficiencia energética.

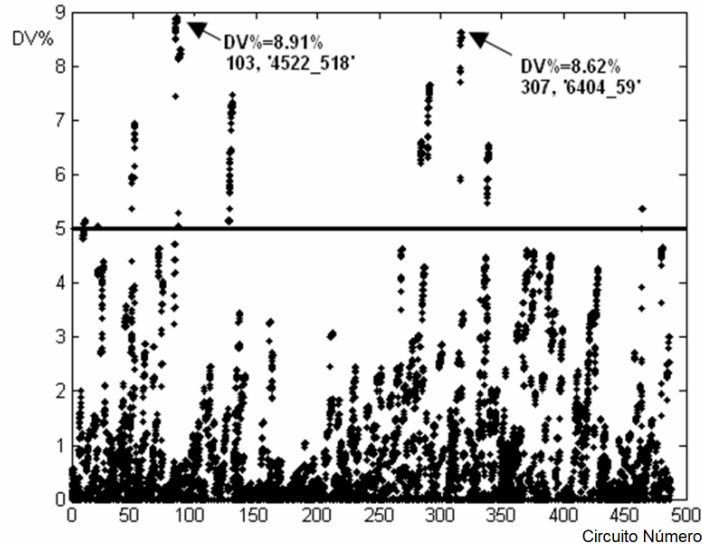


Figura 7: Valores de las Tensiones de Servicio fuera de estándar por circuito de Distribución en una Zona Geográfica dada

La herramienta permite de una forma general conocer que variables del sistema están infringiendo los límites especificados, proporcionando información de alto valor a los gestores del sistema

## INTERFACES GRAFICAS Y APLICACIONES DEL PROYECTO

Todas las aplicaciones desarrolladas en este proyecto corren sobre un servicio web (<http://www.indene.usb.ve/pysyst.html>) cuyo portal se muestra en la figura 8.

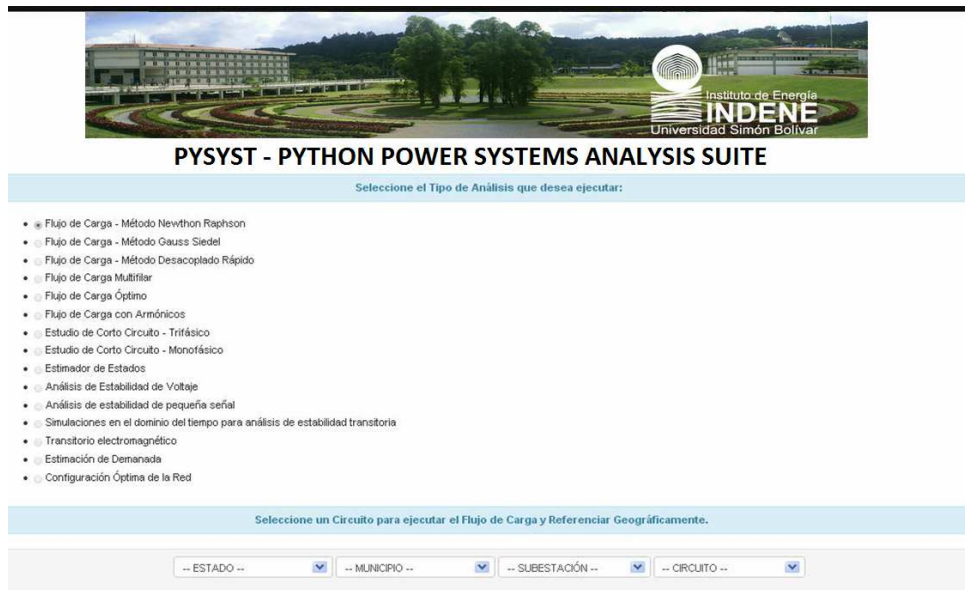


Figura 8: Portal Web con Aplicaciones Desarrolladas <http://www.indene.usb.ve/pysyst>

En la Figura 9 se muestra la disposición de un circuito de media tensión sobre una foto satelital y sobre el servicio Open Street Map (19).

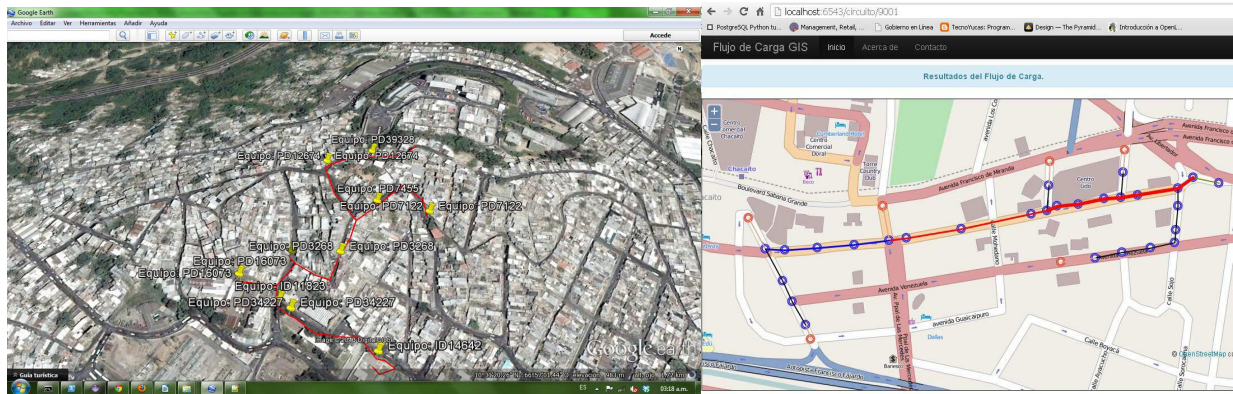


Figura 9: Interfaz Gráfica de un Circuito de Media Tensión – Visión Satelital y OpenStreetMap

En la Figura 10 se muestran los resultados de un flujo de carga de secuencia positiva en un circuito de media tensión.

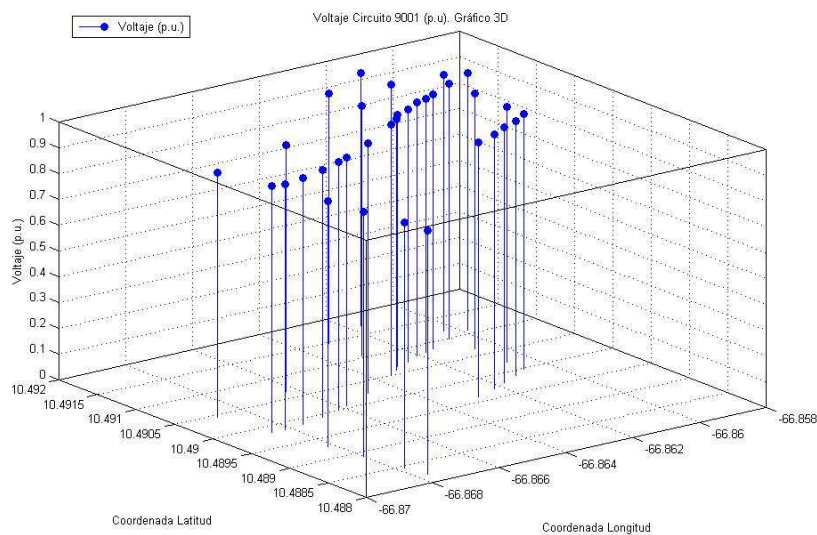


Figura 10: Visualización gráfica de los Resultados de un Estudio de Flujo de Carga

La economía de espacio no permite describir en detalle todas las aplicaciones desarrolladas en este proyecto. El proyecto cuenta con una pagina web (<http://www.indene.usb.ve/pei2953.html>) en el que se encuentran alojados los códigos fuente y la documentación detallada de todas las aplicaciones desarrolladas.

Como resultado de este proyecto se presentaron NUEVE (9) trabajos de de grado que pueden ser consultados en el portal de la Biblioteca de la Universidad Simón Bolívar <http://www.bib.usb.ve>.

1. PEI2953-1/12 "Estudios de cortocircuito balanceado en sistemas de distribución sobre una plataforma libre", Francisco Ochoa, Tesis de Grado, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2012.
2. PEI2953-2/12 "Aplicación de flujo de carga directo a redes de distribución de gran tamaño", Henry Escobar, José Rafael Pérez, Tesis de Grado, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2011. PREMIO IEEE-INELECTRA a la mejor tesis de grado en ingeniería eléctrica - 2012
3. PEI2953-3/12 "Estudios de flujo de carga balanceado en sistemas de distribución sobre una plataforma libre", Johan Rojas, Tesis de Grado, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2012

4. PEI2953-1/13 "Aplicación del Standard IEC61970 a la Base de Datos del Sistema Eléctrico Nacional y desarrollo de una herramienta de Análisis en Software Abierto", Silvana Delgado, Tesis de Grado, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2012
5. PEI2953-2/13 "Estudio de factibilidad de Interconexión HVDC en el Sistema Eléctrico Nacional", Ronald Sousa, Tesis de Grado, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2012.
6. PEI2953-3/13 "Estudio sobre el Balance de Energía en Venezuela y Oportunidades de Generación Eléctrica 2012-2020.", Andrea Mazzei, Tesis de Grado, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2013.
7. PEI2953-4/13 "Estimación de Estado de Redes de Distribución utilizando Energía como Pseudomedida", Andrés Rojas, Tesis de Grado, Maestría en Ingeniería Eléctrica (postgrado), 2013
8. PEI2953-5/13 "Desarrollo de una Herramienta Computacional de Flujo De Carga Implementado en una Plataforma G.I.S", Daniel Vitulli, Informe de Pasantía Larga, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2013.
9. PEI2953-6/13 "Integración de Parques Eólicos con Generadores de Inducción Doblemente Alimentados", Walter Muñoz y Karla Velarde, Tesis de Grado, Ingeniería Eléctrica (pregrado), 2013.

Los aportes de investigación de este proyecto derivaron en DOS (2) publicaciones de carácter internacional: una revista internacional arbitrada de alto impacto (20) y un congreso internacional (21)

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados del proyecto "PYSYST - Desarrollo de una Herramienta Computacional en Código Abierto para Estudios del Sistema Eléctrico Nacional" PEI-FONACIT-MPPCTII 2012000092. Los productos presentados en este documento corresponden al 66% de avance del proyecto.

## REFERENCIAS

1. [http://www.psr-inc.com.br/portal/psr\\_es/servicios/modelos\\_de\\_apoyo\\_a\\_decisao/studio\\_plan/optgen/](http://www.psr-inc.com.br/portal/psr_es/servicios/modelos_de_apoyo_a_decisao/studio_plan/optgen/)
2. [http://www.psr-inc.com.br/portal/psr\\_es/servicios/modelos\\_de\\_apoyo\\_a\\_decisao/studio\\_opera/sddp/](http://www.psr-inc.com.br/portal/psr_es/servicios/modelos_de_apoyo_a_decisao/studio_opera/sddp/)
3. <http://www.digsilent.de/>
4. <http://etap.com/>
5. <http://www.energy.siemens.com/hq/en/services/power-transmission-distribution/power-technologies-international/>
6. <http://feederall.software.informer.com/>
7. <http://www.bentley.com/es-MX/Products/MicroStation/>
8. <http://www.autodesk.com/products/autodesk-autocad/overview>
9. A. Naranjo, L. Arismendi, Y. Reyes, Programa ASP, ANDESCON99, Isla de Margarita, Venezuela, 1999
10. <http://www.matmor.dyndns.org/padee.html>
11. <http://www.interpss.org/>
12. <http://www3.uclm.es/profesorado/federico.milano/software.htm>
13. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>
14. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
15. <http://www.gnu.org/software/octave/>
16. <https://pypi.python.org/pypi/PYPOWER/4.0.00>
17. <http://www.smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx>
18. González-Longatt F. Guillen F. "Implementación de un Modulo de Flujo de Potencia para el ASP". II Jornadas de Ingeniería Eléctrica, JIELECTRIC 2003, Puerto Ordaz, 2003.
19. <http://www.openstreetmap.org/>
20. Paulo De Oliveira-De Jesus, M. A. Alvarez, J.M. Yusta, Distribution power flow method based on a real quasi-symmetric matrix Electric Power Systems Research 02/2013; 95(2):148-159. WoS SCI Journal 1.48 Impact Factor
21. New Formulation for Distribution System State Estimation, Paulo M De Oliveira-De Jesus y Andres Rojas, presentado en IEEE ANDESCON 2012, Nov. 7-9, Cuenca, Ecuador. Congreso indexado en el INSPEC y IEEE Xplore