

## HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN

J. W. González<sup>\*†</sup>, J. G. Ortega<sup>\*</sup>, S. Cadavid<sup>\*\*</sup>, H. A. Restrepo<sup>\*</sup>, I. A. Isaac<sup>\*</sup>, G. J. López<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.

<sup>\*\*</sup>HMV Ingenieros, Calle 8 No. 43C-101, Medellín, Colombia.

Recibido 12 Abril 2010; aceptado 5 Junio 2010

Disponible en línea: 25 Junio 2010

Resumen: Este trabajo desarrolla conceptos físicos y matemáticos para la creación de una herramienta computacional en el lenguaje C++ con el propósito de realizar la simulación del flujo de cargas y la estabilidad de tensión de un sistema de potencia, el cual es un tema muy relacionado con las fallas totales o escalonadas de los sistemas eléctricos, conocidas técnicamente como Apagones.

Al principio se muestra la definición y la clasificación del concepto de la estabilidad de tensión, para luego llegar al tema de los apagones. En esta parte se muestran una serie de eventos con maniobras reales ocurridas en el mundo que han llevado al colapso de tensión. Después se muestran algunas de las herramientas actuales que permiten analizar los problemas de estabilidad de tensión. Más adelante se esbozan los conceptos de los algoritmos que desarrolla el programa y se da una pequeña introducción a C++ Builder, el cual es el compilador utilizado para el desarrollo de la herramienta. En la última parte, se prueba la efectividad del programa con varios casos de estudio desarrollados por la IEEE. *Copyright © 2010 UPB.*

*Palabras clave:* Sistemas de Potencia, Apagones, Lenguaje de Programación, Inestabilidad de Voltaje, Estado Estable, Contingencias.

Abstract: This project develops physical and mathematical concepts for the creation of a program in the C++ language, used in loadflow simulations and the voltage stability of the power system, which is a subject especially related with the total and partial faults in the electrical systems, technically known as blackouts.

At the beginning, the definition and classification of the voltage stability concept is showed, afterwards the blackout topic is approached. In this part are displayed some sequential events with real maneuvers that had happened in the world which had lead to a voltage collapse. Then, are exposed some of the actual tools that allow to analyze the voltage stability problems. Furthermore, the program algorithms are pointed out and a short introduction to the C++ Builder is given, which is the compiler used to develop the tool. Finally, the program effectiveness is proved with several study cases developed by the IEEE.

*Keywords:* Power Systems; Blackouts; Programming language; Voltage instability; Steady state; Contingencies.

---

<sup>†</sup> Autor al que se le dirige la correspondencia:  
Tel. (+574) 354 45 22 ext. 9586.  
E-mail: [jorgew.gonzalez@upb.edu.co](mailto:jorgew.gonzalez@upb.edu.co) (Jorge González).

## 1. INTRODUCCIÓN

Los apagones han ocurrido en el mundo y en Colombia desde hace varias décadas, sin embargo, se ha notado un gradual y elevado incremento mundial en los últimos años. Debido a esta problemática, múltiples investigadores y compañías de energía han abordado trabajos en pro de disminuir la amenaza de los apagones, prevenirlos o mitigar sus desagradables efectos en la sociedad y la economía de un país.

Las contribuciones técnicas sobre apagones están conformadas por trabajos teóricos, de análisis y aplicación. Podrían entonces establecerse tres categorías de tipos de trabajos: teóricos basados en modelos matemáticos y estadísticos, trabajos centrados en estrategias obtenidas a partir del análisis eléctrico y estrategias basadas en software y equipos de control dedicado. Ésta última es una categoría reciente y de promisorios avances tecnológicos, por lo que es de gran utilidad ya que toma como punto de partida la asistencia al operador y a la red como tal. El presente proyecto está dentro de esta categoría, en la cual se han propuesto soluciones basadas en software que les permiten a los operadores e ingenieros de planeación cuantificar cuál es el riesgo de que se presente un apagón a medida que se incrementa la cargabilidad del sistema de transmisión. Se involucra entonces, la necesidad que la cuantificación del riesgo se realice de manera rápida, en tiempo real y para múltiples simulaciones fuera de línea.

## 2. INTRODUCCIÓN A LOS APAGONES OCASIONADOS POR LA INESTABILIDAD DE TENSIÓN

### 2.1. Estabilidad y Clasificaciones

Estabilidad es la tendencia de un sistema de potencia a desarrollar fuerzas recuperadoras iguales o mayores que las fuerzas perturbadoras, para mantener o alcanzar un estado de equilibrio. Las fuerzas perturbadoras pueden ser fallas, cortocircuitos, cambios en la carga o en la generación, etc. Las fuerzas recuperadoras están relacionadas con la conexión o desconexión de generación (si hubo caída o incremento de la frecuencia), reconexión de circuitos después de una falla (recuperación de la red), despejes de falla (recuperación de la tensión) y controles de

los sistemas de potencia, como por ejemplo el control de la excitación y el control de la turbina.

La clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia se puede observar más claramente mediante la Fig. 1.



Fig. 1. Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia. Tomada de (Kundur, 2004).

### 2.2. Conceptos de Estabilidad de Tensión

La estabilidad de tensión es la capacidad de un sistema de potencia de mantener en estado aceptable las tensiones en todas las barras, tanto en condiciones normales de operación como durante perturbaciones. Además, depende de la capacidad de mantener o restaurar el equilibrio entre la demanda y el suministro de carga del sistema de potencia (Kundur, 2004).

La inestabilidad de tensión en un sistema de potencia se presenta cuando la tensión cae progresivamente y supera los valores críticos sin que sea posible detener esa evolución. Es un proceso que se produce como resultado de una secuencia de eventos acompañados de un problema de inestabilidad de tensión ocasionando apagones o tensiones excesivamente bajas en una parte importante del sistema de potencia.

### 2.3. Curvas P-V y V-Q

Según (González, 2006), las simulaciones de flujo de carga son el método de estudio clave para el análisis de la estabilidad de tensión porque se producen "fotos" del sistema de potencia después de un apagón o durante el crecimiento de la carga. Además, existen dos métodos también basados en flujos de carga que son usados para el análisis de la estabilidad de tensión: las curvas P-V y las curvas V-Q. Estos dos métodos determinan los límites de cargabilidad de estado estable relacionado con la estabilidad de tensión (Quintana, 1999). Existen programas

convencionales que pueden ser usados para el análisis aproximado, aunque se le da una atención especial a los alrededores del punto crítico (potencia máxima) para visualizar los límites de carga del sistema de potencia.

Algunos ejemplos de curvas P-V y V-Q se pueden observar en la [Figura 2](#) y [Figura 3](#) respectivamente.

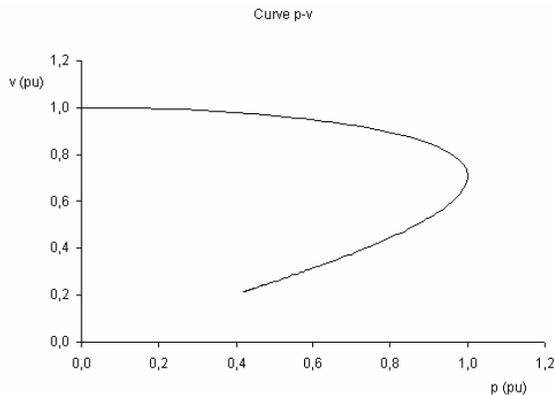


Fig. 2. Curva P-V para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas

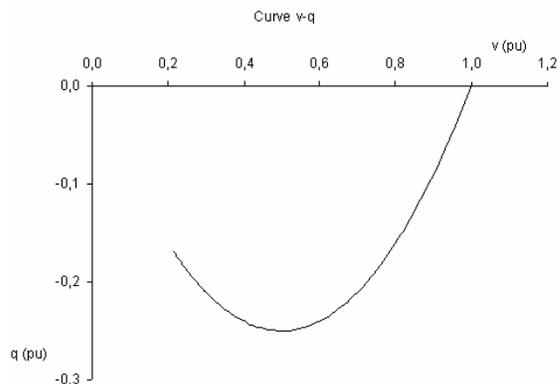


Fig. 3. Curva V-Q para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas

#### 2.4. Antecedentes Nacionales y Mundiales

Es importante destacar la importancia de garantizar condiciones de estabilidad de tensión en sistemas de potencia para evitar consecuencias desastrosas.

A continuación se presentan algunas experiencias reales de apagones por inestabilidad de tensión en diferentes países:

- [Interconexión Colombia-Ecuador](#). En [\(Zuluaga, Présiga\)](#), se reportó que el 12

de Abril de 2004 a las 06:07 horas se presentó una falla monofásica sostenida en la fase B de la Línea Electroquil - Gonzalo Zaballos a 69 kV (Ecuador), y luego se perdieron dos unidades de generación en la subestación Gonzalo Zaballos con aproximadamente 140 MW.

- [Suecia. Septiembre 23 de 2003](#). El sistema de potencia Nórdico experimentó la perturbación más severa en 20 años. La parte Sur de Suecia y la parte Este de Dinamarca, incluyendo su capital Copenhague, fue apagada. La causa fue una sucesión de eventos que condujeron a una sobrecarga en el sistema que sobrepasó los límites normales de diseño y las normas de seguridad.
- [Estados Unidos y Canadá. Agosto 14 de 2003](#). Extensas partes del Medio oeste y el Nordeste de Estados Unidos y Ontario en Canadá, experimentaron un apagón de potencia eléctrica. La interrupción del servicio afectó un área con una población estimada de 50 millones de habitantes.

#### 2.5. Herramientas Actuales

Existen diferentes herramientas computacionales que permiten predecir el impacto de las contingencias, algunas de ellas se describen en forma básica a continuación:

- [ASPUPB](#). Programa de la Universidad Pontificia Bolivariana que se realizó utilizando la herramienta Matlab. Es desarrollado por el grupo de investigación TyD de la UPB. En principio comenzó como un programa para el análisis de los sistemas de potencia en donde se puede correr flujos de carga, realizar estudios de FACTS, entre otros. Con estudios posteriores, se fueron agregando funciones que permiten hacer estudios más detallados de los sistemas, como el caso de la estabilidad transitoria y el flujo continuado para la estabilidad de tensión [\(Mesa, González, 2003\)](#).
- [QuickStab](#). Desarrollado por la empresa Energy Consulting International, Inc. de Estados Unidos [\(Energy Consulting,](#)

2009). Es una herramienta que permite recalcular la reserva de estabilidad para cada nuevo escenario en tiempo real, lo que es bastante importante para tomar decisiones rápidas y seguras en los centros de despacho.

- **DSATools.** Son software desarrollados por Powertech de Canadá. Permiten hacer análisis de planeamiento en tiempo real de la seguridad de sistemas de energía, estudiando todas las formas de estabilidad (Powertech, 2009).
- **UWPFLOW.** Es un programa para realizar flujos de potencia, que puede ser utilizado para la investigación de fenómenos estáticos de estabilidad de tensión en los modelos AC-HVDC-FACTS del sistema eléctrico (University of Waterloo, 2009).

### 3. GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DEL ALGORITMO

#### 3.1. Formatos para el intercambio de datos

Uno de los mayores problemas para las aplicaciones de software para sistemas eléctricos de potencia es la escogencia de un formato de intercambio de datos entre dos o más entidades, debido a lo complicado que es encontrar un formato de fácil acceso y comprensión.

Según (Bedoya, 2009), la IEEE propuso un formato para el intercambio de datos en estudios de flujos de potencia, llamado IEEE CDF (Common Data Format). Sin embargo, este formato es propenso a errores debido a la topología que maneja, además de no brindar la suficiente información para conocer el sistema eléctrico. A pesar de estos problemas, el formato IEEE aún es utilizado por muchas entidades para el intercambio de datos. Por esta razón es importante que las aplicaciones para análisis eléctricos todavía lean este formato.

Debido a la problemática del formato IEEE, se han creado diferentes tipos de formatos que intentan minimizar estos errores, pero en ocasiones se exceden en la información, volviéndolos difíciles de comprender.

Existe un formato escrito en XML que brinda la información suficiente y permite una fácil lectura para los estudios eléctricos, además de ser flexible y extensible mejorando la funcionalidad y operatividad requerida.

En (Bedoya, 2009), se presenta una propuesta de un modelo estándar XML para intercambio de datos y afirma que los documentos escritos en formato XML poseen como característica principal la utilización de etiquetas, las cuales son definidas por el usuario a diferencia de otros formatos, en donde las etiquetas son predefinidas para dar formato a la información que se quiere presentar.

Según (Bedoya, 2009), las etiquetas usadas por XML tienen la siguiente estructura:

<Etiqueta>INFORMACION</Etiqueta>

Las ventajas más relevantes del formato XML abordadas en (Bedoya, 2009) son:

- Es extensible porque brinda la posibilidad de ser ampliado sin complicación alguna mediante la adición de nuevas etiquetas.
- Su escritura es fácil y sencilla. Se puede realizar en un editor de texto simple como es el bloc de notas guardándolo con la extensión \*.xml.
- Tiene la posibilidad de limitar la información contenida en sus etiquetas, permitiendo así la validación de la información.
- Como se encuentra estandarizado, existen muchas aplicaciones que tienen la capacidad de leer y comprender la información.

La herramienta desarrollada en el actual proyecto tiene la capacidad de leer archivos en los dos formatos mencionados anteriormente.

#### 3.2. Solución del Flujo de Cargas con Newton-Raphson

Newton-Raphson es un método muy avanzado para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales. Parte de la estimación de una solución y

de allí, iterativamente, trata de converger la solución definitiva.

Es el método numérico más empleado para la solución de flujos de carga de los sistemas de potencia porque posee mayor garantía de convergencia que otros métodos como Gauss-Seidel. Básicamente converge en menos iteraciones, aunque su debilidad es la exigencia computacional requerida por el cálculo e inversión de la matriz Jacobiana en cada iteración. Pero las herramientas hechas en lenguajes con tiempos de ejecución bastante veloces permiten un cálculo óptimo y rápido.

La herramienta desarrollada en el proyecto utiliza este método para realizar el flujo de cargas de los sistemas de potencia.

### 3.3. Solución del Flujo de Cargas Continuado

Según (González, 2006), un flujo de potencia continuado es una serie de “fotos” de flujos de carga aumentando gradualmente el parámetro de carga. El objetivo principal es determinar cuanta carga adicional puede soportar un sistema de potencia antes de que se produzca un colapso de tensión. La ventaja del flujo continuado con respecto al flujo de cargas convencional, es que facilita la convergencia y los problemas numéricos cerca del límite de transferencia de potencia máximo, que es cuando el Jacobiano es propenso a hacerse singular. Esto se evita replanteando de nuevo las ecuaciones del flujo de carga mediante una técnica de extensión dada con ciertos parámetros.

El principio general del método consiste en emplear un esquema de predicción y corrección, de manera que se puedan encontrar posibles soluciones de una serie de ecuaciones replanteadas incluyendo el parámetro de carga  $\lambda_L$ . Se comienza de una solución conocida, y de allí se predice la siguiente solución para un valor diferente de  $\lambda_L$ , mediante una línea tangente. Luego, se corrige la estimación usando la técnica de Newton Raphson. Los parámetros locales permiten identificar cada punto a lo largo del camino de solución y evitan las singularidades del Jacobiano (González, 2006). Ver Figura 4.

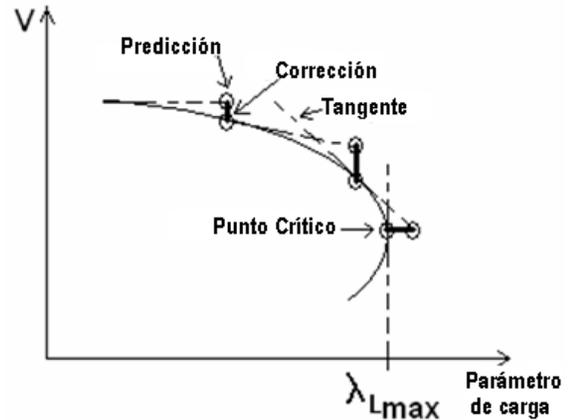


Fig. 4. Método de predicción y corrección. Tomada de (González, 2006).

### 3.4. Implementación usando Borland C++ Builder

C++ Builder es un entorno de desarrollo integrado en lenguaje C++ para Windows. Un entorno de desarrollo integrado (siglas en inglés, IDE) es un programa compuesto por un conjunto de herramientas para un programador. Consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica GUI.

Para (Cortijo, 2009), C++ es un lenguaje complejo con muchas reglas y términos, y el programador debe emplear técnicas de programación orientadas a objetos (P.O.O.).

## 4. APLICACIONES DEL ALGORITMO

El programa se probó mediante sistemas de potencia tipo IEEE. Estos sistemas fueron ejecutados en programas ya conocidos, y de los cuales se tiene absoluta confiabilidad de los resultados que se obtienen.

### 4.1. Flujo de Cargas

- Sistema IEEE 14 Barras. El flujo de cargas de este sistema fue ejecutado mediante el programa y los resultados para las barras se muestran a continuación:

BARRAS Num.	Nombre	Tipo	V  kV	p. u	V <sub>o</sub>
1	BUS-1	100	SL	365.700	1.060 0.00
4	BUS-4	100	PQ	351.081	1.018 -10.36
5	BUS-5	100	PQ	352.021	1.020 -8.75

7	BUS-7	100	PQ	368.309	1.068	-13.89
9	BUS-9	100	PQ	365.391	1.059	-14.54
10	BUS-10	100	PQ	363.541	1.054	-14.81
11	BUS-11	100	PQ	365.166	1.058	-14.76
12	BUS-12	100	PQ	364.087	1.055	-15.26
13	BUS-13	100	PQ	362.585	1.051	-15.30
14	BUS-14	100	PQ	357.985	1.038	-15.86
2	BUS-2	100	PV	360.525	1.045	-4.99
3	BUS-3	100	PV	348.450	1.010	-12.75
6	BUS-6	100	PV	369.150	1.070	-14.45
8	BUS-8	100	PV	376.050	1.090	-13.89

- Sistema IEEE 162 Barras. Este sistema fue ejecutado con el programa y los resultados fueron comparados con el archivo IEEE. El tiempo de ejecución fue óptimo y el margen de error fue despreciable.

#### 4.2. Flujo Continuo

- Sistema IEEE 9 Barras. Los resultados obtenidos del flujo continuado se pueden observar en la [Figura 5](#), [Figura 6](#) y [Figura 7](#).

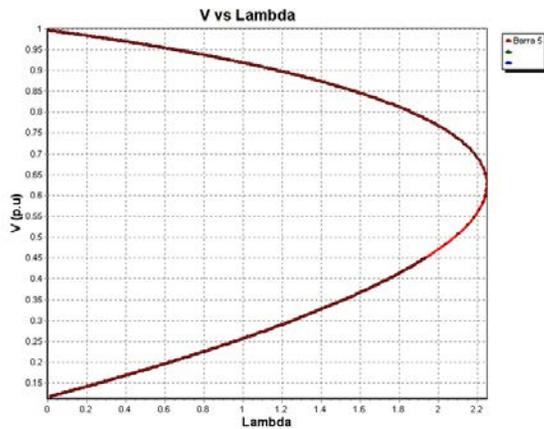


Fig. 5. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

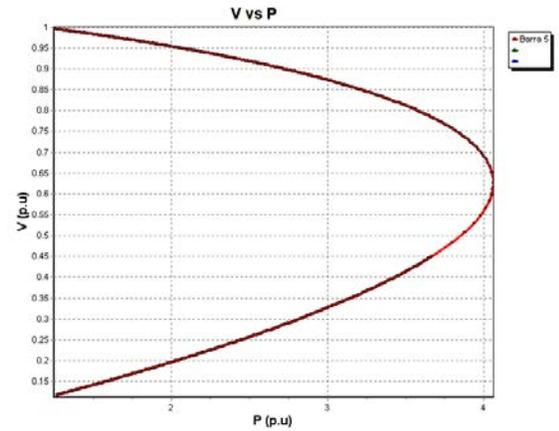


Fig. 6. Curva de V-P de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

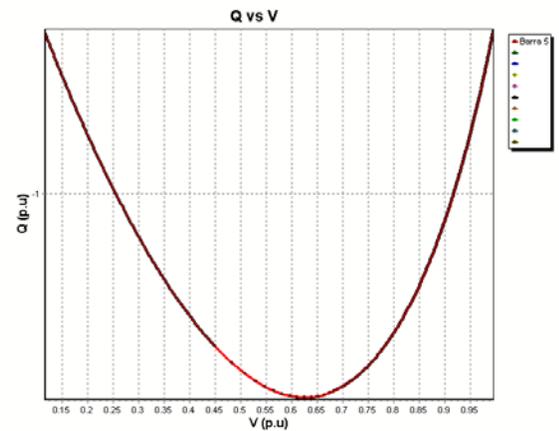


Fig. 7. Curva de Q-V de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

- Sistema IEEE 14 Barras. Este sistema fue ejecutado con el programa y los resultados se muestran en la [Figura 8](#), [Figura 9](#) y [Figura 10](#).

## 5. CONCLUSIONES

Los apagones son fenómenos que han generado interés en el estudio de los sistemas de potencia durante los últimos años, porque a pesar de las diferentes herramientas existentes en el mundo y las grandes investigaciones referentes a la estabilidad de tensión que se han realizado, siguen ocurriendo. Por esta razón, se justifica el desarrollo de esta herramienta, la cual servirá como base para una aplicación rápida y robusta en un futuro.

Los apagones están íntimamente relacionados con el estudio de la estabilidad de tensión. A pesar de que la estabilidad de tensión es un fenómeno dinámico, se puede medir el grado de inestabilidad de tensión de un sistema de potencia utilizando un modelo estático, como lo hace la herramienta desarrollada.

Para la UPB es importante tener herramientas propias, las cuales se pueden modificar para mejorar su funcionamiento sin la necesidad de contar con permisos o licencias. Además, tener herramientas que realicen estudios de estabilidad de tensión, realiza el nombre de la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

La capacidad de la herramienta computacional para leer formatos de tipo IEEE y XML, la hace competitiva en el mercado debido a que son los formatos más empleados para realizar estudios eléctricos actualmente. El formato IEEE está siendo menos utilizado debido a los problemas que se pueden tener en su lectura, sin embargo, se sigue utilizando. Por el contrario, el formato XML se está tornando cada vez más estándar para el intercambio de datos.

La posibilidad de incluir estudios de flujos de potencia teniendo en cuenta los límites de generación de potencia reactiva, constituyen una mejora al programa existente en el grupo de investigación TyD: ASPUPB, lo que permite realizar análisis que se asemejan más a la realidad.

Construir la herramienta mediante el lenguaje C++, permite tener aplicaciones que se pueden implementar en la industria, y para investigaciones de alto nivel.

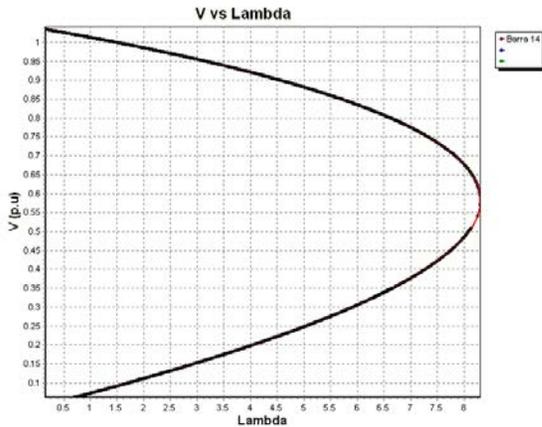


Fig. 8. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

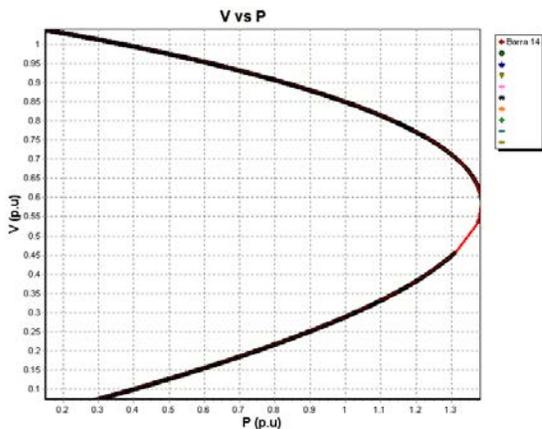


Fig. 9. Curva de  $V-P$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

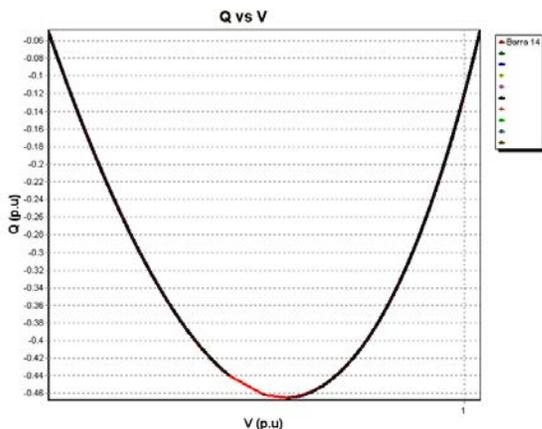


Fig. 10. Curva de  $Q-V$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

## REFERENCIAS

- Bedoya Cadena, A.F. (2009), Propuesta de un Modelo Estándar XML para intercambio de datos de Análisis Eléctrico, XM S.A. ESP, Medellín.
- Cortijo Bon, F.J. y Berzal Galia, F. Curso de C++ Builder [en línea]. <Disponible en: <http://elvex.ugr.es/decsai/builder/>> [consulta:7 Julio 2009].
- Energy Consulting International, Inc. QUICKSTAB AT A GLANCE [en línea] <Disponible en: [http://www.eciqs.com/QuickStab\\_at\\_a\\_Glance.htm](http://www.eciqs.com/QuickStab_at_a_Glance.htm)> [consulta: 9 Junio 2009].
- González Sánchez, J.W. (2006). Voltage Stability Model for HVDC Systems Connected to very weak AC Networks. Trabajo de grado (PhD).
- Kundur, P. (2004). Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions on Power Systems*. New York. Vol.19; pp. 1387-1401.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. *Serie EPRI McGraw-Hill*. USA. Biblioteca UPB.
- Mesa Jaramillo, S., González, J.W., (2003). Simulación Gráfica de Sistemas de Potencia con FACTS en operación simétrica usando MATLAB. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
- Powertech Labs Inc. DSATools Dynamic Security Assessment Software Powertech [en línea]. <Disponible en: <http://www.dsatools.com/>> [consulta: 9 Junio 2009]
- Quintana, V.H.; Miranda D., R. y Vargas D., L. (1999). Voltage collapse scenario in the chilean interconnected system. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14.
- University of Waterloo. Power and Energy Systems Group [en línea] <Disponible en: <http://www.power.uwaterloo.ca/~claudio/software/pflow.htm>> [consulta: 9 Junio 2009]
- Zuluaga López, L.J. y Présiga Duque, R.J. Colapso de Voltaje. Una Experiencia en la Operación del Sistema Eléctrico Colombo-Ecuatoriano. Medellín: Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P.

## SOBRE LOS AUTORES

**Jorge W. González** Ingeniero Electricista de la Univ. Nacional en 1992 y MSc - PhD. en 2003 y 2006 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo y Director de grupo de Investigación TyD, UPB. Trabajó ocho años para HMV Ingenieros. Ha trabajado para Siemens, Erlangen en la sección PTD (FACTS y HVDC). Es investigador invitado del Werner von Siemens laboratory en Univ. Kempten, Alemania y en el Power Systems Institute en Erlangen Univ. Alemania.

**Juan G. Ortega** Ingeniero Electricista graduado en 2009 y Egresado no graduado de Ingeniería Electrónica respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Actualmente es Investigador en la Facultad de IEE.

**Santiago Cadavid C.** Ingeniero Electricista graduado en 2009 y Egresado no graduado de Ingeniería Electrónica respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Actualmente trabaja para HMV Ingenieros.

**Hugo A. Cardona** Ingeniero Electricista y MSc en 1999 y 2005 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 1999. Actualmente adelanta sus estudios de PhD en UPB con la asesoría de Univ. of Kempten, Alemania. Ha trabajado en multiples proyectos industriales.

**Idi A. Isaac** Ingeniero Electricista y MSc en 2000 y 2005 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 2000. Actualmente adelanta sus estudios de PhD en UPB con la asesoría de Univ. of Kempten, Alemania. Ha trabajado en multiples proyectos industriales.

**Gabriel J. Lopez** Ingeniero Electricista y MSc en 2002 y 2007 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asistente de medio tiempo e Investigador en la Facultad de IEE desde 2004. Trabajó para HMV Ingenieros y actualmente es Consultor en Unión Eléctrica Ltda.