

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL BÁSICA PARA EL ANÁLISIS Y  
CONTRIBUCIÓN EN LA PREVENCIÓN DE APAGONES**

**SANTIAGO CADAVID CARVAJAL  
JUAN GONZALO ORTEGA PULGARÍN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN  
2009**

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL BÁSICA PARA EL ANÁLISIS Y  
CONTRIBUCIÓN EN LA PREVENCIÓN DE APAGONES**

**SANTIAGO CADAVID CARVAJAL  
JUAN GONZALO ORTEGA PULGARÍN**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista**

**Director  
JORGE WILSON GONZÁLEZ  
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
MEDELLÍN  
2009**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma**

**Nombre: Hugo Cardona Restrepo**

**Presidente del jurado**

---

**Firma**

**Nombre: Gabriel Jaime López Jiménez**

**Jurado**

**Medellín, 20 de octubre de 2009**

## DEDICATORIA

Juan Gonzalo:

A mis padres por haberme apoyado en toda mi vida académica y darme fuerzas cada día para seguir adelante. Por ellos se hizo posible esta meta en mi vida.

A mi hermano Esteban por enseñarme tantas cosas y estar conmigo en los momentos más difíciles.

A mi tía Marina que siempre me ha apoyado en toda mi vida y ha sido otra madre para mí.

A mi novia Laura por su paciencia y por darme todo su apoyo incondicional en todo momento.

Santiago:

A mis padres y mi hermana por su incondicional apoyo, su amor, su motivación, por ayudarme y brindarme todas las posibilidades para conseguir este logro en mi vida. Porque su gran ejemplo de responsabilidad y disciplina, me encaminó hacia lo que ahora es motivo de orgullo para mí y para ellos, la culminación de este proyecto y de esta etapa.

A mi novia Carolina por su voz de aliento para sacar el proyecto adelante, su amor y su paciencia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a las siguientes personas:

Al Ingeniero Electrónico Juan Carlos Vélez por brindarnos con agrado la asesoría y sus conocimientos para que este trabajo de grado fuera posible.

Al IE PhD Jorge W. González S. por brindarnos toda su experiencia en los análisis de los sistemas de potencia, su amistad y su guía para el desarrollo de este trabajo de grado.

Al IE Msc. Luis Julián Zuluaga y al IE Msc. Ramón León por toda la información brindada.

Al IE Gonzalo Ortega por toda su ayuda incondicional para que este trabajo se hiciera posible.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	16
1. INTRODUCCIÓN A LOS APAGONES OCASIONADOS POR INESTABILIDAD DE TENSIÓN.....	18
1.1. ESTABILIDAD Y CLASIFICACIONES.....	19
1.2. CONCEPTOS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN.....	20
1.2.1. Definición.....	20
1.2.2. Clasificación.....	21
1.2.3. Colapso de tensión.....	22
1.3. CURVAS P-V Y V-Q.....	24
1.3.1. Curvas P-V.....	25
1.3.2. Curvas V-Q.....	26
1.4. ANTECEDENTES NACIONALES Y MUNDIALES .....	27
1.4.1. Interconexión Colombia-Ecuador.....	28
1.4.2. Suecia (Septiembre 23 de 2003).....	30
1.4.3. Atenas (Julio 12 de 2004).....	32
1.4.4. Italia (Septiembre 28 de 2003).....	33
1.4.5. Chile (Mayo de 1997).....	34
1.4.6. Estados Unidos y Canadá (Agosto 14 de 2003).....	35
1.4.7. Francia (Diciembre 1978).....	38
1.4.8. Bretaña (Enero 1987).....	39
1.4.9. Suecia (Diciembre 1983).....	39
1.4.10. Japón (Julio 1987).....	39
1.5. HERRAMIENTAS ACTUALES .....	40
1.5.1. ASPUPB.....	40
1.5.2. QuickStab.....	41
1.5.3. DSATools.....	43
1.5.4. UWPFLOW.....	44

2.	GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DEL ALGORITMO.....	46
2.1.	FORMATOS DE INTERCAMBIO DE DATOS .....	47
2.1.1.	IEEE CDF (Common Data Format).....	47
2.1.2.	ODM (Open Model for Exchanging Power System Simulation Data) .....	49
2.1.3.	CIM (Common Information Model).....	49
2.1.4.	XML (Extensible Markup Language).....	50
2.2.	ALGORITMO PARA LA SOLUCIÓN DEL FLUJO DE CARGAS CON NEWTON-RHAPSON.....	52
2.2.1.	Pasos para la solución del flujo de cargas con el método de Newton-Raphson. ....	57
2.3.	ALGORITMO PARA LA SOLUCIÓN DEL FLUJO DE CARGAS CONTINUADO.....	58
2.3.1.	Predicción de la siguiente solución.....	61
2.3.2.	Parametrización.....	63
2.3.3.	Selección del Parámetro de Extensión. ....	63
2.4.	IMPLEMENTACIÓN USANDO BORLAND C++BUILDER .....	65
2.4.1.	Programación orientada a objetos. ....	65
2.4.2.	Entorno de desarrollo integrado.....	67
2.4.3.	Archivos fuente generados por C++ Builder. ....	70
3.	APLICACIONES Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA.....	72
3.1.	FLUJO DE CARGAS.....	72
3.1.1.	Sistema IEEE 9 Barras. ....	72
3.1.2.	Sistema IEEE 14 Barras. ....	75
3.1.3.	Sistema IEEE 162 Barras. ....	79
3.2.	FLUJO CONTINUADO.....	81
3.2.1.	Sistema IEEE 9 Barras. ....	81
3.2.2.	Sistema IEEE 14 Barras. ....	83
4.	MANUAL DE USUARIO.....	86
4.1.	INSTALACIÓN DEL PROGRAMA.....	86
4.2.	AMBIENTE DE DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	86

4.2.1.	Menú Archivo.....	88
4.2.2.	Menú Ejecutar.....	90
4.2.3.	Menú Opciones.....	92
4.2.4.	Menú Ayuda.....	93
4.3.	VENTANA DE DESARROLLO DEL FLUJO CONTINUADO.....	94
5.	CONCLUSIONES .....	97
	BIBLIOGRAFÍA .....	99
	ANEXOS .....	102

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia .....	20
Figura 2. Curva P-V para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas .....	25
Figura 3. Curva V-Q para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas .....	27
Figura 4. Sistema de Potencia IEEE de 9 barras .....	48
Figura 5. Formato IEEE 9 Barras .....	49
Figura 6. Formato XML .....	51
Figura 7. Sistema para el balance de potencia en una barra .....	52
Figura 8. Inyección y eyección de potencia en una barra .....	55
Figura 9. Método de predicción y corrección.....	59
Figura 10. Entorno de desarrollo integrado de C++ Builder .....	67
Figura 11. Inspector de Objetos de C++ Builder .....	69
Figura 12. Curva de $V-\lambda_L$ de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2.....	81
Figura 13. Curva de $V-P$ de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2.....	82
Figura 14. Curva de $Q-V$ de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2.....	82
Figura 15. Curva de $V-\lambda_L$ de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2 .....	84
Figura 16. Curva de $V-P$ de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2.....	84
Figura 17. Curva de $Q-V$ de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2.....	85
Figura 18. Ventana principal del programa .....	87

Figura 19. Menú Archivo .....	88
Figura 20. Ventana para cargar archivo .....	88
Figura 21. Ventana de diálogo para guardar el reporte del flujo de cargas .....	89
Figura 22. Menú Ejecutar .....	90
Figura 23. Reporte generado por ASPUPB2 de un sistema de 3 barras .....	90
Figura 24. Menú Opciones .....	92
Figura 25. Ventana para cambiar configuraciones .....	92
Figura 26. Menú Ayuda .....	93
Figura 27. Acerca de ASPUPB2.....	93
Figura 28. Ventana de desarrollo del Flujo Continuoado .....	94
Figura 29. Flujo de cargas con PowerWorld del sistema IEEE 9 Barras sin considerar límites de potencia reactiva .....	108
Figura 30. Flujo de cargas con PowerWorld del sistema IEEE 9 Barras considerando límites de potencia reactiva .....	109
Figura 31. Flujo de cargas con ASPUPB del sistema IEEE 9 Barras.....	110
Figura 32. Flujo de cargas con ASPUPB del sistema IEEE 14 Barras.....	113
Figura 33. Curva de $V-\lambda_L$ de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB.....	118
Figura 34. Curva de $V-P$ de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB.....	119
Figura 35. Curva de $Q-V$ de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB.....	120
Figura 36. Curva de $V-\lambda_L$ de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB .....	121
Figura 37. Curva de $V-P$ de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB.....	122
Figura 38. Curva de $Q-V$ de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB.....	123

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Beneficios y características principales de QuickStab.....	42

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: GUÍA EXTERNA FORMATO IEEE.....	102
ANEXO B: SISTEMA DE 4 BARRAS DE LA IEEE EN FORMATO XML .....	106
ANEXO C: FLUJO DE CARGAS DEL SISTEMA IEEE 9 BARRAS OBTENIDAS POR POWERWORLD Y ASPUPB.....	108
ANEXO D: FLUJO DE CARGAS DEL SISTEMA IEEE 14 BARRAS OBTENIDAS POR ASPUPB .....	113
ANEXO E: ARCHIVO IEEE 162 BARRAS .....	116
ANEXO F: FLUJO CONTINUADO DEL SISTEMA IEEE 9 BARRAS CON ASPUPB.....	118
ANEXO G: FLUJO CONTINUADO DEL SISTEMA IEEE 14 BARRAS CON ASPUPB.....	121
ANEXO H: DATOS DEL TRABAJO DE GRADO (ANTEPROYECTO) .....	124
ANEXO I: RESUMEN ACTIVIDADES TRABAJO DE GRADO.....	136
ANEXO J: ARTÍCULO PUBLICABLE .....	137

## GLOSARIO

**ADMITANCIA:** es la inversa de la impedancia. Es la facilidad que ofrece un circuito al paso de la corriente.

**BARRAS:** puntos comunes de conexión de los diferentes circuitos asociados a una subestación (nodo del sistema).

**BARRA PV:** barra de generación también conocida como barra reguladora o barra de tensión controlada con generación.

**BARRA PQ:** barra de carga del sistema de potencia.

**CIDI:** *Centro Integrado para el Desarrollo de la Investigación.* Es el Centro Integrado para el Desarrollo de la Investigación de la Universidad Pontificia Bolivariana.

**CIM:** *Common Information Model.* Formato diseñado con el fin de realizar intercambio de información entre centros de control.

**ESTIMADOR DE ESTADOS:** permite hacer una estimación de los estados (o variables internas) del sistema en función de las entradas y salidas del sistema real.

**FACTS:** *Flexible AC Transmission Systems.* Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna.

**IEEE:** corresponde a las siglas de *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización.

**IMPEDANCIA:** es la oposición que ofrece un circuito al paso de la corriente. Es la relación entre la tensión y la corriente eléctrica.

**MATRIZ JACOBIANA:** es una matriz formada por las derivadas parciales de primer orden de una función.

**ODM:** *Open Model for Exchanging Power System Simulation Data.* Formato diseñado para el intercambio de información.

**OLTC:** *OnLoad Tap Changer.* Cambiador de tomas bajo carga.

**P.O.O:** *Programación Orientada a Objetos.* Es un modelo de programación que usa objetos y sus interacciones para diseñar aplicaciones.

**P.U.:** *Por Unidad.* En la Ingeniería Eléctrica, en el campo de los Sistemas Eléctricos de Potencia, se expresan las cantidades eléctricas como valores en por unidad. El sistema por unidad (pu) de cualquier cantidad se define como la relación entre esta cantidad y la cantidad base y se expresa como un decimal.

**SHUNT:** conexión en derivación.

**SLACK:** barra compensadora de un sistema de potencia, también llamada oscilante. Compensa los desbalances del despacho de generación vs demandas y a la vez compensa las pérdidas del sistema de potencia.

**TyD:** Grupo de investigación en Transmisión y Distribución de la Universidad Pontificia Bolivariana.

**XML:** *Extensible Markup Language.* Lenguaje para el intercambio de datos.

## RESUMEN

Este trabajo de grado 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 y se plantea un manual de usuario para su manipulación.

**PALABRAS CLAVES: APAGONES; LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN; INESTABILIDAD DE TENSIÓN; ESTADO ESTABLE; CONTINGENCIAS**

## INTRODUCCIÓN

Los apagones han ocurrido en el mundo y en Colombia desde hacía 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 economía de un país.

Por esta razón, es importante profundizar en éste importante concepto para luego poder analizar sus orígenes y consecuencias, y así, llegar al tema principal del proyecto que consiste en los apagones debidos a la inestabilidad de tensión. Los antecedentes nacionales y mundiales son temas esenciales que se deben tratar para aclarar el concepto y permitir una familiarización con maniobras reales ocurridas. De esta manera, se procede a desarrollar herramientas con las cuales se pueden analizar los fenómenos de los apagones por la inestabilidad de tensión y hasta poder prevenirlos para obtener una operación más óptima y segura tanto en estado estable como durante contingencias.

En la UPB, el Grupo de investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (T y D), ha estudiado los apagones desde los problemas de estabilidad de tensión. Es así como fue desarrollado el proyecto CIDI: "Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia con sistemas modernos de transmisión", en el que se obtuvo teoría y herramientas computacionales e indicadores de utilidad para el análisis de posibles apagones por inestabilidad de tensión.

Se cuenta entonces con diferentes programas para el análisis de la estabilidad de tensión en Matlab, los cuales poseen un entorno gráfico que facilitan la

interacción del usuario con el programa, pero al hacer análisis de grandes sistemas, el tiempo de ejecución no es el más óptimo.

En el mundo se tienen herramientas que permiten predecir el impacto de las contingencias, por lo que es importante estudiarlas y analizarlas para conocer sus fortalezas y debilidades. Algunas de éstas herramientas son: QuickStab<sup>®</sup>, DSATools<sup>™</sup>: Dynamic Security Assessment, UWPFLOW, entre otros. De esta manera, se logra tener claro los alcances que tendrá el proyecto a la hora de realizarlo.

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 ésta 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 ocurrencia de un apagón a medida que se incrementa la cargabilidad del sistema de transmisión. Se involucra entonces, la necesidad de cuantificar el riesgo pero de una manera rápida, en tiempo real y para múltiples simulaciones fuera de línea.

## **1. INTRODUCCIÓN A LOS APAGONES OCASIONADOS POR INESTABILIDAD DE TENSIÓN**

El problema de los apagones está siendo y ha sido en los últimos años responsable de importantes pérdidas de dinero y lesiones a los sectores productivos y sociales, empeorado por la evidente falta de conocimiento sobre el tema y complicado con una red moderna de transmisión. Por esta razón, en este capítulo se estudia y analiza la teoría en torno al tema de los apagones, el cual está íntimamente relacionado con el estudio de la estabilidad de tensión de los sistemas de potencia.

Se comienza realizando una recapitulación de los conceptos básicos que están relacionados a la estabilidad de tensión, y de esta manera, se logran establecer bases conceptuales sólidas que permiten analizar el problema del colapso de tensión. Para complementar este objetivo, se estudian los orígenes y consecuencias de un apagón, además de revisar y analizar algunos antecedentes nacionales y mundiales con sus respectivos reportes.

Estudiar el funcionamiento básico y debilidades de las herramientas actuales empleadas para el estudio de apagones, incluyendo las desarrolladas en UPB, es un tema de gran importancia que también se tratará en este capítulo para poder desarrollar un proyecto de grandes alcances y tener conocimiento de lo que existe en el mercado actual.

## 1.1. 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.

Cuando ocurre una perturbación en el sistema y éste continúa estable, se alcanza un nuevo estado de equilibrio sin que se afecte la integridad del sistema. También, para ciertas perturbaciones severas, los sistemas que se encuentran interconectados, podrían ser divididos intencionalmente en dos o más islas para conservar la mayor cantidad de generación y carga posible. El sistema ante la perturbación, posiblemente recuperará su estado normal después de la acción de los mandos automáticos y los operadores.

Por otro lado, cuando el sistema es inestable, se entra en una situación en la que gradualmente o inmediatamente éste se caerá.

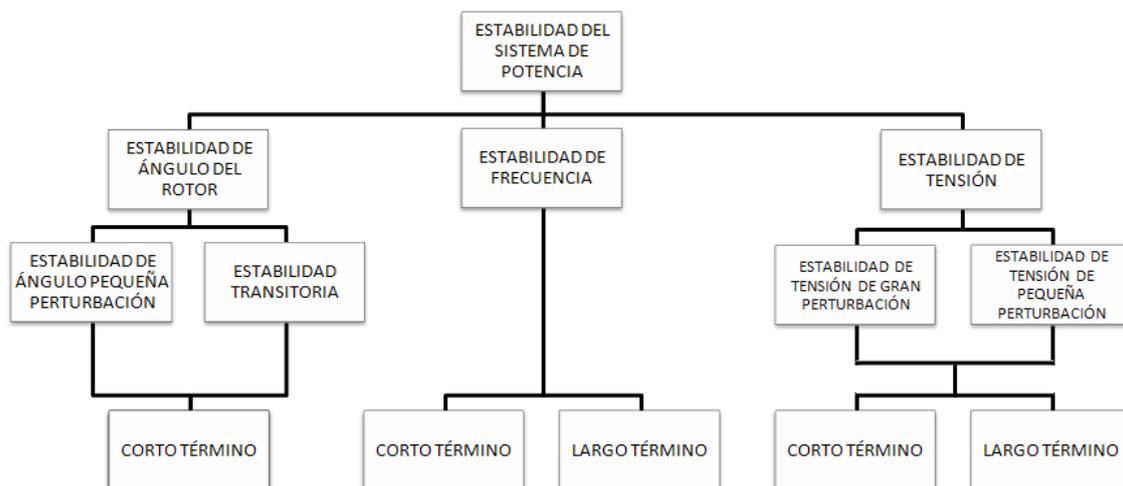
Una condición de inestabilidad puede conducir el sistema de potencia a un apagón o a la pérdida de una gran parte de sus redes.

La estabilidad de sistemas de potencia según IEEE está basada en las siguientes consideraciones:

- La naturaleza física de la inestabilidad es identificada por la variable del sistema principal afectado.
- La magnitud de la perturbación considerada determina el método de cálculo y el modo de predecir la estabilidad.

- El equipo, los procesos y lapsos de tiempo se deben considerar para satisfacer la estabilidad.

Figura 1. Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia



Fuente: KUNDUR, Prabha. Definition and Classification of Power System Stability En: IEEE Transactions on Power Systems. New York. Vol.19 (May 2004); p. 1387.

La Figura 1 muestra las clasificaciones de estabilidad: la estabilidad de ángulo de rotor, la estabilidad de tensión, la estabilidad de frecuencia.

Para desarrollar diseños y procedimientos apropiados de operación, es importante diferenciar las categorías y entender las causas fundamentales del problema.

## 1.2. CONCEPTOS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN

**1.2.1. Definición.** 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.

Un sistema puede llegar a la inestabilidad de tensión cuando ocurre una perturbación, como por ejemplo cuando un aumento de la carga causa una tensión progresiva e incontrolable. La inestabilidad puede ser una caída progresiva o un incremento de tensiones en algunas barras.

**1.2.2. Clasificación.** La estabilidad de tensión en sistemas de potencia involucra la generación, la transmisión, la distribución y las características de la carga.

Las clasificaciones de la estabilidad de tensión se describen a continuación:

*Estabilidad de tensión de gran perturbación:* está relacionada con la capacidad que tiene un sistema de mantener tensiones estables después de grandes perturbaciones, como por ejemplo fallas en el sistema, pérdidas de generación, o contingencias de circuito. Esta capacidad es determinada por el sistema, las características de la carga y la interacción de los sistemas de control y protecciones. Para realizar estos estudios se debe modelar la respuesta no lineal de equipos como motores, transformadores con cambiadores de tomas (taps), y limitadores de corriente para generadores. El período de estudio puede ser desde unos pocos segundos hasta decenas de minutos.

Un criterio para mantener la estabilidad de tensión de gran perturbación, es que las tensiones en todas las barras alcancen niveles aceptables después de presentarse la perturbación y después de que actúen los sistemas de control.

*Estabilidad de tensión de pequeña perturbación:* es la capacidad de un sistema para mantener tensiones estables después de pequeñas perturbaciones, como por ejemplo cambios leves en generación o en carga, pequeñas maniobras en el sistema de potencia como apertura y recierre de líneas e inyecciones de

potencia mecánica en generadores. Esta forma de estabilidad es determinada por las características de cargas y sistemas de control en un tiempo dado. Este concepto es útil para determinar la respuesta del sistema en cualquier instante de tiempo ante pequeños cambios.

Un criterio para mantener la estabilidad de tensión de pequeña perturbación, es aumentar la inyección de potencia reactiva en barras donde se presenten aumentos de magnitud de tensión. En otras palabras, un sistema es inestable, si en al menos una barra del sistema, la magnitud de tensión disminuye y la inyección de potencia reactiva aumenta.

Los problemas de estabilidad de tensión pueden durar unos segundos o decenas de minutos, y éstos pueden ser de corto término o largo término.

*Estabilidad de corto término:* está relacionada con acciones rápidas de carga. El período de interés está en el orden de varios segundos. Los estudios requieren de soluciones de ecuaciones de cálculo diferencial del sistema.

*Estabilidad de largo término:* está relacionada con equipos con respuestas lentas. El período de estudio puede extenderse a varios minutos. Las simulaciones de largo término son utilizadas para el análisis dinámico. Por lo general, los problemas de estabilidad de largo término están determinados por respuestas inadecuadas de equipos, mala coordinación entre control y protección de equipos, o reservas insuficientes de potencia activa o reactiva. En muchos casos, el análisis estático es usado para estimar márgenes de estabilidad, identificar factores que influyen en la estabilidad, y mostrar condiciones del sistema.

**1.2.3. Colapso de tensión.** 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. Un colapso de tensión es más complejo que la inestabilidad local de tensión. 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.

Una secuencia típica de eventos que pueden terminar en un colapso de tensión es la siguiente:

- El sistema de potencia se encuentra con varias unidades generadoras cercanas a los puntos de consumo fuera de funcionamiento. Como consecuencia, algunas líneas de transporte están muy cargadas y quedan pocas reservas de potencia reactiva.
- El causante del colapso de tensión es la pérdida de una línea cargada, lo que provoca una carga adicional en las líneas adyacentes y un mayor consumo de potencia reactiva.
- Inmediatamente baja la tensión en los centros de consumo, y en consecuencia desciende también la carga. Esto beneficia la estabilidad de tensión. Por otro lado, para recuperar la tensión en los terminales de los generadores, el control automático de tensión incrementa la excitación y la aportación de potencia reactiva. Esto genera un flujo adicional de reactiva a través de los transformadores y líneas de los generadores, con la correspondiente caída de tensión. En este punto es probable que los generadores se encuentren cerca de su límite de funcionamiento térmico, tanto por la corriente en el devanado de campo como por la del inducido.
- Las líneas de distribución responden a la bajada de tensión cambiando los taps de los transformadores reguladores, de forma que de 2 a 4 minutos se recupera la tensión y la carga. Esto provoca más flujo por las líneas, mayor caída de tensión en la red de transporte y más demanda de potencia reactiva a los generadores. En un margen de tiempo más

amplio, las cargas resistivas asociadas a termostatos comienzan a recuperarse al detectar un descenso de temperatura.

- Cada generador va alcanzando su límite de aporte de potencia reactiva, establecido por la máxima corriente admisible en el devanado de campo. Cuando este límite se alcanza en un generador, la tensión en sus terminales desciende provocando un incremento de la corriente en el devanado inducido, y un límite adicional de la potencia reactiva para que no se caliente el devanado inducido. La parte de potencia reactiva que se deja de producir se transfiere a otros generadores, agravando su situación. Además, al bajar la tensión, las baterías de los capacitores en paralelo distribuidas por el sistema son menos eficientes.
- El proceso puede provocar una caída amplia y generalizada de tensión. En esta situación puede perderse el sincronismo entre generadores, y llegar a un apagón que puede ser extenso.

### **1.3. CURVAS P-V Y V-Q**

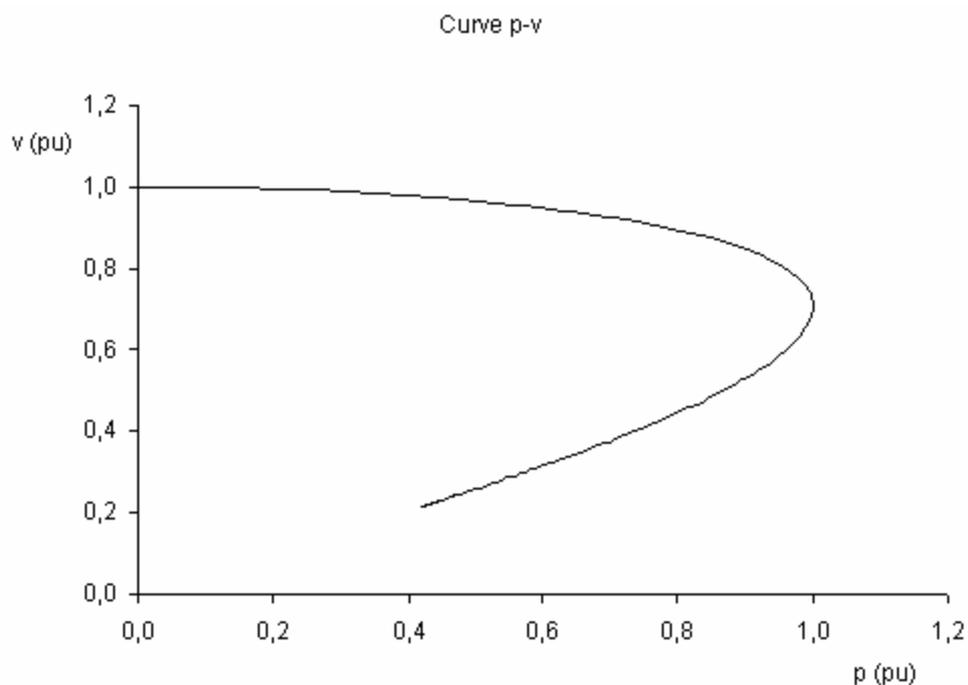
Las simulaciones de flujo de carga son el método de estudio clave para el análisis de la estabilidad de tensión porque se producen "fotos" del sistema de potencia después de un apagón o durante el crecimiento de la carga. Además, existen dos métodos también basados en flujos de carga que son usados para 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. 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.

**1.3.1. Curvas P-V.** Las curvas P-V son útiles para un análisis conceptual de estabilidad de tensión. Sin embargo, la simulación de flujos de carga tiende a divergir cerca de la nariz o el punto máximo de potencia en la curva, lo que genera el principal problema matemático.

Para un análisis conceptual, las curvas P-V son aconsejables cuando las características de las cargas son analizadas en función de la tensión. La tensión correspondiente a la potencia máxima es llamada "tensión crítica". Es común trabajar sobre las curvas basadas en la potencia de cortocircuito.

Una curva P-V para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas es de la siguiente forma:

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



La parte superior de la curva en la Figura 2 corresponde a la operación normal (estabilidad) y la parte inferior es la región de operación anormal (inestabilidad).

**1.3.2. Curvas V-Q.** Las curvas V-Q pueden ser trazadas desde curvas P-V. Para valores constantes de P, se identifican valores de Q y V. La parte de la curva que tiene la pendiente positiva representa las condiciones normales.

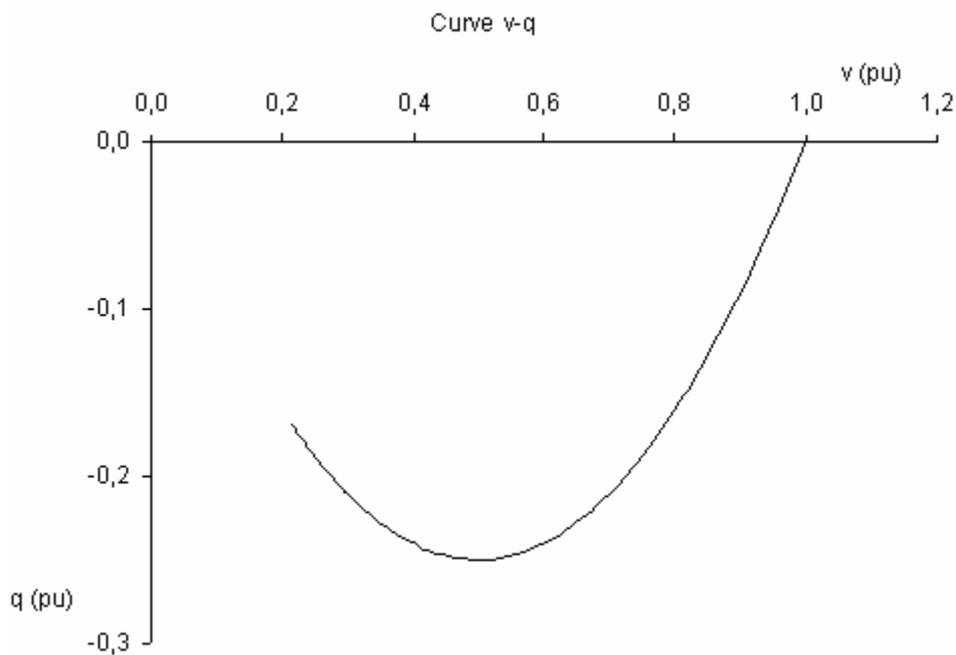
Las curvas V-Q muestran el comportamiento de la tensión en función de la potencia reactiva en una barra.

Las ventajas más significativas de las curvas V-Q son las siguientes:

- La tensión es muy relacionada con la potencia reactiva y muestra el margen de Q en la barra.
- Las características de la compensación reactiva de una barra (capacitores fijos, SVC o capacitores sincrónicos) pueden ser visualizadas directamente en una curva V-Q. El punto de operación sería la intersección de las dos características (con compensación y sin compensación). Esto es bastante útil porque la compensación reactiva es una solución frecuente para problemas de estabilidad de tensión.
- La pendiente de la curva V-Q muestra la fortaleza de la barra (la relación de  $\Delta V$  sobre el  $\Delta Q$ ).
- La potencia reactiva de los generadores puede ser trazada en el mismo gráfico si se quieren dar más detalles. Cuando los generadores alcanzan sus límites de generación (MVA), la pendiente de la curva V-Q se hace menos inclinada.

Una curva V-Q para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas es de la siguiente forma:

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



El lado derecho de la curva en la Figura 3 representa las condiciones normales (estabilidad).

#### 1.4. ANTECEDENTES NACIONALES Y MUNDIALES

Es importante destacar la importancia de garantizar condiciones de estabilidad de tensión en sistemas de potencia para evitar consecuencias desastrosas. Por esta razón, en esta sección se quieren mostrar una serie de incidentes importantes de inestabilidades de tensión que han provocado grandes apagones en Colombia y en el mundo.

**1.4.1. Interconexión Colombia-Ecuador.** La evolución de los mercados de energía en el ámbito mundial y la necesidad de complementar los recursos energéticos entre países, disminuir los costos de suministro y operar bajo reglas más coherentes, ha hecho que se empiece una búsqueda de la eficiencia económica mediante la integración de recursos energéticos. Por esta razón, se ha utilizado la máxima capacidad de la red de transmisión existente incluyendo las interconexiones, y de esta manera se minimiza el impacto de las perturbaciones. Sin embargo, una fracción de las perturbaciones afecta a los países interconectados de diferente manera, con mayor impacto en las zonas de influencia de la interconexión, y en algunos casos se lleva a eventos de evolución impredecible.

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 Zeballos a 69 kV (Ecuador), y luego se perdieron dos unidades de generación en la subestación Gonzalo Zeballos con aproximadamente 140 MW.

La condición de falla sostenida afectó la tensión del Sistema Ecuatoriano hasta la frontera con Colombia, presentando una caída de tensión en Jamondino del orden de 17 kV entre fases. El intercambio evolucionó inicialmente de 230 MW a 90 MW en el transcurso de 1 segundo y luego aumentó hasta un máximo de 345 MW antes de transcurrir 1 segundo adicional, evolucionando a condiciones de colapso de tensión, y por consiguiente, una separación de los sistemas por la actuación de la protección de distancia en Pomasqui.

El Sistema Colombiano no registró perturbación mayor, mientras que el Sistema Ecuatoriano recuperó transitoriamente sus condiciones de equilibrio, y frente a pérdida adicional de generación, colapsó.

El sistema de potencia experimentó colapso de tensión y problemas de estabilidad de ángulo, es decir, pérdida de sincronismo entre los generadores equivalentes.

El fenómeno de colapso de tensión también ha sido provocado por otros eventos. Dos características P-V extractadas de los registros de falla de los eventos de Septiembre 26 de 2003 y Marzo 29 de 2004 en forma comparativa con el evento de Abril 12 de 2004 representan tres condiciones diferentes en la operación de la interconexión y los comportamientos indican que la tensión cae progresivamente y supera un valor crítico sin que sea posible detener esa evolución. Los valores críticos de tensión y los niveles de transferencia son diferentes y los tiempos de evolución del fenómeno también son diferentes en razón de la condición del sistema integrado, de la naturaleza de los eventos y de la respuesta de las fuentes dinámicas y estáticas de potencia reactiva. Esta información constituye una realimentación de la operación para reevaluar los límites de transferencia de la interconexión y reconocer los estados vulnerables.

Durante el período Marzo 2003 – Abril 2004 se presentaron 48 eventos que afectaron la operación de la interconexión Colombia – Ecuador a 230 kV, donde el 47 % de las fallas se presentó en la red de transmisión y el 29 % en la generación, y las otras causas correspondieron a fallas de transformación, maniobras, AGC y atentados. De los eventos de generación, 4 causaron separación de los sistemas. De las ocurrencias, 32 produjeron desatención de demanda.

El colapso de tensión es un comportamiento natural de la interconexión Colombia-Ecuador, ante pérdidas mayores de generación en Ecuador o debido al debilitamiento de la red en la zona de influencia de la interconexión.

**1.4.2. Suecia (Septiembre 23 de 2003).** El sistema Interconectado Nórdico está compuesto por Noruega, Finlandia, Suecia y Dinamarca. Las principales conexiones con el Continente Europeo estaban fuera por mantenimiento.

Un domingo a mediodía, el 23 de Septiembre 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.

**Condiciones de pre-falla:** antes de la perturbación, las condiciones de funcionamiento eran estables. La demanda en Suecia estaba alrededor de 15000 MW, los cuales eran moderados para las condiciones climáticas que se daban en la región.

Algunas líneas de transmisión y generadores en Suecia y Dinamarca se encontraban bajo inspección o mantenimiento.

Dos líneas de 400 kV estaban fuera de servicio debido al trabajo de mantenimiento previsto. De la misma manera, el HVdc entre Polonia y Alemania fue sacado de operación debido a la inspección anual y algunos trabajos menores.

**Pérdida inicial de generación:** A las 12:30 p.m, la unidad 3 en la Central nuclear Oskarshamn pasó de generar 1175 MW a 800 MW debido a problemas internos de la válvula. Por este problema, esta unidad estuvo por fuera alrededor de 10 segundos. Sin embargo, esta contingencia es estándar, es decir, este nivel de severidad de perturbación se puede solucionar sin interrupciones de suministro subsecuente.

Los voltajes en la parte sur se habían caído alrededor de 5 kV, pero habían permanecido dentro de los niveles normales (405-409 kV). La frecuencia automáticamente fue estabilizada por debajo del límite normal de operación de 49.90 Hz.

**Falla en barra:** a las 12:35 p.m, ocurrió una falla en dos barras de una subestación de 400 kV sobre la costa occidental de Suecia. Dos unidades de 900 MW en la central nuclear de Ringhals normalmente alimentan la salida de esta subestación con dos líneas radiales. Una falla sobre la barra debería desconectar sólo una de las dos unidades nucleares.

La falla se debió a un daño en un aislador, el cual fue inspeccionado en marzo de 2003 y no fue descubierto nada irregular. La estructura vertical del aislador se derrumbó y cayó al lado de otra barra paralela poniendo en contacto las dos barras energizadas. Esto encendió un arco entre la barra y las partes del aislador. Después el arco se dirigió a la fase más cercana de la barra y se redujo la distancia de aislamiento entre barras. Por consiguiente, actuaron las protecciones sacando las dos barras del sistema.

**Impactos en el sistema:** la desconexión de las barras provocó una salida total de 1750 MW ocasionando grandes oscilaciones en el sistema, tensiones muy bajas y un nivel de frecuencia alrededor de 49.00 Hz.

Se produjo una sobrecargada sobre el sudeste y partes del sur, por lo que no había capacidad para sostener las tensiones. Como no había generación principal conectada, el apoyo de potencia reactiva era débil.

Durante aproximadamente 90 segundos después de la falla, las oscilaciones desaparecieron y el sistema pareció estabilizarse. Por otro lado, la demanda en el área se recuperó gradualmente de la reducción inicial de tensión por la acción de los numerosos transformadores con cambiadores de taps. Esto bajó la tensión por debajo de los niveles críticos. Finalmente, la tensión se cae en una sección de Estocolmo. La interconexión a Zelanda también fue desconectada.

En total, la pérdida de suministro fue aproximadamente de 3000 MW en Suecia y 1850 MW en Dinamarca. Cuatro millones de personas fueron afectadas durante 1.5 a 6.5 horas.

**1.4.3. Atenas (Julio 12 de 2004).** A partir del 11 de Julio, la planta de 125 MW ubicada en Peloponeso (Megalopoli) y una unidad de generación en el Norte de Grecia fueron sacadas de servicio por mantenimiento. Al perderse la unidad de Megalopoli, la cantidad de potencia que fluía desde Atenas a Peloponeso era muy pequeña (cerca de 80 MW).

***Secuencia de eventos:***

- A las 7:08 del 12 de Julio, la unidad 2 de la central eléctrica Lavrio en Atenas se perdió debido a fallas de UPS en auxiliares. Se produjo la re-sincronización a las 12:01 p.m.
- A las 12:12, se perdió de nuevo la unidad 2 de Lavrio debido al alto nivel de agua en el tambor de vapor. La nueva pérdida de la unidad 2 de Lavrio llevó al sistema a un estado de emergencia y otras centrales eléctricas en Atenas y Grecia Central tuvieron problemas para mantener la demanda de la potencia reactiva.
- A las 12:25 se solicitaron 100 MW por el Centro de Control del Operador de Sistema de Transmisión Helénico (HTSO).
- A las 12:30 se produjo una desconexión de 80 MW, los cuales no eran suficientes para parar la disminución de tensión.
- A las 12:35 se solicitó una desconexión de 200 MW pero no podía ser implementada. La carga alcanzó un pico de 9320 MW.
- A las 12:37 la unidad 3 de la central eléctrica Aliveri en el área débil de Grecia Central fue automáticamente disparada.
- A las 12:38 la unidad restante en Aliveri también fue disparada, pero esta vez fue manual. Después de esto las tensiones se cayeron.

- A las 12:39, el relé de baja tensión desconecta las líneas de 400KV en el Norte y Sur de Atenas y Peloponeso conduciendo al apagón.

**1.4.4. Italia (Septiembre 28 de 2003).** En esta fecha, el sistema de potencia italiano experimentó el apagón más grande ocurrido allí.

El acontecimiento que causó el apagón comenzó a las 3 de la mañana y duró hasta las 3:28 a.m.

El suministro fue restaurado después de tres horas en el Norte del área y durante el mismo día en gran parte de Italia.

La interrupción afectó un área con aproximadamente 60 millones de personas y hubo una variación de carga de aproximadamente 24000 MW a tempranas horas del día, hasta 50000 MW durante la parte central del día.

Se dejaron de entregar aproximadamente 180 GWh.

El sistema de potencia italiano experimentó un colapso combinado de ángulo y tensión después de una serie de eventos de línea en cascada que lo aislaron del sistema interconectado europeo.

El primer evento (una línea fuera de servicio en Suiza) produjo sobrecargas en otras líneas de transmisión y los operadores fallaron para mitigar la sobrecarga en el tiempo asignado. En esta etapa, ocurrieron algunos disparos en generación.

Estos eventos hicieron que el colapso del sistema fuera inevitable.

La inestabilidad de tensión italiana también afectó todos los países circundantes que fueron aumentando la potencia reactiva transferida a Italia y redujeron las tensiones en las barras de interconexión.

Esta inestabilidad de tensión habría sido evitada si se hubiera realizado el proceso de deslastre de carga y la operación de regulación de tensión secundaria en el área afectada, además, se habría alarmado al operador del riesgo de la inestabilidad de tensión por medio de un indicador que actúe junto con el bloqueo automático de los OLTC (On Load Tap Changer) locales y el control en tiempo real de reserva de potencia reactiva disponible.

**1.4.5. Chile (Mayo de 1997).** El sistema de potencia chileno es principalmente radial, prevaleciendo el flujo de potencia en dirección sur-norte.

El colapso de tensión ocurrió a las 11:23 p.m. y el sistema fue recuperado aproximadamente 30 minutos después. Durante el incidente, se perdió aproximadamente el 80% de la carga del sistema.

***Condiciones pre-falla:***

- La carga de sistema total era aproximadamente 2500 MW.
- El flujo de potencia de la parte sur del país a la parte de norte era normal, y cerca de 1000 MW; casi 900 MW se transmitían por las líneas de 500 kV conectadas entre la barras Colbun-Pehuenche y Alto Jahuel (en Santiago), y aproximadamente 100 MW por la línea que une las barras Charrua y Itahue.
- El control de frecuencia de carga estaba siendo sostenido por una unidad de generación, en la barra Colbun-Pehuenche.

***Condiciones de falla:*** la perturbación que inició el incidente fue un disparo de la línea de 154 kV entre Charrua-Itahue, la cual conecta el subsistema del sur con el centro de carga (en Santiago). Los acontecimientos principales de la perturbación ocurrieron en un lapso de tiempo de cuatro minutos:

- A las 11:20 p.m., la línea Charrua-Itahue de 154-kV fue disparada por los dispositivos de protección debido a una sobrecarga. Como consecuencia de esta acción, la potencia total del sur de Chile es transportada por las dos líneas de 500-kV que unen Colbun-Pehuenche y el Alto Jahuel.
- A las 11:21 p.m., las unidades de generación que alimentan la barra Colbun-Pehuenche alcanzan sus límites de excitación.

- A las 11:23 p.m., las dos líneas de 500-kV de Colbun-Pehuenche al Alto Jahuel son disparadas. Esta acción produjo la pérdida de la integridad del sistema, y se forman dos islas.
- A las 11:24 p.m., las dos islas sufren un desbalance severo de potencia activa (1000 MW aproximadamente) y otras líneas son disparadas. Luego, el sistema es dividido en cuatro pequeñas islas, las cuales tienen una pérdida de carga de más del 80% del sistema total.

Hubo intentos infructuosos para restaurar la caída de tensión conectando compensación reactiva, sin embargo, todo fue insuficiente para evitar el colapso.

**1.4.6. Estados Unidos y Canadá (Agosto 14 de 2003).** En esta fecha, 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 y una potencia de 61800 MW de carga eléctrica en los Estados de Ohio, Michigan, Pensilvania, Nueva York, Vermont, Massachusetts, Connecticut, Nueva Jersey y la Provincia Canadiense de Ontario. El apagón empezó unos pocos minutos después de las 4:00 p.m. y la energía no fue restaurada hasta 4 días después en algunas partes de USA. Partes de Ontario sufrieron oscilaciones de apagones por más de una semana, antes de que la energía fuera restaurada totalmente. Los estimativos de costos totales en USA estuvieron en un rango entre 4 y 10 billones de dólares. En Canadá, gran cantidad de productos domésticos cayeron 0.7% en agosto, hubo una pérdida neta de 18.9 millones de horas de trabajo y el envío de manufacturas en Ontario bajó 2.3 billones de dólares canadienses.

Se formó un comité en la Task Force con representantes de USA y Canadá, el cual dividió su trabajo de investigación en dos fases:

- Fase 1: Investigar la interrupción para determinar sus causas y porqué no fueron contenidas.
- Fase 2: Desarrollar recomendaciones para reducir la posibilidad de futuras interrupciones y reducir el alcance de alguna que ocurra.

Una de las características del apagón fue un aparente “colapso de tensión” el cual ocurrió en el sistema de transmisión de los dos países.

El apagón paralizó 263 plantas de potencia (531 unidades) en USA y Canadá.

**Secuencia de eventos:**

- 12:05:44 - 1:31:34 p.m. Salida de generadores:
  - 12:05:44. Unidad 5 de Conesville (capacidad de 375 MW).
  - 1:14:04. Unidad 1 de Greenwood (capacidad de 785 MW).
  - 1:31:34. Unidad 5 de Eastlake (capacidad de 597 MW).
- Desconexión de líneas de transmisión y salida de generación en la central de Michigan:
  - 2:02 p.m. Stuart – Atlanta 345 kV.
  - 3:05:41 p.m. Harding-Chamberlain 345 kV.
  - 3:32:03 p.m. Hanna-Juniper 345 kV.
  - 3:41:33 p.m. Star- Sur de Canton 345 kV.
  - 3:45:33 p.m. Centro de Canton-Tidd 345 kV.
  - 4:06:03 p.m. Sammis-Star 345 kV.
  - 4:08:58 p.m. Galion-Centro de Ohio-Muskingum 345 kV.
  - 4:09:06 p.m. Este de Lima-Centro de Fostoria 345 kV.
  - 4:09:23-4:10:27 p.m. Generación Kinder Morgan (capacidad de 500 MW).
- 4:10:00 - 4:10:38 p.m. Desconexión de las líneas de transmisión entre Michigan y Ohio del norte, salidas de generación entre Michigan del norte y Ohio del norte, y separación de Ohio del norte y Pensilvania:

- 4:10. Harding-Fox 345 kV.
- 4:10:04 – 4:10:45. Veinte generadores a lo largo del Lago Erie en Ohio del norte (capacidad total de 2174 MW).
- 4:10:37. Este-Oeste de Michigan 345 kV.
- 4:10:38. Cogeneración en Venture (capacidad de 1265 MW).
- 4:10:38. Sistema de transmisión que separa el noroeste de Detroit.
- 4:10:38. Perry-Ashtabula-Oeste de Erie 345 kV.
  
- 4:10:40 - 4:10:44 p.m. Desconexión de cuatro líneas de transmisión entre Pensilvania y Nueva York:
  - 4:10:40. Homer City-Watercure 345 kV.
  - 4:10:40. Homer City-Stolle 345 kV.
  - 4:10:41. Sur de Ripley-Dunkirk 230 kV.
  - 4:10:44. Este de Towanda-Hillside 230 kV.
  
- 4:10:41 p.m. Desconexión de línea de transmisión y salida de generación en Ohio del norte:
  - Centro de Fostoria-Galion 345 kV.
  - Unidad nuclear Perry 1 (capacidad de 1252 MW).
  - Unidad del lago Avon 9 (capacidad de 616 MW).
  - Beaver-Davis Besse 345 kV.
  
- 4:10:42 - 4:10:45 p.m. Desconexión de las líneas de transmisión en Ontario del norte y Nueva Jersey, separación de la parte de noreste y la Interconexión Oriental:
  - 4:10:42. Salida de la Unidad 3 de Campbell (capacidad de 820 MW).
  - 4:10:43. Keith-Waterman 230 kV.
  - 4:10:45. Wawa- Marathon 230 kV.
  - 4:10:45. Branchburg-Ramapo 500 kV.

- 4:10:46 - 4:10:55 p.m. Nueva York se separa de este a oeste. Nueva Inglaterra (excepto el sudoeste de Connecticut) y Maritimes se separan de Nueva York y permanece intacta:
  - 4:10:46 - 4:10:55. Se desconectan las líneas de transmisión entre Nueva York y Nueva Inglaterra.
  - 4:10:48. Se separa Nueva York de Este a oeste.
  
- 4:10:50 - 4:11:57 p.m. Ontario se separa de Nueva York. Se separa el sudoeste de Connecticut de Nueva York y apagones:
  - 4:10:50. Ontario se separa de Nueva York.
  - 4:11:22. Long Mountain – Plum Tree 345 kV.
  - 4:11:57. Separación entre Ontario y el Este de Michigan.
  
- 4:13 p.m. Secuencia en cascada completa.

**1.4.7. Francia (Diciembre 1978).** Un descenso de temperatura no previsto provocó un importante incremento de carga (4600 MW en 1 hora) principalmente en la zona de París, que sobrecargó todo el sistema de 400 kV debido a la necesidad de traer potencia desde zonas alejadas del Este del país, y provocó tensiones bajas en toda la red.

Se intentó solucionar el problema bloqueando los automatismos de los reguladores bajo carga de transformadores de primario de 400 kV, que habitualmente mantienen la tensión en valores constantes en la red de 230 kV. No se consiguió controlar totalmente el descenso de tensión, y comenzaron a operar las protecciones de sobrecarga en las diversas líneas del sistema.

El resultado final fue la salida de servicio de una gran parte de la red y el peor apagón de Francia en la postguerra.

El fenómeno total se desarrolló durante algo más de una hora, y un intento desafortunado de re-energización (trayendo potencia esta vez desde el Oeste del país) provocó un segundo gran colapso.

**1.4.8. Bretaña (Enero 1987).** Se produjo una falla intempestiva de tres unidades generadoras en la central de Cordennais. Trece segundos después el último generador de la central sale de servicio a causa del excesivo calentamiento del rotor provocado por el intento de mantener el suministro de potencia reactiva a la red. Esta última falla da inicio a un fenómeno de colapso de tensión en la zona.

Dado que la frecuencia no varió significativamente, no actuaron los relés de deslastre de carga por sub-frecuencia.

El colapso se controló varios minutos después mediante el deslastre manual de carga.

**1.4.9. Suecia (Diciembre 1983).** El problema se inició con una falla en la subestación que alimenta la zona de Estocolmo, y que alimenta 2 de las 7 líneas de 400 kV que alimentan Estocolmo desde las centrales hidráulicas del Norte.

Las 5 líneas de 400 kV restantes se sobrecargaron, pero el sistema sobrevivió hasta que los automatismos de los cambiadores bajo carga de los transformadores en la zona de Estocolmo comenzaron a tratar de mejorar la tensión en las cargas. Esto provocó un aumento en la carga que esta vez no fue soportada por las líneas de 400 kV, por lo que fueron disparadas por relés de sobrecarga o relés de distancia (que “ven” el aumento de corriente y disminución de tensión como si fueran cortocircuitos en las líneas). La zona de Estocolmo quedó aislada, y el déficit de generación no pudo ser resuelto por los esquemas de deslastre de carga por sub-frecuencia, provocando un apagón total en esa zona durante 1 hora.

La duración total desde la falla inicial hasta el colapso fue del orden de 1 minuto.

**1.4.10. Japón (Julio 1987).** Se produjo un aumento de demanda muy por encima de lo previsto en un día inusualmente caluroso.

A pesar de que entraron en servicio todos los bancos de condensadores disponibles, la tensión comenzó a bajar, y en aproximadamente 10 minutos (con tensiones del orden de 0.75 p.u) la actuación de los relés provocó la salida de servicio de 3 estaciones de 500 kV, y un apagón importante en la zona de Tokyo.

Se cree que la característica potencia-tensión de la carga fue un factor decisivo en el colapso.

Los incidentes descritos tienen algunas características comunes:

- Las perturbaciones que los provocan pueden ser importantes (salidas de líneas, generadores, etc.) o no (aumentos progresivos de carga).
- Se mantiene por un cierto tiempo el suministro de las cargas sin variaciones relevantes de frecuencia.
- Son fenómenos lentos, por lo que tienen tiempo de actuar los automatismos lentos de control de tensión.
- Se terminan produciendo caídas de tensión más allá de lo esperado.
- El despeje final de los incidentes lo realizan relés convencionales.

## **1.5. HERRAMIENTAS ACTUALES**

Existen diferentes herramientas computacionales que permiten predecir el impacto de las contingencias y es importante conocer su funcionamiento analizando sus fortalezas y debilidades.

**1.5.1. ASPUPB.** Es un programa de la Universidad Pontificia Bolivariana que se realizó utilizando la herramienta Matlab y desarrollado por el grupo de investigación TyD de la misma universidad. En principio comenzó como un programa para el análisis de los sistemas de potencia en donde se corrían flujos de carga, realizaban estudios de FACTS, entre otros.

Con estudios posteriores, se fueron agregando funciones que permitían hacer estudios más detallados de los sistemas, como el caso de la estabilidad transitoria y el flujo continuado para la estabilidad de tensión.

Se contó entonces con un programa que permitía el análisis de la estabilidad de tensión y un entorno gráfico para facilitar la interacción del usuario con el programa.

Es importante destacar que con programas desarrollados a través del grupo de investigación TyD, se tiene la posibilidad de ir mejorando y agregando funciones que lo van convirtiendo en una herramienta muy completa en el momento de analizar sistemas de potencia.

Las debilidades de este programa comienzan cuando se quieren analizar grandes sistemas de potencia porque el tiempo de ejecución no es el más deseado pensando en su aplicabilidad en centros de control, en donde deben tomarse decisiones rápidas con el fin de evitar apagones y otros tipos de problemas derivados del estudio de la estabilidad de tensión de un sistema de interconexión. Tampoco es posible, con este programa, especificar los límites de potencia reactiva (Q), en los que se deben mantener las barras del sistema de potencia.

**1.5.2. QuickStab.** Desarrollado por la empresa Energy Consulting International, Inc. de Estados Unidos. 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. Dado un flujo de potencia o estimación de estado, utiliza un método de estabilidad de tensión para calcular, tanto la cargabilidad máxima como la potencia que puede ser transferida dentro de un margen de seguridad predefinido en un área determinada, también, identifica máquinas que pueden causar inestabilidad, identifica las barras críticas en la red y ordena los generadores y las interconexiones en función de su impacto sobre la

estabilidad. Ejecuta cálculos de estabilidad a nivel de barra, identificando las críticas y mostrando el impacto de los generadores sobre éstas.

Las características y beneficios principales de esta herramienta, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Beneficios y características principales de QuickStab

Características	Beneficios
<p>Cuantifica el riesgo de apagón ejecutando análisis de estabilidad estática y de tensiones a nivel del sistema:</p> <p>Calcula la distancia hasta el punto donde las tensiones colapsan y los generadores pueden salir fuera de sincronismo.</p> <p>Detecta regímenes operativos con insuficiente margen de seguridad.</p>	<p>Permite:</p> <p>Despachar el sistema eléctrico de manera segura y confiable, facilitando, al mismo tiempo, las actividades del mercado eléctrico.</p> <p>Aumentar la potencia transportada en la red de transmisión sin causar apagón.</p>
<p>Evaluación dinámica de contingencias simples y múltiples, de generadores y equipos de transmisión – empezando con flujo completo Newton-Raphson y continuando con toda la secuencia de cálculos de estabilidad estática y de tensión.</p>	<p>Permite ejecutar cálculos de estabilidad de tipo <i>what-if</i> para identificar contingencias que pueden reducir la reserva de estabilidad abajo de límites aceptables.</p>
<p>Determina el impacto de generadores y líneas de interconexión sobre la cargabilidad máxima de la red.</p>	<p>Facilita el desarrollo de estrategias preventivas y/o correctivas.</p>
<p>Excelente eficiencia del algoritmo y gran rapidez computacional.</p>	<p>Soporta toma de decisión rápida en tiempo real y cuando se evalúan múltiples escenarios fuera de línea.</p>
<p>Utilización extensiva de gráficos intuitivos.</p>	<p>Tanto la interpretación de los resultados como la utilización del programa son muy sencillas.</p>
<p>Extensiones de Tiempo-Real QuickStab.</p>	<p>Permite integración instantánea con cualquier sistema SCADA/EMS, nuevo o existente.</p>

Fuente: Energy Consulting International, Inc. "QUICKSTAB AT A GLANCE". En: Advanced Software Tools for Power System Stability Monitoring and Analysis [ en línea ]. <Disponible en: [http://www.eciqs.com/QuickStab\\_at\\_a\\_Glance.htm](http://www.eciqs.com/QuickStab_at_a_Glance.htm)> [consulta: 9 Jun. 2009].

QuickStab ha sido implementado en programación de operaciones, despacho de tiempo real, operación de mercados eléctricos, y planeamiento de transmisión en los Estados Unidos, Latinoamérica, Europa y Asia.

**1.5.3. 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. Incluye herramientas como:

PSAT: Herramienta para flujos de carga y análisis de corto circuito.

VSAT: Herramienta de evaluación de la seguridad de tensión.

TSAT: Herramienta de evaluación de la seguridad transitoria.

SSAT: Herramienta para el análisis de pequeña señal.

Los software proporcionan a los operadores de red información importante acerca de los límites de seguridad del sistema, contingencias críticas y las medidas correctoras necesarias para evitar fallas del sistema.

VSAT es una herramienta de análisis para la evaluación de la seguridad global de tensión. Incluye la especificación de tensión con criterios de seguridad y está diseñado para manejar un gran número de contingencias y transferencias de energía.

***Aplicaciones:***

- Estudios de planificación de potencia reactiva.
- Estudios de planificación operacional (límite de evaluación de la seguridad).
- Evaluación de seguridad de la tensión.
- Cualquier análisis que tenga:
  - Evaluación de sobrecarga térmica.
  - Determinación de los límites de seguridad de tensión.
  - Evaluación de los márgenes de estabilidad necesarios.

**Características:**

- Cálculo de los límites de transferencia y los márgenes de estabilidad de tensión (curvas P-V y curvas V-Q).
- Especificación de criterios de seguridad incluyendo:
  - Margen de estabilidad de tensión.
  - Reservas de potencia reactiva.
  - Sobrecargas térmicas.
- Detección eficiente de gran número de contingencias para el análisis de la estabilidad de tensión.
- Medidas correctivas para la prevención de colapsos.
- Reportes de los estudios realizados.
- Diferentes formatos comerciales para los flujos de carga.
- Interfaz gráfica de fácil uso para la configuración de datos, funcionamiento del programa y análisis de resultados.

**1.5.4. 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. Está escrito en C y C++, y tiene disponibles dos versiones para Windows 95/98/XP/Vista y UNIX que incluyen ejemplos y un breve tutorial.

Es proporcionado sin costo alguno para propósitos de prueba y no puede ser utilizado para aplicaciones comerciales. También genera una serie de archivos de salida que permiten hacer nuevos análisis. Es desarrollado por Claudio Cañizares perteneciente al Power & Energy Systems Group de la Universidad de Waterloo de Canadá que es uno de los mayores grupos de investigación en ingeniería eléctrica en América del Norte.

Es un instrumento de investigación diseñado para calcular los límites del sistema de potencia. Genera una serie de archivos de salida que permiten un

análisis más detallado, como soluciones de flujos de carga e índices de estabilidad de tensión.

El programa lee datos de flujo de potencia en formatos de WSCC/BPA/EPRI o el formato IEEE común.

El problema más grande con los software mencionados es no poder agregar funciones que se puedan necesitar en un futuro, a diferencia del ASPUPB, que al ser un software propio, se le pueden hacer las modificaciones necesarias con proyectos futuros sin ningún problema.

Además, se debe tener en cuenta que para realizar estudios con los software desarrollados por otras entidades, se deben tener licencias que implican un costo adicional para la universidad.

## 2. GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DEL ALGORITMO

El problema del intercambio de datos entre dos o más entidades, o usuarios en el sector eléctrico usando un formato de fácil acceso y comprensión, es tal vez un problema universal. Además, la comprensión o el acceso correcto a estos datos suponen un reto para las aplicaciones de software que requieran esta información.

Por esta razón, existen diferentes formatos que permiten el intercambio de datos. En este capítulo se pretende investigar y analizar las fortalezas y debilidades de algunos de éstos y así poder escoger el formato o los formatos que leerá el software.

El desarrollo del software debe hacerse pensando en qué tan lejos se puede encontrar una red de transmisión de un estado en el cual podría ocurrir un apagón. Se ha identificado que una medida adecuada y simple para alcanzar esta meta es calcular la distancia a la inestabilidad de estado estable, también conocida como reserva de estabilidad estacionaria y que puede ser rápidamente calculada empleando simplificaciones adecuadas. Los resultados prácticos alcanzados con esta técnica, señalan que es viable la obtención de una herramienta para estudios en tiempo real y fuera de línea. Para análisis en tiempo real, la herramienta de software obtiene la información de la red a través de un archivo creado por el estimador de estados (definido en el glosario), y de esta manera, se determina si existe el riesgo de un apagón. Por esta razón, es importante que el software realice el flujo de cargas convencional y el flujo continuado de un sistema de potencia, pues de ésta manera se contribuye a la intención de obtener una herramienta que permita la prevención de los apagones.

## 2.1. FORMATOS DE INTERCAMBIO DE DATOS

Uno de los mayores problemas de 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.

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 estén en capacidad de leer 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. Estos formatos se limitan solo a la presentación de la información dejando a un lado los intercambios de datos con otras aplicaciones. Otro inconveniente es la poca documentación existente sobre éstos.

Existe un formato llamado 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.

**2.1.1. IEEE CDF (Common Data Format).** Es un archivo de texto plano que contiene una guía externa para poder ser leído por un usuario (ver [ANEXO A](#)). En esta guía se indica por medio de columnas y filas a que corresponde el valor numérico que se localiza en el escrito.

La información se divide en 2 elementos: bus (barras) y branch (líneas). Con estos dos elementos se describe todo el sistema eléctrico, reduciendo en su mínima expresión todos sus componentes.

En los elementos tipo bus, se encuentra información referida a las barras del sistema, mostrando la potencia activa y reactiva de carga y generación, además de las tensiones con sus respectivos ángulos.

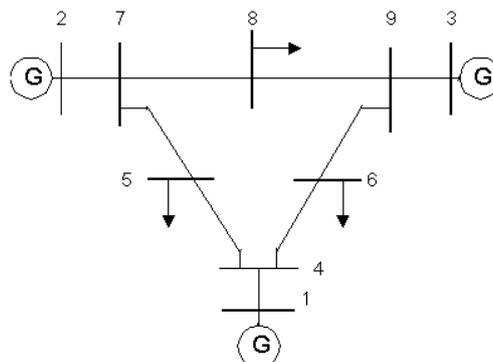
En los elementos tipo branch, se encuentra la información de las líneas de transmisión y los transformadores (bidevanados y tridevanados).

Los inconvenientes más relevantes de este formato son:

- Poca flexibilidad. No se puede agregar nueva información porque se perdería el formato, lo que ocasionaría errores de lectura.
- Falta de información. El sistema de potencia se reduce a dos elementos, lo cual no es conveniente porque no se entra en detalle de los componentes del sistema.
- Difícil comprensión. El usuario necesita conocer una guía para comprender lo que muestra el formato.
- Pueden aparecer múltiples errores a la hora de ser leído por un programa debido a la ubicación errónea de los datos.

Un ejemplo de un formato IEEE puede ser el sistema de potencia de 9 Barras mostrado en la Figura 4.

Figura 4. Sistema de Potencia IEEE de 9 barras



Fuente: ANDERSON, P.M. y FOUAD, A.A. Power System Control and Stability. En: THE IOWA STATE UNIVERSITY PRESS, AMES, IOWA, U.S.A. (1977); p. 38.

Figura 5. Formato IEEE 9 Barras

```

00/00/01          100.0 0 0 0
BUS DATA FOLLOWS          9 ITEMS
1 BUS-1 100 1 1 3 1.04 0. 0. 0. 71.6410227.04592 100. 1.04 999900 -99990 0. 0.
2 BUS-2 100 1 1 2 1.025 9.28 0. 0. 163. 6.65366 100. 1.025 999900 -99990 0. 0.
3 BUS-3 100 1 1 2 1.025 4.6647 0. 0. 85. -10.8597 100. 1.025 999900 -99990 0. 0.
4 BUS-4 100 1 1 1.025 -2.216 0. 0. 0. 0. 100. 1. 0. 0. 0. 0.
5 BUS-5 100 1 1 0.995 -3.988 125. 50. 0. 0. 100. 1. 0. 0. 0. 0.
6 BUS-6 100 1 1 1.012 -3.687 90. 30. 0. 0. 100. 1. 0. 0. 0. 0.
7 BUS-7 100 1 1 1.025 3.7197 0. 0. 0. 0. 100. 1. 0. 0. 0. 0.
8 BUS-8 100 1 1 1.015 0.7275 100. 35. 0. 0. 100. 1. 0. 0. 0. 0.
9 BUS-9 100 1 1 1.032 1.9667 0. 0. 0. 0. 100. 1. 0. 0. 0. 0.
-999
BRANCH DATA FOLLOWS          9 ITEMS
4 1 1 1 2 0. 0.0576 0. 0 0 0 0 0 0 1. 0 0 0 0 0 0
7 2 1 1 2 0. 0.0625 0. 0 0 0 0 0 0 1. 0 0 0 0 0 0
9 3 1 1 2 0. 0.0586 0. 0 0 0 0 0 0 1. 0 0 0 0 0 0
7 8 1 1 0.0085 0.072 0.149 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9 8 1 1 0.0119 0.1008 0.209 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7 5 1 1 0.032 0.161 0.306 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9 6 1 1 0.039 0.17 0.358 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5 4 1 1 0.01 0.085 0.176 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
6 4 1 1 0.017 0.092 0.158 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
-999
LOSS ZONES FOLLOWS 0 ITEMS
-99
INTERCHANGE DATA FOLLOWS 0 ITEMS
-9
TIE LINES FOLLOWS 0 ITEMS
-999
END OF DATA

```

### 2.1.2. ODM (Open Model for Exchanging Power System Simulation Data).

Es un formato basado en el IEEE CDF, diseñado para el intercambio de información. Es implementado por la InterPSS Community\* y es un formato que permite conocer información de sistemas eléctricos, como el análisis de flujo de carga, análisis de fallas o corto circuito y análisis de estabilidad transitoria.

El sistema de potencia es descrito empleando una clasificación de dos listas, la primera de barras (BusList) y la siguiente de líneas (BranchList).

### 2.1.3. CIM (Common Information Model).

Es un modelo estandarizado por la IEC (International Electrothechnical Commision) y diseñado con el fin de realizar intercambio de información entre centros de control.

---

\* InterPSS Community es una comunidad dedicada al desarrollo de software empleando la tecnología que brinda el internet para simular sistemas eléctricos de potencia.

Este modelo es mucho más complejo que el IEEE CDF porque muestra objetos, atributos y clases. Un objeto representa un componente del sistema eléctrico de potencia y una clase agrupa a varios objetos según sus características o atributos.

Para el intercambio de información CIM, se utiliza un lenguaje gráfico (UML\* ), con el objeto de especificar y visualizar la forma como está constituido el estándar.

El mayor problema con este formato es su complejidad y la cantidad de información que maneja, lo que hace más difícil su implementación para los fines operacionales.

**2.1.4. XML (Extensible Markup Language).** Es un formato para el almacenamiento de datos de manera estructurada, que poco a poco se está estandarizando y son cada vez más las aplicaciones que lo están utilizando.

Es desarrollado por el World Wide Web Consortium (W3C) que utiliza etiquetas para marcar, describir, clasificar y organizar información de una manera específica.

La tecnología XML almacena los datos de una manera sencilla y ocupando poco espacio en memoria. La mayoría de navegadores de Internet permiten observar el contenido de los archivos XML de forma estructurada permitiendo visualizar la información en forma de árbol. Existen lenguajes de programación para el desarrollo de aplicaciones que tienen la capacidad de leer la información que contienen los documentos XML de manera ágil, sencilla y confiable.

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.

---

\* UML (Unified Modeling Language), lenguaje unificado de modelado, es un lenguaje gráfico empleado para visualizar, especificar, construir y documentar un sistema de software.

Las etiquetas usadas por XML tienen la siguiente estructura:

<Etiqueta>INFORMACION</Etiqueta>

Las ventajas más relevantes del formato XML 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 información de un documento XML se puede apreciar mejor abriendo el documento con un navegador de Internet, así como muestra la Figura 6.

Figura 6. Formato XML

```
- <PSDX:System xmlns:PSDX="http://www.PSDataExchange.org/PSDataExchange" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:schemaLocation="\\Cndras01
\BasesIq\PowerFactory13\Gerenciador\SchemaPSDataExchangeV1.xsd">
+ <PSDX:Info>
- <PSDX:BusYardList>
+ <PSDX:BusYard Id="StaStation4" Name="Station4" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaSta1" Name="Station 2" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaSta2" Name="Station 3" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaSta3" Name="Station 9" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaSta4" Name="Station 6" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm1" Name="Terminal 1" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm10" Name="Terminal 10" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm11" Name="Terminal 11" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm12" Name="Terminal 12" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm13" Name="Terminal 13" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm14" Name="Terminal 14" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm5" Name="Terminal 5" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm8" Name="Terminal 8" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm1a" Name="Terminal 1a" Area="Sis01">
+ <PSDX:BusYard Id="StaTerm2a" Name="Terminal 2a" Area="Sis01">
</PSDX:BusYardList>
+ <PSDX:XtrfList>
- <PSDX:LineList>
+ <PSDX:Line Id="Lin_1-2" Name="Line 1-2" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_1-5" Name="Line 1-5" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_10-11" Name="Line 10-11" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_12-13" Name="Line 12-13" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_13-14" Name="Line 13-14" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_2-3" Name="Line 2-3" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_2-4" Name="Line 2-4" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_2-5" Name="Line 2-5" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_3-4" Name="Line 3-4" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_4-5" Name="Line 4-5" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_6-11" Name="Line 6-11" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_6-12" Name="Line 6-12" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_6-13" Name="Line 6-13" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_9-10" Name="Line 9-10" Area="Sis01">
+ <PSDX:Line Id="Lin_9-14" Name="Line 9-14" Area="Sis01">
</PSDX:LineList>
+ <PSDX:AreaList>
</PSDX:System>
```

## 2.2. ALGORITMO PARA LA SOLUCIÓN DEL FLUJO DE CARGAS CON NEWTON-RHAPSON

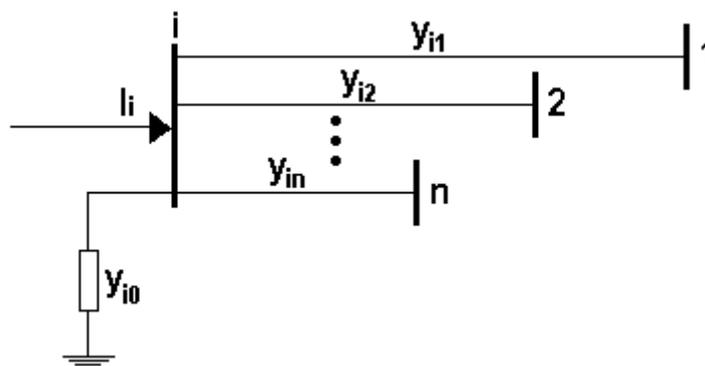
Newton-Raphson es un método muy avanzado para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales. Parte de la estimación de una solución y de allí, iterativamente trata de converger la solución definitiva.

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 lo “pesado” computacionalmente 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.

Para realizar el flujo de cargas a partir de este método, se comienza utilizando la ecuación de balances de potencia en cada barra para el sistema mostrado en la Figura 4.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (1)$$

Figura 7. Sistema para el balance de potencia en una barra



Donde:

$I_i$ : corriente que entra a la barra  $i$ .

$Y_{ij}$ : admitancia de las línea conectada entre las barras  $i$  y  $j$ .

$V_j$ : tensión en la barra  $j$ .

La potencia aparente,  $S_i$ , que se inyecta a la barra  $i$  se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} S_i &= V_i I_i^* \\ S_i^* &= V_i^* I_i \end{aligned} \quad (2)$$

Se sabe que:

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (3)$$

Donde:

$P_i$ : potencia activa inyectada en la barra  $i$ .

$Q_i$ : potencia reactiva inyectada en la barra  $i$ .

Reemplazando las ecuaciones (1) y (3) en (2) se tiene:

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= V_i^* I_i \\ P_i - jQ_i &= V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \end{aligned} \quad (4)$$

Las variables en forma polar son:

$$\begin{aligned} V_i &= |V_i| \angle \delta_i \\ Y_{ij} &= |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} \\ V_j &= |V_j| \angle \delta_j \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

$\delta_i$  y  $\delta_j$ : ángulos de  $V_i$  y  $V_j$  respectivamente.

$\theta_{ij}$ : ángulo de la admitancia  $Y_{ij}$ .

Reemplazando (5) en (4):

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} |V_j| \angle \delta_j$$

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \angle (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (6)$$

Así se llega a las ecuaciones para hallar  $P_i$  y  $Q_i$ , las cuales se llamarán en el proceso de iteraciones  $P$  calculada y  $Q$  calculada.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (7)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \text{Sen}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

El sistema de ecuaciones linealizado después de aplicar series de Taylor es:

$$\begin{bmatrix} J(|V_i|, |V_j|, \delta_i, \delta_j) \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\delta] \\ - \\ - \\ [\Delta|V|] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Delta C] \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde:

$J( )$ : Jacobiano del sistema de potencia.

$[\Delta\delta]$ : submatriz de deltas de ángulos (residuos).

$[\Delta|V|]$ : submatriz de deltas de magnitudes de tensiones (residuos).

$[\Delta C]$ : [  $[C]$ -[f] ]: potencias netas ( $P, Q$ ) en cada barra.

$\Delta C_i = P_{i \text{ programada}} - P_{i \text{ calculada}}$

$\Delta C_i = Q_{i \text{ programada}} - Q_{i \text{ calculada}}$

La convención que se llevará a cabo para la inyección y eyección de potencia en una barra se muestra a continuación:

Figura 8. Inyección y eyección de potencia en una barra



Eyección es equivalente a inyectar Si negativa (-Si).

Como la barra Slack es una barra compensadora, se tiene inicialmente un sistema de ecuaciones para n-1 barras. Se supone que la barra Slack es la número 1.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \hline \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde:

$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \vdots \end{bmatrix}$ : residuos de potencias nodales. El objetivo es que se hagan

aproximadamente igual a cero según el criterio de convergencia

$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$  Jacobiano de tamaño (n-1)\*(n-1)

$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \\ \vdots \end{bmatrix}$ : residuos de las variables del sistema de potencia

Las magnitudes de tensión en las barras PV son datos conocidos, entonces se eliminan las filas y columnas respectivas a esa barra por lo que el tamaño del Jacobiano queda de (2n-2-m)\*(2n-2-m) para m barras PV.

Los elementos del Jacobiano se calculan de la siguiente manera:

Elementos de  $J_1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \text{Sen}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (11)$$

Elementos fuera de la diagonal ( $j \neq i$ )

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \text{Sen}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (12)$$

Elementos de  $J_2$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \left[ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \text{Cos}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \right] + 2|V_i| |Y_{ii}| \text{Cos}\theta_{ii} \quad (13)$$

Elementos fuera de la diagonal ( $j \neq i$ )

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \text{Cos}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (14)$$

Elementos de  $J_3$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \text{Cos}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (15)$$

Elementos fuera de la diagonal ( $j \neq i$ )

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \text{Cos}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (16)$$

Elementos de  $J_4$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \left[ - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \text{Sen}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \right] - 2|V_i| |Y_{ii}| \text{Sen}\theta_{ii} \quad (17)$$

Elementos fuera de la diagonal ( $j \neq i$ )

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \text{Sen}(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (18)$$

Se sigue la metodología numérica de Newton-Raphson. Los términos  $\Delta P_i^{(k)}$ ,  $\Delta Q_i^{(k)}$  son los residuos de potencia (criterio de convergencia):

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i \text{ programada}} - P_i^{(k)} \quad (19)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i \text{ programada}} - Q_i^{(k)} \quad (20)$$

$P_i^{(k)}$  y  $Q_i^{(k)}$  se obtienen con las ecuaciones (7) y (8).

Los nuevos estimativos para las tensiones de barra son:

$$\bar{\delta}_i^{(k+1)} = \bar{\delta}_i^{(k)} + \Delta \bar{\delta}_i^{(k)} \quad (21)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + |\Delta V_i^{(k)}| \quad (22)$$

Y el vector de incógnitas es:

$$[X] = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_n \quad |V_1| \quad |V_2| \quad \dots \quad |V_n|] \quad (23)$$

Nota: para el flujo de cargas, el asterisco (\*) puesto en las variables significa la conjugada.

### 2.2.1. Pasos para la solución del flujo de cargas con el método de Newton-Raphson.

i) En barras PQ se igualan las magnitudes de tensión y ángulo de fase a los de la barra Slack.

En las barras PV se hace lo mismo pero con  $\bar{\delta}_i^{(0)}$ , siendo i una barra PV.

ii) En barras PQ se calculan  $P_i^{(k)}$  y  $Q_i^{(k)}$  con las ecuaciones (7) y (8), para luego calcular  $\Delta P_i^{(k)}$  y  $\Delta Q_i^{(k)}$ .

iii) En barras PV, se calcula  $P_i^{(k)}$  y  $\Delta P_i^{(k)}$  mediante la ecuación (7).

iv) Se calcula el Jacobiano como se mostró anteriormente.

v) Se plantea la ecuación lineal simultánea, ecuación (10), y se resuelve directamente o empleando factorización triangular, organización óptima o eliminación Gaussiana. Posteriormente se calcula  $\Delta\delta_i^{(k)}$  y  $|\Delta V_i^{(k)}|$ .

vi) Se calculan las nuevas estimaciones para  $[X]$  mediante las ecuaciones (21) y (22).

Notas:

- El proceso continúa hasta que  $\Delta P_i^{(k)}$  y  $\Delta Q_i^{(k)}$  son menores o iguales a la tolerancia admitida (en valor absoluto):  
 $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \epsilon$       y       $|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \epsilon$  para una iteración  $k$ .
- El criterio de convergencia se recomienda con  $\Delta P$  y  $\Delta Q$ :  
 Típicamente se emplea  $\epsilon = 0.1\text{kVA}$ , en una base de 100 MVA.

$$\epsilon = \frac{0.1\text{kVA}}{100\text{MVA}} = 10^{-6}$$

### 2.3. ALGORITMO PARA LA SOLUCIÓN DEL FLUJO DE CARGAS CONTINUADO

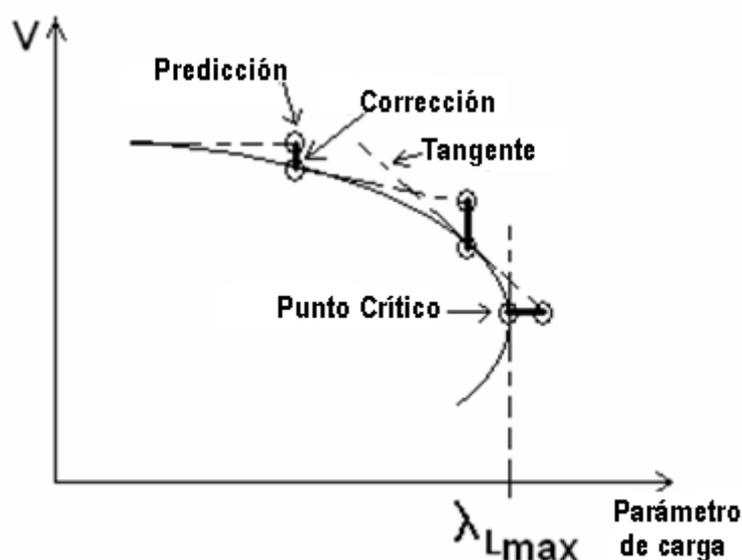
Un flujo de potencia continuado es una serie de flujos de carga aumentando gradualmente el parámetro de carga. El objetivo principal es determinar cuanta carga adicional puede soportar un sistema de potencia antes de que esto se produzca un colapso de tensión. La ventaja del flujo continuado con respecto 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.

La siguiente figura describe lo explicado anteriormente:

Figura 9. Método de predicción y corrección



Fuente: GONZÁLEZ SÁNCHEZ, Jorge W. Voltage stability model for hvdc systems connected to very. Alemania, 2006. p. 76. Trabajo de grado (PhD).

Las ecuaciones del flujo de potencia tienen que ser replanteadas para añadir el parámetro de carga.

El parámetro  $\lambda_L$  variará entre 0.0 y  $\lambda_{Lmax}$ , cuyo valor muestra la carga máxima permitida donde la tensión del sistema comienza a caer. Por ejemplo, en una curva P-V. Para el caso de carga base,  $\lambda_L$  vale 0.0.

Las ecuaciones básicas de un flujo de potencia son:

$$0 = P_{Gi} + P_{Li} + P_{Ti} \quad (24)$$

$$0 = Q_{Gi} + Q_{Li} + Q_{Ti} \quad (25)$$

Donde:

$$P_{Ti} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (26)$$

$$Q_{Ti} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (27)$$

$P_{Gi}$  y  $Q_{Gi}$ : potencias de generación activa y reactiva respectivamente en la barra i.

$P_{Li}$  y  $Q_{Li}$ : cargas activas y reactivas respectivamente en la barra i.

$P_{Ti}$  y  $Q_{Ti}$ : potencias de transferencia activa y reactiva calculadas.

$V_i$  y  $V_j$ : tensiones de barra.

$Y_{ij}$ : admitancia de las línea conectada entre las barras i y j.

$\delta_i$  y  $\delta_j$ : ángulos de las tensiones  $V_i$  y  $V_j$  respectivamente.

$\theta_{ij}$ : ángulo de la admitancia  $Y_{ij}$ .

$P_{Li}$  y  $Q_{Li}$  tienen que ser modificadas para incluir el parámetro de carga:

$$P_{Li} = P_{Li0} + \lambda_L * K_p \quad (28)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda_L * K_q \quad (29)$$

Donde:

$P_{Li0}$  y  $Q_{Li0}$ : cargas iniciales en barra i.

$K_p$  y  $K_q$ : factores de cambio de carga en la barra i.

Reemplazando las ecuaciones (28) y (29) en (24) y (25) respectivamente, se obtiene lo siguiente:

$$0 = P_{Gi} + (P_{Li0} + \lambda_L * K_p) + P_{Ti} \quad (30)$$

$$0 = Q_{Gi} + (Q_{Li0} + \lambda_L * K_q) + Q_{Ti} \quad (31)$$

Las ecuaciones (30) y (31) son redefinidas como diferencias de potencia de la barra i, obteniendo las ecuaciones (32) y (33):

$$\Delta P_i = P_{Gi} + (P_{Li0} + \lambda_L * K_p) + P_{Ti} \quad (32)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} + (Q_{Li0} + \lambda_L * K_q) + Q_{Ti} \quad (33)$$

Llamando F al vector de diferencias de potencia se obtiene la ecuación (34):

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \vec{F}(\vec{\delta}, \vec{V}, \lambda_L) = 0 \quad (34)$$

Ahora, el problema del flujo continuado es definido así:

$$\vec{F}(\vec{\delta}, \vec{V}, \lambda_L) = 0 \quad \rightarrow \quad 0 \leq \lambda_L \leq \lambda_{Lmax} \quad (35)$$

La solución para el caso base  $(\vec{\delta}_0, \vec{V}_0, \lambda_{L0})$  se obtiene con el flujo de cargas convencional y las siguientes soluciones se hacen con la variación de  $\lambda_L$ . La dimensión de F será  $(2*n1 + m)$ , donde n1 es el número de barras PQ y m es el número de barras PV.

**2.3.1. Predicción de la siguiente solución.** La siguiente solución se obtiene yendo un paso conveniente adelante, en la dirección tangencial del camino de solución. Así, el primer objetivo es calcular el vector tangencial. Se efectúa la derivada en cada lado de la ecuación (35) y se obtiene la ecuación (36).

$$\begin{aligned} \partial[\vec{F}(\vec{\delta}, \vec{V}, \lambda_L)] &= \vec{F}_{\vec{\delta}} \partial \vec{\delta} + \vec{F}_{\vec{V}} \partial \vec{V} + \vec{F}_{\lambda_L} \partial \lambda_L = 0 \\ [\vec{F}_{\vec{\delta}} \quad \vec{F}_{\vec{V}} \quad \vec{F}_{\lambda_L}] &\begin{bmatrix} \partial \vec{\delta} \\ \partial \vec{V} \\ \partial \lambda_L \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (36)$$

El vector fila de la ecuación (36) es un vector de derivadas parciales, correspondiente al Jacobiano original (J) aumentando la columna  $\vec{F}_{\lambda_L}$ , mientras que el vector columna es conocido como el vector tangente ( $\vec{t}$ ).

Para obtener el vector tangente, se adiciona una nueva ecuación cuya magnitud es 1 como se muestra en la ecuación (37).

$$t = \begin{bmatrix} \partial \vec{\delta} \\ \partial \vec{V} \\ \partial \lambda_L \end{bmatrix}, \quad t_k = \pm 1 \quad (37)$$

Ahora bien, el problema del flujo de potencia se muestra en la ecuación (38).

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_{\delta} & \vec{F}_{\vec{V}} & \vec{F}_{\lambda_L} \\ \vec{e}_k \end{bmatrix} [\vec{t}] = \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$e_k$  es un vector fila, correctamente dimensionado teniendo todos los elementos iguales a cero exceptuando  $k_{th}$ , cuyo valor es 1.

Si el índice de  $k$  es correctamente escogido, haciendo que  $t_k = \pm 1$ , se garantiza que el Jacobiano aumentado no es singular cerca del punto crítico ( $\lambda_{Lmax}$ ).

El signo de  $t_k$  es escogido según la variación de la variable  $k_{th}$  a lo largo del camino de solución. Si está siendo incrementado,  $t_k$  debe ser positivo, de lo contrario es negativo.

El vector tangencial se encuentra mediante la ecuación (38). La predicción para la siguiente solución se encuentra con la ecuación (39).

$$\begin{bmatrix} \vec{\delta}^* \\ \vec{V}^* \\ \lambda_L^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{\delta} \\ \vec{V} \\ \lambda_L \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \partial \vec{\delta} \\ \partial \vec{V} \\ \partial \lambda_L \end{bmatrix} \quad (39)$$

El asterisco (\*) en éstas fórmulas indica que son la solución predicha para un valor subsecuente de  $\lambda_L$ , y  $\sigma$  es un escalar que designa el tamaño del paso.

El  $\sigma$  tiene que ser escogido de tal modo que la solución predicha esté dentro del radio de convergencia de la corrección. La magnitud de  $\sigma$  puede ser variable según la cercanía al punto crítico.

**2.3.2. Parametrización.** Para la corrección, se debe hacer una estrategia de parametrización que consiste en proporcionar un método para identificar cada solución a lo largo del camino de soluciones. Se utilizará una parametrización llamada Local.

En la parametrización Local, se adiciona un vector para especificar ángulo, tensión y  $\lambda_L$ .  $\vec{x}$  es el vector solución que especifica éstas variables de estado, como se muestra en (40).

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \vec{\delta} \\ \vec{V} \\ \lambda_L \end{bmatrix} \quad (40)$$

Se tiene que  $x_k = \eta$ ; donde  $\eta$  es un valor conveniente para el elemento  $k_{th}$  del vector  $x$ . El nuevo sistema de ecuaciones queda como se muestra en (41).

$$\begin{bmatrix} \vec{F}(\vec{x}) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{0} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Este sistema se soluciona utilizando la técnica de Newton-Raphson, lo que proporcionará el corrector que se necesita para modificar la solución predicha. El elemento  $k_{th}$  de la predicción se iguala al  $k_{th}$  del corrector, y  $\eta = x_k^*$ .

La variable  $x_k$  es llamada el Parámetro de Extensión. Para la predicción, el cambio diferencial de esta variable es diferente de cero. Por ejemplo,  $\partial x_k = t_k = \pm 1$ .

En el corrector, el valor de  $x_k$  se especifica luego de haber encontrado los valores de las variables de estado.

**2.3.3. Selección del Parámetro de Extensión.** La variable del vector tangencial que tenga el mayor cambio diferencial será el parámetro de extensión. Así, esta variable será la de mayor importancia cerca de la solución dada.

La atención se tiene que enfocar cerca del punto crítico (a veces llamada "nariz"). Allí, la tensión o los ángulos cambian rápidamente. Por lo que el parámetro de extensión debe ser reevaluado en cada paso. La ecuación (42) muestra la selección del parámetro de extensión  $x_k$ .

$$x_k = |t_k| = \max\{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_m|\} \quad (42)$$

Donde  $m = 2 \cdot n_1 + m + 1$ .

Cuando se selecciona el parámetro de extensión, el signo de su respectivo componente tangencial tiene que ser asignado a  $t_k$  en un valor conveniente de +1 o -1 para el cómputo del vector subsecuente tangencial.

Durante el procedimiento de corrección-predicción, se debe evaluar si realmente el punto crítico ha sido sobrepasado. Esto ocurre cuando  $\lambda_L$  llega a un valor máximo y comienza a disminuirse. Allí, el componente tangencial de  $\lambda_L$  ( $\partial\lambda_L$ ) es cero y más allá del punto crítico, es negativo. Una vez  $\partial\lambda_L$  es calculado en la predicción, se hace una verificación del signo de  $\partial\lambda_L$ .

Finalmente, para obtener un factor de variación de carga,  $\varphi$ , según los cambios de  $\lambda_L$ , se usan las ecuaciones (28) y (29) de la siguiente manera:

$$\tan(\varphi) = \frac{Q_{Li0}}{P_{Li0}} \quad (43)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{Q_{Li}}{P_{Li}} \quad (44)$$

Igualando (43) y (44) se obtiene:

$$\frac{Q_{Li0}}{P_{Li0}} = \frac{Q_{Li}}{P_{Li}} \quad (45)$$

Entonces,

$$\frac{Q_{Li0}}{P_{Li0}} = \frac{Q_{Li0} + \lambda_L K_q}{P_{Li0} + \lambda_L K_p}$$

Se llega a:

$$\frac{K_p}{K_q} = \frac{P_{Li0}}{Q_{Li0}} \quad (46)$$

Usando las ecuaciones (43) y (46) se obtiene que:

$$\frac{K_p}{K_q} = \frac{1}{\tan(\varphi)} \quad (47)$$

Si por ejemplo,  $K_p = 1$ , entonces  $K_q = \tan(\varphi)$ .

## 2.4. 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.

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

**2.4.1. Programación orientada a objetos.** La P.O.O. se fundamenta en los conceptos de objeto y clase. Un objeto es una entidad autónoma con una funcionalidad concreta y bien definida y una clase es una especificación de las características de un conjunto de objetos. Un objeto es una instancia de una clase.

### ***Condiciones para que un lenguaje sea orientado a objetos:***

a) Encapsulamiento: en la programación clásica (por ejemplo, C) existen variables y funciones que actúan sobre esas variables. En C++, el encapsulamiento permite tener funciones como miembros de una clase y

cuando se invocan reciben como parámetro implícito la dirección de la variable y dentro de la función se hace referencia a esa dirección con la variable *this*.

b) Polimorfismo:

- Sobrecarga de funciones: dos funciones pertenecientes a una misma clase se pueden llamar igual pero se deben diferenciar en los parámetros que recibe.

- Sobrecarga de operadores: se puede usar un operador básico de C para que cumpla otra función. El nombre de la función debe llevar el símbolo del operador precedido por la palabra *operator*.

c) Herencia: se usa cuando se quiere agregar una función o un dato a una clase ya existente pero sin modificar la clase original sino creando una clase nueva. Se heredan todo los miembros que estén en la sección *public*.

### **Secciones de una clase:**

a) *Private*: todos los miembros aquí declarados solo pueden ser accedidos desde las funciones declaradas en el *public* de la misma clase.

b) *Protected*: una clase hija no puede acceder a los miembros declarados en la sección *private* de la clase padre ni siquiera desde las funciones heredadas. Los miembros declarados en la sección *protected* de la clase padre pueden ser accedidos por la clase hija solo desde las funciones heredadas (funciona como un *private* para la clase hija).

c) *Public*: los miembros aquí declarados pueden ser accedidos desde cualquier función. También aplica para las clases hijas.

**Constructores y destructores:** Son métodos que permiten establecer el estado inicial y final de un objeto.

El constructor se hace para inicializar los miembros de una clase. Es una función que se declara en la sección *public* de la clase y se le puede aplicar polimorfismo, es decir, pueden existir varios constructores. Nunca se debe invocar desde ninguna función porque él se invoca automáticamente cuando se declara una variable de la misma clase.

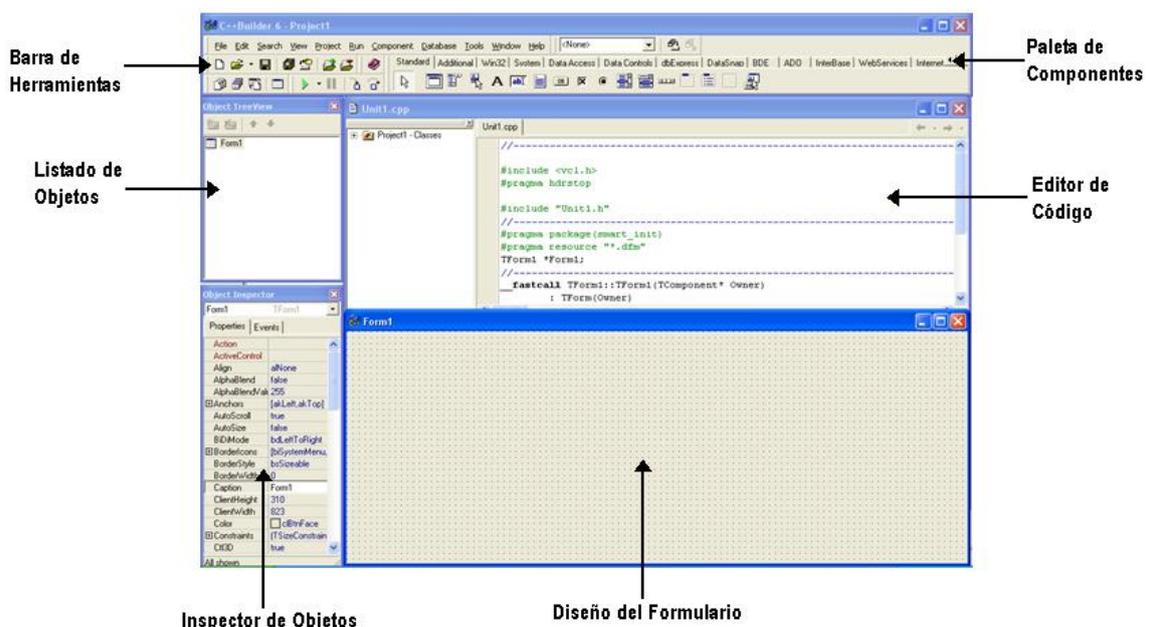
La función constructor debe cumplir 3 condiciones: no debe devolver nada (ni siquiera void), se debe llamar igual que la clase y nunca se debe invocar.

Siempre que se utilice memoria dinámica se debe liberar al final de la función donde se usó. Para no tener que hacer ésto siempre, que muchas veces se olvida, se declara un destructor. Es una función que se declara en la sección public de la clase y no se le puede aplicar polimorfismo, es decir, no pueden existir varios destructores. Nunca se debe invocar desde ninguna función porque él se invoca automáticamente al final de la función donde se usó memoria dinámica.

La función destructor debe cumplir 4 condiciones: no debe devolver nada (ni siquiera void), se debe llamar igual que la clase pero antecedido de ~, nunca se debe invocar y debe ser único (No aplica polimorfismo: sobrecarga de funciones)

**2.4.2. Entorno de desarrollo integrado.** Cuando se inicia C++ Builder, se presenta un grupo de ventanas dispersas alrededor de la ventana principal.

Figura 10. Entorno de desarrollo integrado de C++ Builder



En la figura se presenta los principales elementos de C++ Builder y su entorno de desarrollo integrado. Cada parte en el ambiente de desarrollo trabaja conjuntamente, diseños visuales y editor de código donde la edición es similar a otros editores; solo que con el entorno de desarrollo integrado, se puede observar realmente lo que esta construyendo al momento de crearlo.

**Barra de Herramientas:** muchas de las opciones a las que se puede acceder desde el menú principal, están disponibles a través del panel de botones en la barra de herramientas. En general la barra de herramientas permite de una manera rápida, ejecutar operaciones del programa con un simple click con el mouse.

Algunos de los botones de esta barra son: Nuevo Proyecto, Abrir Proyecto, Guardar todos los archivos, Ejecutar Programa, entre otros.

**Listado de Objetos:** muestra un listado de los componentes visuales y no visuales que se colocan sobre el formulario y ventana de edición.

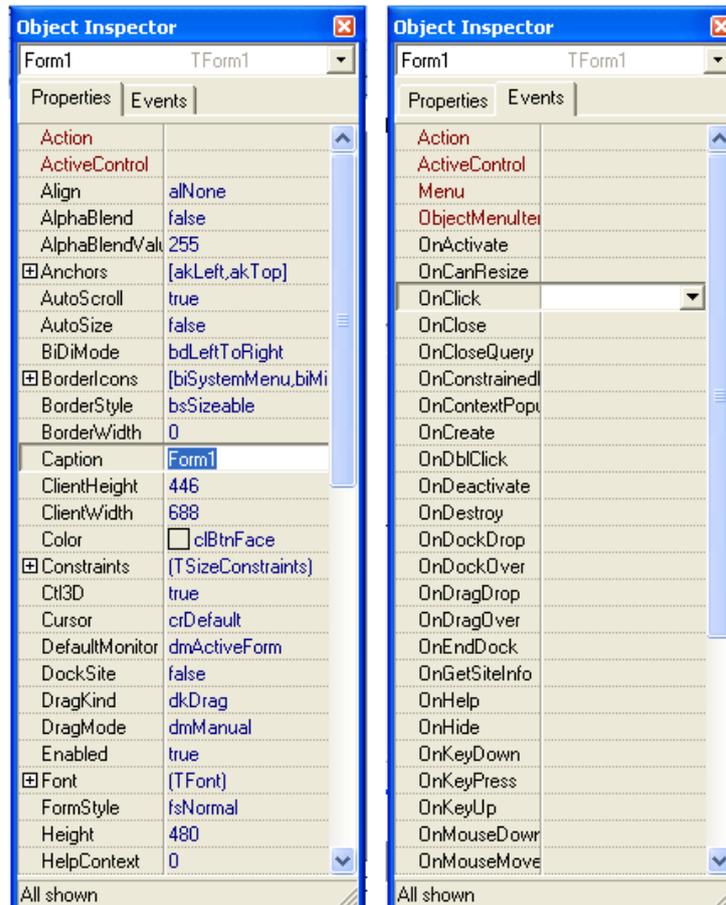
**Inspector de Objetos:** permite ver las propiedades o características de los objetos que conforman un proyecto. Por medio de él se pueden cambiar las propiedades de los objetos, además de mostrar los eventos asociados a los objetos de la aplicación.

Al seleccionar un objeto, el inspector cambia automáticamente al contenido y propiedades de este objeto. Se puede acceder rápidamente a este inspector presionando la tecla F11.

El inspector despliega las propiedades principales como son: nombre, color, altura, ancho, posición etc.

Algunos de los eventos que despliega el inspector son: al activar el objeto, al oprimir una tecla, al oprimir el mouse, al soltar el mouse, etc. Estos eventos son llamados mediante acciones del usuario, o del mismo sistema operativo. Por ejemplo el evento al hacer click en el mouse, hace una acción cuando el usuario hace click con el mouse para ese objeto.

Figura 11. Inspector de Objetos de C++ Builder



**Diseño del Formulario:** es el espacio de trabajo y muestra los resultados.

Cada formulario representa una ventana individual en la aplicación. Allí se puede diseñar, añadir, eliminar y reconfigurar los componentes según las necesidades de la aplicación.

**Editor de Código:** muestra el código actual de la aplicación C++ Builder.

Cuando se añade un objeto y se hace doble click sobre él, automáticamente se edita en la ventana de edición la llamada a la función que asocia al evento de ese objeto, dejando el espacio en blanco para que se codifique la acción que se desee para ese evento.

**Paleta de Componentes:** es un catálogo de objetos que se pueden usar de acuerdo a las necesidades de construcción de las aplicaciones. Está dividida en páginas o grupos de acuerdo con sus funciones.

C++ Builder soporta muchos componentes.

**2.4.3. Archivos fuente generados por C++ Builder.** Son extensiones vitales para cualquier proyecto de C++ Builder.

Son archivos que contienen detalles del diseño de los proyecto, se debe tener cuidado en no perder ninguno porque son bastante importantes para realizar modificaciones en el proyecto.

Algunos de ellos son:

**Project1.cpp:** este archivo contiene el código principal de la aplicación y tiene el mismo nombre del proyecto, es creado automáticamente por C++ Builder al darle nombre al proyecto. Contiene el código de iniciación y terminación del programa.

**Unit1.cpp:** mediante este código se accede a la ventana de edición o editor de código.

**Unit1.h:** para cada archivo .cpp, C++ Builder crea automáticamente un .h correspondiente. Contiene la declaración de la forma y le da a C++ Builder un listado de componentes y eventos que tendrá la aplicación.

**Unit1.dfm:** contiene la información, definición y declaración de la forma y otros detalles importantes como: tamaño, color, títulos, fondos etc. También contiene detalles del resto de los componentes utilizados en la forma.

Este archivo no se puede leer, pero se puede convertir para observar su contenido.

**Unit1.obj:** es un archivo binario que se crea cuando se compila el proyecto. Este archivo cambiará cada vez que se reconstruya el proyecto.

**Project1.exe:** es el archivo final ejecutable. Con este archivo se puede ejecutar el proyecto sin la necesidad de los otros archivos, pero no se puede modificar el mismo.

### 3. APLICACIONES Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

La validación del programa se hace mediante casos de sistemas de potencia hechos por la IEEE. Estos sistemas son ejecutados en programas ya conocidos, y de los cuales se tiene absoluta confiabilidad de los resultados que se obtienen.

#### 3.1. FLUJO DE CARGAS

**3.1.1. Sistema IEEE 9 Barras.** El flujo de cargas de éste sistema fue ejecutado en los programas PowerWorld y ASPUPB. Los resultados que se obtuvieron son presentados en el [ANEXO C](#).

A continuación se presenta, en forma de reporte, la solución obtenida con el programa sin tener en cuenta límites de potencia reactiva.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (SEDE MEDELLÍN)  
 INGENIERÍA ELÉCTRICA  
 GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (T&D)  
 ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA  
 ARCHIVO ANALIZADO: D:\JUANGO\Tesis Ing. Eléctrica\Programa\Archivos\IEEE\S.P\_9Barras.txt

SOLUCIÓN FLUJO DE CARGAS

CRITERIOS USADOS:

S\_Base: 100  
 Tolerancia: 1E-6  
 Número Máximo de Iteraciones: 700  
 Sobretensión: 1.1  
 Tensión Baja: 0.9

RESUMEN DEL FLUJO DE CARGAS

Número de iteraciones: 3  
 Tiempo de ejecución: Del orden de microsegundos  
 No se consideraron límites de Potencia Reactiva

BARRAS

Num.	Nombre	Tipo	V  kv	p.u	°	Gen MW	Mvar	Carga MW	Mvar
1	BUS-1	100 SL	104.000	1.040	0.00	71.64	27.05	0.00	0.00
4	BUS-4	100 PQ	102.579	1.026	-2.22	0.00	0.00	0.00	0.00
5	BUS-5	100 PQ	99.563	0.996	-3.99	0.00	0.00	125.00	50.00
6	BUS-6	100 PQ	101.265	1.013	-3.69	0.00	0.00	90.00	30.00
7	BUS-7	100 PQ	102.577	1.026	3.72	0.00	0.00	0.00	0.00
8	BUS-8	100 PQ	101.588	1.016	0.73	0.00	0.00	100.00	35.00
9	BUS-9	100 PQ	103.235	1.032	1.97	0.00	0.00	0.00	0.00

2	BUS-2	100	PV	102.500	1.025	9.28	163.00	6.65	0.00	0.00
3	BUS-3	100	PV	102.500	1.025	4.66	85.00	-10.86	0.00	0.00

## LÍNEAS DE TRANSMISIÓN (Potencia Saliendo de la Barra)

Nombre	Barra I			I	_I_°	Barra J			I	_I_°	Pérdidas	
	MW	Mvar	MVA			ka	MW	Mvar			MVA	MW
L.T: 7/8	76.38	-0.80	76.38	0.43	4.32	-75.90	-10.70	76.66	0.44	172.70	0.48	-11.50
L.T: 9/8	24.18	3.12	24.38	0.14	-5.38	-24.10	-24.30	34.22	0.19	135.49	0.09	-21.18
L.T: 7/5	86.62	-8.38	87.02	0.49	9.25	-84.32	-11.31	85.08	0.49	168.37	2.30	-19.69
L.T: 9/6	60.82	-18.07	63.45	0.35	18.52	-59.46	-13.46	60.97	0.35	163.56	1.35	-31.53
L.T: 5/4	-40.68	-38.69	56.14	0.33	132.45	40.94	22.89	46.90	0.26	-31.43	0.26	-15.79
L.T: 6/4	-30.54	-16.54	34.73	0.20	147.87	30.70	1.03	30.72	0.17	-4.14	0.17	-15.51

## TRANSFORMADORES (Potencia Saliendo de la Barra)

Nombre	Barra I			I	_I_°	Barra J			I	_I_°	Pérdidas	
	MW	Mvar	MVA			ka	MW	Mvar			MVA	MW
TRF: 4/1	-71.64	-23.92	75.53	0.43	159.32	71.64	27.05	76.58	0.43	-20.68	0.00	3.12
TRF: 7/2	-163.00	9.18	163.26	0.92	-173.06	163.00	6.65	163.14	0.92	6.94	0.00	15.83
TRF: 9/3	-85.00	14.96	86.31	0.48	-168.05	85.00	-10.86	85.69	0.48	11.95	0.00	4.10

## GENERADORES (Potencia Entrando a la Barra)

Nombre	Barra I			I	_I_°	Limites de Q	
	MW	Mvar	MVA			ka	Min Mvar
GEN: 1	71.64	27.05	76.58	0.43	-20.68	-99990.00	999900.00
GEN: 2	163.00	6.65	163.14	0.92	6.94	-99990.00	999900.00
GEN: 3	85.00	-10.86	85.69	0.48	11.95	-99990.00	999900.00

## ELEMENTOS SHUNT (Potencia Entrando a la Barra)

NO HAY

## TENSIONES FUERA DE RANGO

NO HAY

## MATRIZ YBARRAS (p.u)

	1	2	3	4	5	6	7	8
9								
1	0.0000-j17.3611			0.0000+j17.3611	0	0	0	0
0		0		0				
4	0.0000+j17.3611			3.3074-j39.3089	-1.3652+j11.6041	-1.9422+j10.5107	0	0
0				0				
5	0			-1.3652+j11.6041	2.5528-j17.3382	0	-1.1876+j5.9751	0
0				0				
6	0			-1.9422+j10.5107	0	3.2242-j15.8409	0	0
-1.2820+j5.5882				0				
7	0			0	-1.1876+j5.9751	0	2.8047-j35.4456	-1.6171+j13.6980
0				0.0000+j16.0000	0	0	-1.6171+j13.6980	2.7722-j23.3032
8	0			0	0	0		
-1.1551+j9.7843				0				
9	0			0		-1.2820+j5.5882	0	-1.1551+j9.7843
2.4371-j32.1539				0.0000+j17.0648				
2	0			0	0	0	0.0000+j16.0000	0
0				0.0000-j16.0000	0			
3	0			0	0	0	0	0
0.0000+j17.0648				0.0000-j17.0648				

Reporte Generado por ASPUPB2

Análisis de Sistemas de Potencia

Universidad Pontificia Bolivariana

Juan Gonzalo Ortega, Santiago Cadavid, Jorge W. Gonzalez

Fecha: 17/08/2009

Hora: 12:29:41 p.m.

Ahora la idea es obtener la solución teniendo en cuenta los límites de potencia reactiva. Para esto, se le asignó al generador 2 un límite superior de 6 Mvars y al generador 3 un límite inferior de -10 Mvars. Esto se hizo a propósito para que se sobrepasaran los límites, y así obtener los resultados.

El reporte arrojado fue el siguiente:

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (SEDE MEDELLÍN)  
 INGENIERÍA ELÉCTRICA  
 GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (T&D)  
 ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA  
 ARCHIVO ANALIZADO: D:\JUANGO\Tesis Ing. Eléctrica\Programa\Archivos\IEEE\S.P\_9Barras.txt

## SOLUCIÓN FLUJO DE CARGAS

## CRITERIOS USADOS:

S\_Base: 100  
 Tolerancia: 1E-6  
 Número Máximo de Iteraciones: 700  
 Sobretensión: 1.1  
 Tensión Baja: 0.9

## RESUMEN DEL FLUJO DE CARGAS

Número de iteraciones: 4  
 Tiempo de ejecución: Del orden de microsegundos  
 El Generador 3 sobrepasó los límites de Potencia Reactiva  
 El Generador 2 sobrepasó los límites de Potencia Reactiva

## BARRAS

Num.	Nombre	Tipo	V  kv	p.u	∠V °	Gen MW	Mvar	Carga MW	Mvar
1	BUS-1	100 SL	104.000	1.040	0.00	71.64	27.05	0.00	0.00
4	BUS-4	100 PQ	102.601	1.026	-2.22	0.00	0.00	0.00	0.00
5	BUS-5	100 PQ	99.584	0.996	-3.99	0.00	0.00	125.00	50.00
6	BUS-6	100 PQ	101.324	1.013	-3.69	0.00	0.00	90.00	30.00
7	BUS-7	100 PQ	102.592	1.026	3.71	0.00	0.00	0.00	0.00
8	BUS-8	100 PQ	101.647	1.016	0.72	0.00	0.00	100.00	35.00
9	BUS-9	100 PQ	103.351	1.034	1.95	0.00	0.00	0.00	0.00
3	BUS-3	100 PV	102.666	1.027	4.64	85.00	-10.00	0.00	0.00
2	BUS-2	100 PV	102.476	1.025	9.28	163.00	6.00	0.00	0.00

## LÍNEAS DE TRANSMISIÓN (Potencia Saliendo de la Barra)

Nombre	Barra I	Mvar	MVA	I   ka	∠ °	Barra J	Mvar	MVA	I   ka	∠ °	Pérdidas MW	Mvar
L.T: 7/8	76.41	-1.41	76.42	0.43	4.78	-75.94	-10.10	76.60	0.44	173.14	0.47	-11.52
L.T: 9/8	24.15	3.70	24.44	0.14	-6.75	-24.06	-24.90	34.63	0.20	134.74	0.09	-21.20
L.T: 7/5	86.59	-8.42	87.00	0.49	9.27	-84.29	-11.30	85.05	0.49	168.38	2.30	-19.72
L.T: 9/6	60.85	-17.77	63.39	0.35	18.23	-59.49	-13.83	61.08	0.35	163.22	1.35	-31.60
L.T: 5/4	-40.71	-38.70	56.17	0.33	132.46	40.97	22.90	46.93	0.26	-31.42	0.26	-15.80
L.T: 6/4	-30.51	-16.17	34.53	0.20	148.39	30.67	0.63	30.68	0.17	-3.40	0.16	-15.53

## TRANSFORMADORES (Potencia Saliendo de la Barra)

Nombre	Barra I	Mvar	MVA	I   ka	∠ °	Barra J	Mvar	MVA	I   ka	∠ °	Pérdidas MW	Mvar
Tap												
%												
TRF: 4/1	-71.64	-23.54	75.40	0.42	159.60	71.64	26.65	76.43	0.42	-20.40	0.00	3.11
0.00												
TRF: 7/2	-163.00	9.83	163.30	0.92	-172.83	163.00	6.00	163.11	0.92	7.17	0.00	15.83
0.00												
TRF: 9/3	-85.00	14.07	86.16	0.48	-168.65	85.00	-10.00	85.59	0.48	11.35	0.00	4.07
0.00												

## GENERADORES (Potencia Entrando a la Barra)

Nombre	Barra I	Mvar	MVA	I   ka	∠ °	Límites de Q	
						Min Mvar	Max Mvar
GEN: 1	71.64	26.65	76.43	0.42	-20.40	-99990.00	999900.00
GEN: 3	85.00	-10.00	85.59	0.48	11.35	-10.00	999900.00
GEN: 2	163.00	6.00	163.11	0.92	7.17	-99990.00	6.00

## ELEMENTOS SHUNT (Potencia Entrando a la Barra)

NO HAY

## TENSIONES FUERA DE RANGO

NO HAY

## MATRIZ YBARRAS (p.u)

	1	3	4	2	5	6	7	8
9								
1	0.0000-j17.3611		0.0000+j17.3611		0		0	0
0		0		0				
4	0.0000+j17.3611		3.3074-j39.3089		-1.3652+j11.6041		-1.9422+j10.5107	0
0		0		0				
5	0			-1.3652+j11.6041	2.5528-j17.3382			-1.1876+j5.9751
0		0		0				
6	0			-1.9422+j10.5107	0	3.2242-j15.8409	0	0
-1.2820+j5.5882		0		0				
7	0		0		-1.1876+j5.9751	0	2.8047-j35.4456	-1.6171+j13.6980
0		0		0.0000+j16.0000				
8	0		0		0		-1.6171+j13.6980	2.7722-j23.3032
-1.1551+j9.7843		0		0				

```

9      0      0      0      -1.2820+j5.5882      0      -1.1551+j9.7843
2.4371-j32.1539      0.0000+j17.0648      0      0      0      0
3      0      0      0      0      0      0
0.0000+j17.0648      0.0000-j17.0648      0      0      0      0
2      0      0      0      0      0      0.0000+j16.0000      0
0      0      0      0.0000-j16.0000

```

Reporte Generado por ASPUPB2  
Análisis de Sistemas de Potencia  
Universidad Pontificia Bolivariana  
Juan Gonzalo Ortega, Santiago Cadavid, Jorge W. Gonzalez

Fecha: 17/08/2009  
Hora: 12:34:40 p.m.

**3.1.2. Sistema IEEE 14 Barras.** Este sistema fue ejecutado en ASPUPB. Los resultados obtenidos se encuentran el [ANEXO D](#).

A continuación se muestra la solución en forma de reporte que se obtuvo con el programa sin tener en cuenta límites de potencia reactiva.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (SEDE MEDELLÍN)  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (T&D)  
ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA  
ARCHIVO ANALIZADO: D:\JUANGO\Tesis Ing. Eléctrica\Programa\Archivos\IEEE\S.P\_14Barras.txt

SOLUCIÓN FLUJO DE CARGAS

CRITERIOS USADOS:

S\_Base: 100  
Tolerancia: 1E-6  
Número Máximo de Iteraciones: 700  
Sobretensión: 1.1  
Tensión Baja: 0.9

RESUMEN DEL FLUJO DE CARGAS

Número de iteraciones: 3  
Tiempo de ejecución: Del orden de microsegundos  
No se consideraron límites de Potencia Reactiva

BARRAS

Num.	Nombre	Tipo	V  kv	p.u	∠ °	Gen MW	Mvar	Carga MW	Mvar	
1	BUS-1	100	SL	365.700	1.060	0.00	232.39	-16.89	0.00	0.00
4	BUS-4	100	PQ	351.081	1.018	-10.36	0.00	0.00	47.80	-3.90
5	BUS-5	100	PQ	352.021	1.020	-8.75	0.00	0.00	7.60	1.60
7	BUS-7	100	PQ	368.309	1.068	-13.89	0.00	0.00	0.00	0.00
9	BUS-9	100	PQ	365.391	1.059	-14.54	0.00	0.00	29.50	16.60
10	BUS-10	100	PQ	363.541	1.054	-14.81	0.00	0.00	9.00	5.80
11	BUS-11	100	PQ	365.166	1.058	-14.76	0.00	0.00	3.50	1.80
12	BUS-12	100	PQ	364.087	1.055	-15.26	0.00	0.00	6.10	1.60
13	BUS-13	100	PQ	362.585	1.051	-15.30	0.00	0.00	13.50	5.80
14	BUS-14	100	PQ	357.985	1.038	-15.86	0.00	0.00	14.90	5.00
2	BUS-2	100	PV	360.525	1.045	-4.99	40.00	42.40	21.70	12.70
3	BUS-3	100	PV	348.450	1.010	-12.75	0.00	23.39	94.20	19.00
6	BUS-6	100	PV	369.150	1.070	-14.45	0.00	12.24	11.20	7.50
8	BUS-8	100	PV	376.050	1.090	-13.89	0.00	17.36	0.00	0.00

LÍNEAS DE TRANSMISIÓN (Potencia Saliendo de la Barra)

Nombre	Barra I	MW	Mvar	MVA	∠ ka	Barra J	MW	Mvar	MVA	∠ ka	Pérdidas Mw	Mvar	
L.T: 1/2		157.11	-20.46	158.43	0.25	7.42	-152.80	27.77	155.30	0.25	-174.69	4.31	7.31
L.T: 2/3		73.44	3.54	73.52	0.12	-7.75	-71.10	1.67	71.12	0.12	168.59	2.34	5.21
L.T: 2/4		56.54	-1.81	56.57	0.09	-3.16	-54.84	2.99	54.92	0.09	172.76	1.70	1.18
L.T: 1/5		75.30	3.48	75.38	0.12	-2.65	-72.56	2.52	72.60	0.12	173.24	2.75	6.01
L.T: 2/5		41.12	0.81	41.12	0.07	-6.12	-40.23	-1.74	40.27	0.07	168.78	0.89	-0.92
L.T: 3/4		-23.10	3.31	23.33	0.04	175.39	23.47	-5.92	24.20	0.04	3.81	0.37	-2.62
L.T: 4/5		-64.55	14.19	66.09	0.11	-177.96	65.11	-13.74	66.55	0.11	3.16	0.57	0.45
L.T: 7/8		0.00	-13.60	13.60	0.02	76.11	0.00	13.88	13.88	0.02	-103.89	0.00	0.29
L.T: 7/9		11.74	8.27	14.36	0.02	-49.06	-11.74	-8.07	14.25	0.02	130.94	0.00	0.20
L.T: 9/10		7.65	3.86	8.56	0.01	-41.31	-7.63	-3.80	8.52	0.01	138.69	0.02	0.06
L.T: 6/11		4.91	3.88	6.26	0.01	-52.72	-4.88	-3.81	6.19	0.01	127.28	0.03	0.07
L.T: 6/12		7.48	2.59	7.91	0.01	-33.56	-7.41	-2.45	7.80	0.01	146.44	0.07	0.14
L.T: 6/13		16.49	7.35	18.05	0.03	-38.47	-16.30	-6.98	17.73	0.03	141.53	0.19	0.37
L.T: 9/14		10.98	3.36	11.48	0.02	-31.55	-10.83	-3.04	11.25	0.02	148.45	0.15	0.32

L.T: 10/11	-1.37	-2.00	2.42	0.00	109.73	1.38	2.01	2.43	0.00	-70.27	0.00	0.01
L.T: 12/13	1.31	0.85	1.56	0.00	-48.30	-1.30	-0.85	1.55	0.00	131.70	0.00	0.00
L.T: 13/14	4.11	2.03	4.58	0.01	-41.56	-4.07	-1.96	4.52	0.01	138.44	0.03	0.07

## TRANSFORMADORES (Potencia Saliendo de la Barra)

Nombre	Barra I					Barra J					Pérdidas		
Tap	MW	Mvar	MVA	kA	°	MW	Mvar	MVA	kA	°	MW	Mvar	
%													
TRF: 5/6 6.80	40.08	11.35	41.65	0.07	-24.57	-40.08	-7.15	40.71	0.06	155.43	0.00	4.20	-
TRF: 4/7 2.20	11.74	-4.48	12.56	0.02	10.52	-11.74	5.33	12.89	0.02	-169.48	0.00	0.85	-
TRF: 4/9 3.10	36.38	-2.88	36.50	0.06	-5.84	-36.38	5.57	36.81	0.06	174.16	0.00	2.69	-

## GENERADORES (Potencia Entrando a la Barra)

Nombre	Barra I					Limites de Q	
	MW	Mvar	MVA	kA	°	Min Mvar	Max Mvar
GEN: 1	232.41	-16.97	233.03	0.37	4.18	-9990.00	99900.00
GEN: 2	40.00	43.02	58.74	0.09	-52.07	-40.00	50.00
GEN: 3	0.00	23.98	23.98	0.04	-102.75	0.00	40.00
GEN: 6	0.00	14.17	14.17	0.02	-104.45	-6.00	24.00
GEN: 8	0.00	13.88	13.88	0.02	-103.89	-6.00	24.00

## ELEMENTOS SHUNT (Potencia Entrando a la Barra)

Nombre	Barra I				
	MW	Mvar	MVA	kA	°
Eshunt: 9	0.00	21.31	21.31	0.03	-104.5

## TENSIONES FUERA DE RANGO

NO HAY

## MATRIZ YBARRAS (p.u)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
11														
8														
1	6.0250-j19.4471			0			-1.0259+j4.2350	0		0				
0		0		0			0	-4.9991+j15.2631	0	0				
0														
4	0			10.5130-j38.3007			-6.8410+j21.5786	0.0000+j1.7584		0.0000+j4.6337				0
0		0		0			0	-1.6860+j5.1158		-1.9860+j5.0688				0
0														
5	-1.0259+j4.2350			-6.8410+j21.5786			9.5680-j34.9274	0		0				0
0		0		0			0	0		-1.7011+j5.1939				0
0.0000+j3.6981		0												
7	0			0.0000+j1.7584			0	0.0000-j16.4868		0.0000+j9.0901				0
0		0		0			0	0		0				0
0.0000+j5.6770														
9	0			0.0000+j4.6337			0	0.0000+j9.0901		5.3261-j26.7846				-3.9020+j10.3654
0		0		0			-1.4240+j3.0291	0		0				0
0														
10	0			0			0			-3.9020+j10.3654				5.7829-j14.7683
-1.8809+j4.4029		0		0			0	0		0				0
0														
11	0			0			0	0		0				-1.8809+j4.4029
3.8359-j8.4970		0		0			0	0		0				-
1.9550+j4.0941		0												
12	0			0			0	0		0				0
0		4.0150-j5.4279		-2.4890+j2.2520			0	0		0				-
1.5260+j3.1760		0		0			0	0		0				0
13	0			0			0	0		0				0
0		-2.4890+j2.2520		6.7249-j10.6697			-1.1370+j2.3150	0		0				-
3.0989+j6.1028		0		0			0	0		0				0
14	0			0			0			-1.4240+j3.0291				0
0		0		-1.1370+j2.3150			2.5610-j5.3440	0		0				0
0														
2	-4.9991+j15.2631			-1.6860+j5.1158			-1.7011+j5.1939	0		0				0
0		0		0			0			9.5213-j30.2707				-1.1350+j4.7819
0														
3	0			-1.9860+j5.0688			0			0				0
0		0		0			0			-1.1350+j4.7819				3.1210-j9.8115
0														
6	0			0			0.0000+j3.6981			0				0
-1.9550+j4.0941		-1.5260+j3.1760		-3.0989+j6.1028			0			0				0
6.5799-j16.8194		0		0			0							0
8	0			0			0			0.0000+j5.6770				0
0		0		0			0			0				0
0.0000-j5.6770														

Reporte Generado por ASPUPB2

Análisis de Sistemas de Potencia

Universidad Pontificia Bolivariana

Juan Gonzalo Ortega, Santiago Cadavid, Jorge W. Gonzalez



TRF: 4/7	11.85	-4.46	12.66	0.02	10.25	-11.85	5.32	12.99	0.02	-169.75	0.00	0.86	-
2.20													
TRF: 4/9	36.68	-2.17	36.74	0.06	-6.98	-36.68	4.91	37.00	0.06	173.02	0.00	2.74	-
3.10													

## GENERADORES (Potencia Entrando a la Barra)

Nombre	Barra I	Mvar	MVA	I   kA	_I_° °	Límites de Q	
	MW					Min Mvar	Max Mvar
GEN: 1	232.43	-12.89	232.79	0.37	3.17	-99990.00	999900.00
GEN: 6	0.00	10.00	10.00	0.02	-104.43	-6.00	10.00
GEN: 2	40.00	40.00	56.57	0.09	-49.97	-40.00	40.00
GEN: 3	0.00	26.21	26.21	0.04	-102.79	0.00	40.00
GEN: 8	0.00	15.31	15.31	0.02	-103.93	-6.00	24.00

## ELEMENTOS SHUNT (Potencia Entrando a la Barra)

Nombre	Barra I	Mvar	MVA	I   kA	_I_° °
Eshunt: 9	0.00	21.16	21.16	0.03	-104.5

## TENSIONES FUERA DE RANGO

NO HAY

## MATRIZ YBARRAS (p.u)

	1	4	5	7	9	10
11	12	13	14	6	2	3
8						
1	6.0250-j19.4471	0	-1.0259+j4.2350	0	0	0
0	0	0	0	0	-4.9991+j15.2631	0
0						
4	0	10.5130-j38.3007	-6.8410+j21.5786	0.0000+j1.7584	0.0000+j4.6337	0
0	0	0	0	0	-1.6860+j5.1158	-
1.9860+j5.0688	0					
5	-1.0259+j4.2350	-6.8410+j21.5786	9.5680-j34.9274	0	0	0
0	0	0	0	0.0000+j3.6981	-1.7011+j5.1939	0
0						
7	0	0.0000+j1.7584	0	0.0000-j16.4868	0.0000+j9.0901	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0000+j5.6770						
9	0	0.0000+j4.6337	0	0.0000+j9.0901	5.3261-j26.7846	-3.9020+j10.3654
0	0	0	-1.4240+j3.0291	0	0	0
0						
10	0	0	0	0	-3.9020+j10.3654	5.7829-j14.7683
-1.8809+j4.4029	0	0	0	0	0	0
0						
11	0	0	0	0	0	-1.8809+j4.4029
3.8359-j8.4970	0	0	0	-1.9550+j4.0941	0	0
0						
12	0	0	0	0	0	0
0	4.0150-j5.4279	-2.4890+j2.2520	0	-1.5260+j3.1760	0	0
0						
13	0	0	0	0	0	0
0	-2.4890+j2.2520	6.7249-j10.6697	-1.1370+j2.3150	-3.0989+j6.1028	0	0
0						
14	0	0	0	0	-1.4240+j3.0291	0
0	0	-1.1370+j2.3150	2.5610-j5.3440	0	0	0
0						
6	0	0	0.0000+j3.6981	0	0	0
-1.9550+j4.0941	-1.5260+j3.1760	-3.0989+j6.1028	0	6.5799-j16.8194	0	0
0						
2	-4.9991+j15.2631	-1.6860+j5.1158	-1.7011+j5.1939	0	0	0
0	0	0	0	0	9.5213-j30.2707	-
1.1350+j4.7819	0					
3	0	-1.9860+j5.0688	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1.1350+j4.7819
3.1210-j9.8115	0					
8	0	0	0	0.0000+j5.6770	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0000-j5.6770						

Reporte Generado por ASPUPB2

Análisis de Sistemas de Potencia

Universidad Pontificia Bolivariana

Juan Gonzalo Ortega, Santiago Cadavid, Jorge W. Gonzalez

Fecha: 17/08/2009

Hora: 12:39:22 p.m.

**3.1.3. Sistema IEEE 162 Barras.** Los resultados que se obtuvieron al realizar el flujo de cargas con el ASPUPB2 fueron comparados con las soluciones que da el archivo IEEE 162 barras, las cuales se encuentran en el [ANEXO E](#).

El reporte que arrojó el programa es demasiado extenso, por lo que solo se mostrarán los resultados de las barras del sistema como se aprecia a continuación:

BARRAS										
Num.	Nombre	Tipo	V  kv	p.u	∠V °	Gen Mw	Mvar	Carga Mw	Mvar	
108	bus-108	100	SL	100.000	1.000	-27.68	551.12	155.62	0.00	0.00
1	bus-1	100	PQ	103.458	1.035	-24.81	0.00	0.00	0.00	0.00
2	bus-2	100	PQ	102.461	1.025	-29.47	0.00	0.00	0.00	0.00
3	bus-3	100	PQ	100.160	1.002	-31.95	2000.00	0.00	2370.00	96.90
4	bus-4	100	PQ	102.159	1.022	-33.19	0.00	0.00	0.00	0.00
5	bus-5	100	PQ	103.544	1.035	-23.98	0.00	0.00	0.00	0.00
7	bus-7	100	PQ	102.090	1.021	-29.82	0.00	0.00	0.00	0.00
8	bus-8	100	PQ	103.621	1.036	-33.35	-398.00	-19.20	0.00	0.00
9	bus-9	100	PQ	102.831	1.028	-27.21	0.00	0.00	0.00	0.00
10	bus-10	100	PQ	99.637	0.996	-35.11	-226.00	11.50	0.00	0.00
11	bus-11	100	PQ	100.312	1.003	-31.28	0.00	0.00	0.00	0.00
12	bus-12	100	PQ	104.047	1.040	-33.05	-193.00	5.90	0.00	0.00
13	bus-13	100	PQ	101.741	1.017	-30.14	-204.00	-37.30	0.00	0.00
14	bus-14	100	PQ	102.938	1.029	-30.58	-381.00	-56.30	0.00	0.00
15	bus-15	100	PQ	102.218	1.022	-24.03	1500.00	5.90	1420.00	0.00
16	bus-16	100	PQ	102.354	1.024	-28.90	54.20	-26.70	0.00	0.00
17	bus-17	100	PQ	101.571	1.016	-28.13	116.50	-44.70	0.00	0.00
18	bus-18	100	PQ	104.784	1.048	-32.90	0.00	0.00	34.40	11.67
19	bus-19	100	PQ	100.621	1.006	-37.28	-64.40	-3.78	0.00	0.00
20	bus-20	100	PQ	98.247	0.982	-32.12	0.00	0.00	37.90	12.50
21	bus-21	100	PQ	101.728	1.017	-29.69	69.80	-23.20	0.00	0.00
22	bus-22	100	PQ	104.382	1.044	-36.68	0.00	0.00	17.39	5.27
23	bus-23	100	PQ	99.287	0.993	-34.15	-63.50	-21.40	0.00	0.00
24	bus-24	100	PQ	101.381	1.014	-32.63	0.00	0.00	0.00	0.00
25	bus-25	100	PQ	100.451	1.005	-28.86	0.00	0.00	0.00	0.00
26	bus-26	100	PQ	103.388	1.034	-20.98	0.00	0.00	0.00	0.00
27	bus-27	100	PQ	100.134	1.001	-29.89	1500.00	0.00	1824.00	57.90
28	bus-28	100	PQ	99.392	0.994	-35.41	0.00	0.00	38.47	13.17
29	bus-29	100	PQ	99.479	0.995	-37.19	0.00	0.00	28.31	9.03
30	bus-30	100	PQ	100.852	1.009	-38.92	0.00	0.00	101.20	32.52
31	bus-31	100	PQ	99.572	0.996	-36.40	-72.50	3.10	0.00	0.00
32	bus-32	100	PQ	101.512	1.015	-40.17	0.00	0.00	52.70	15.06
33	bus-33	100	PQ	100.735	1.007	-42.10	0.00	-0.10	45.17	15.06
34	bus-34	100	PQ	100.594	1.006	-42.14	0.00	0.00	14.18	5.25
35	bus-35	100	PQ	99.862	0.999	-43.49	0.00	0.00	54.48	14.63
36	bus-36	100	PQ	100.418	1.004	-42.28	0.00	0.00	31.96	8.68
37	bus-37	100	PQ	98.813	0.988	-30.22	0.00	0.00	0.00	0.00
38	bus-38	100	PQ	102.718	1.027	-37.26	0.00	0.00	14.76	4.08
39	bus-39	100	PQ	98.828	0.988	-32.87	0.00	0.00	0.00	0.00
40	bus-40	100	PQ	100.895	1.009	-41.12	0.00	0.00	52.88	17.60
41	bus-41	100	PQ	101.586	1.016	-39.34	0.00	0.00	39.20	12.80
42	bus-42	100	PQ	100.522	1.005	-32.59	0.00	0.00	0.00	0.00
43	bus-43	100	PQ	101.430	1.014	-35.06	-41.50	17.20	0.00	0.00
44	bus-44	100	PQ	100.918	1.009	-35.59	0.00	0.00	16.32	3.71
45	bus-45	100	PQ	100.029	1.000	-35.51	0.00	0.00	20.02	5.41
46	bus-46	100	PQ	100.238	1.002	-38.37	0.00	0.00	65.31	22.30
47	bus-47	100	PQ	99.381	0.994	-41.07	0.00	0.00	4.82	1.56
48	bus-48	100	PQ	100.234	1.002	-39.99	60.00	29.97	93.76	22.86
49	bus-49	100	PQ	99.176	0.992	-41.38	0.00	0.00	6.82	1.78
50	bus-50	100	PQ	99.811	0.998	-38.93	-99.70	23.40	0.00	0.00
51	bus-51	100	PQ	99.365	0.994	-37.67	0.00	0.00	0.00	0.00
52	bus-52	100	PQ	101.776	1.018	-38.69	0.00	0.00	218.20	42.80
53	bus-53	100	PQ	99.861	0.999	-30.13	0.00	0.00	0.00	0.00
54	bus-54	100	PQ	99.348	0.993	-37.17	23.70	9.00	94.04	29.57
55	bus-55	100	PQ	99.916	0.999	-29.83	0.00	0.00	0.00	0.00
56	bus-56	100	PQ	99.736	0.997	-39.74	0.00	0.00	25.29	7.26
57	bus-57	100	PQ	100.190	1.002	-36.87	0.00	20.00	48.48	15.61
58	bus-58	100	PQ	101.232	1.012	-28.17	0.00	0.00	0.00	0.00
59	bus-59	100	PQ	98.803	0.988	-32.48	0.00	0.00	84.43	27.05
60	bus-60	100	PQ	99.711	0.997	-33.35	-244.00	-26.00	0.00	0.00
61	bus-61	100	PQ	98.732	0.987	-30.91	0.00	0.00	0.00	0.00
62	bus-62	100	PQ	102.719	1.027	-18.03	865.60	70.80	0.00	0.00
63	bus-63	100	PQ	99.221	0.992	-29.26	-59.10	2.90	0.00	0.00
64	bus-64	100	PQ	101.896	1.019	-28.37	0.00	0.00	0.00	0.00
65	bus-65	100	PQ	100.030	1.000	-24.84	26.30	-116.00	0.00	0.00
66	bus-66	100	PQ	100.403	1.004	-30.57	0.00	0.00	0.00	0.00

67	bus-67	100	PQ	100.658	1.007	-40.94	0.00	0.00	22.54	7.03
68	bus-68	100	PQ	101.894	1.019	-39.48	0.00	0.00	40.42	12.68
69	bus-69	100	PQ	102.525	1.025	-38.18	0.00	0.00	0.00	0.00
70	bus-70	100	PQ	102.817	1.028	-23.06	0.00	0.00	0.00	0.00
71	bus-71	100	PQ	99.479	0.995	-31.22	0.00	0.00	29.87	11.93
72	bus-72	100	PQ	101.849	1.018	-30.27	-427.00	-110.00	0.00	0.00
74	bus-74	100	PQ	101.479	1.015	-33.02	0.00	0.00	0.00	0.00
75	bus-75	100	PQ	103.180	1.032	-24.90	0.00	0.00	0.00	0.00
77	bus-77	100	PQ	101.698	1.017	-39.71	0.00	-0.10	26.41	8.78
78	bus-78	100	PQ	102.739	1.027	-37.52	0.00	0.00	79.12	0.00
79	bus-79	100	PQ	103.576	1.036	-35.49	0.00	0.00	0.00	0.00
80	bus-80	100	PQ	101.437	1.014	-37.66	0.00	0.00	15.76	5.25
81	bus-81	100	PQ	101.066	1.011	-45.43	0.00	0.00	50.88	16.80
82	bus-82	100	PQ	100.786	1.008	-41.10	0.00	0.00	62.28	20.26
83	bus-83	100	PQ	101.192	1.012	-40.23	0.00	0.00	0.00	0.00
84	bus-84	100	PQ	101.604	1.016	-37.06	0.00	0.00	37.90	9.49
85	bus-85	100	PQ	97.368	0.974	-40.45	0.00	-0.10	40.52	11.26
86	bus-86	100	PQ	97.282	0.973	-44.35	0.00	0.00	50.73	13.35
87	bus-87	100	PQ	98.304	0.983	-42.91	0.00	0.00	16.91	4.23
88	bus-88	100	PQ	99.182	0.992	-44.09	0.00	0.00	60.60	4.44
89	bus-89	100	PQ	99.440	0.994	-45.45	0.00	0.00	0.00	0.00
90	bus-90	100	PQ	96.462	0.965	-47.91	0.00	0.00	50.21	16.76
91	bus-91	100	PQ	101.431	1.014	-35.94	0.00	0.00	51.24	12.83
92	bus-92	100	PQ	100.447	1.004	-36.92	0.00	0.00	36.12	9.05
93	bus-93	100	PQ	103.146	1.031	-32.16	0.00	0.00	103.80	34.56
94	bus-94	100	PQ	102.848	1.028	-36.30	0.00	0.00	164.00	6.49
95	bus-95	100	PQ	103.206	1.032	-35.91	0.00	0.00	117.20	39.01
96	bus-96	100	PQ	100.416	1.004	-44.33	0.00	0.00	119.20	0.00
97	bus-97	100	PQ	102.881	1.029	-36.59	0.00	0.00	22.84	5.71
98	bus-98	100	PQ	104.695	1.047	-34.67	0.00	30.00	151.10	50.35
100	bus-100	100	PQ	99.231	0.992	-45.03	0.00	0.00	23.21	6.90
102	bus-102	100	PQ	100.537	1.005	-36.44	0.00	0.00	16.54	4.08
103	bus-103	100	PQ	101.673	1.017	-34.13	-322.00	45.80	0.00	0.00
104	bus-104	100	PQ	99.969	1.000	-43.79	0.00	-0.10	31.52	10.46
105	bus-105	100	PQ	104.204	1.042	-37.77	0.00	0.00	24.84	6.23
106	bus-106	100	PQ	99.735	0.997	-42.35	0.00	0.00	0.00	0.00
107	bus-107	100	PQ	99.327	0.993	-43.24	0.00	0.00	35.41	5.41
109	bus-109	100	PQ	101.501	1.015	-32.57	0.00	0.00	0.00	0.00
110	bus-110	100	PQ	102.937	1.029	-28.98	0.00	0.00	0.00	0.00
111	bus-111	100	PQ	100.776	1.008	-33.37	0.00	0.00	65.41	16.72
112	bus-112	100	PQ	102.940	1.029	-26.48	0.00	0.00	0.00	0.00
113	bus-113	100	PQ	102.693	1.027	-30.44	-32.70	95.20	0.00	0.00
115	bus-115	100	PQ	102.016	1.020	-35.46	0.00	0.00	17.32	3.34
116	bus-116	100	PQ	102.715	1.027	-36.65	0.00	0.00	56.08	11.20
117	bus-117	100	PQ	101.695	1.017	-37.34	0.00	0.00	101.90	20.06
119	bus-119	100	PQ	101.228	1.012	-34.72	0.00	0.00	0.00	0.00
120	bus-120	100	PQ	102.582	1.026	-26.82	0.00	0.00	0.00	0.00
122	bus-122	100	PQ	99.070	0.991	-45.20	0.00	0.00	47.28	9.36
123	bus-123	100	PQ	100.141	1.001	-45.58	-165.00	54.67	0.00	0.00
124	bus-124	100	PQ	101.058	1.011	-30.51	2571.00	0.00	2000.00	90.90
126	bus-126	100	PQ	101.381	1.014	-26.15	2467.00	63.80	2000.00	0.00
127	bus-127	100	PQ	98.830	0.988	-29.10	52.60	-65.00	0.00	0.00
128	bus-128	100	PQ	102.582	1.026	-26.73	0.00	0.00	0.00	0.00
129	bus-129	100	PQ	102.622	1.026	-26.95	0.00	0.00	0.00	0.00
132	bus-132	100	PQ	102.168	1.022	-29.84	-159.00	-36.10	0.00	0.00
133	bus-133	100	PQ	103.759	1.038	-31.61	0.00	0.00	30.10	6.02
134	bus-134	100	PQ	102.489	1.025	-30.34	0.00	0.00	17.46	3.34
135	bus-135	100	PQ	103.440	1.034	-31.66	0.00	0.00	20.06	4.01
136	bus-136	100	PQ	102.772	1.028	-31.93	0.00	0.00	20.06	4.01
137	bus-137	100	PQ	103.141	1.031	-31.89	0.00	0.00	20.06	4.01
138	bus-138	100	PQ	103.370	1.034	-30.71	0.00	0.00	0.00	0.00
139	bus-139	100	PQ	102.877	1.029	-31.48	0.00	0.00	10.10	2.01
140	bus-140	100	PQ	103.090	1.031	-31.81	0.00	0.00	13.58	2.68
141	bus-141	100	PQ	100.508	1.005	-33.36	0.00	0.00	0.00	0.00
142	bus-142	100	PQ	103.344	1.033	-39.81	0.00	0.00	27.09	5.35
143	bus-143	100	PQ	100.998	1.010	-38.68	0.00	0.00	21.07	4.01
144	bus-144	100	PQ	102.531	1.025	-35.48	0.00	0.00	12.37	2.01
145	bus-145	100	PQ	102.174	1.022	-33.77	0.00	0.00	10.83	2.21
146	bus-146	100	PQ	101.424	1.014	-39.13	0.00	0.00	21.33	4.01
147	bus-147	100	PQ	101.323	1.013	-38.35	0.00	0.00	216.40	42.80
148	bus-148	100	PQ	101.633	1.016	-39.36	0.00	0.00	120.00	24.00
149	bus-149	100	PQ	102.764	1.028	-23.23	0.00	0.00	0.00	0.00
150	bus-150	100	PQ	102.518	1.025	-23.88	0.00	0.00	4.80	1.60
151	bus-151	100	PQ	101.220	1.012	-26.16	0.00	0.00	24.00	8.00
152	bus-152	100	PQ	102.512	1.025	-26.26	-6.00	2.80	0.00	0.00
153	bus-153	100	PQ	101.969	1.020	-25.27	0.00	0.00	4.00	1.60
154	bus-154	100	PQ	97.769	0.978	-31.54	0.00	0.00	28.00	9.60
155	bus-155	100	PQ	98.783	0.988	-29.72	0.00	0.00	12.00	4.00
156	bus-156	100	PQ	98.130	0.981	-31.22	0.00	0.00	8.00	2.40
157	bus-157	100	PQ	98.313	0.983	-31.98	0.00	0.00	32.00	10.40
158	bus-158	100	PQ	97.106	0.971	-32.92	0.00	0.00	16.00	5.60
159	bus-159	100	PQ	97.138	0.971	-32.75	0.00	0.00	8.00	2.40
160	bus-160	100	PQ	97.407	0.974	-32.19	0.00	0.00	14.40	4.80
161	bus-161	100	PQ	100.642	1.006	-27.55	0.00	0.00	32.00	10.40
162	bus-162	100	PQ	100.300	1.003	-28.43	0.00	0.00	20.00	6.40
6	bus-6	100	PV	100.000	1.000	-19.24	794.00	180.87	0.00	0.00

73	bus-73	100	PV	100.000	1.000	-18.33	447.00	85.94	0.00	0.00
76	bus-76	100	PV	100.000	1.000	-16.36	1055.00	136.18	0.00	0.00
99	bus-99	100	PV	100.000	1.000	-31.07	130.90	5.47	0.00	0.00
101	bus-101	100	PV	100.000	1.000	-39.64	82.00	30.40	0.00	0.00
114	bus-114	100	PV	100.000	1.000	-23.59	131.00	22.33	0.00	0.00
118	bus-118	100	PV	100.000	1.000	-33.83	173.00	59.81	0.00	0.00
121	bus-121	100	PV	100.000	1.000	-20.22	620.00	151.03	0.00	0.00
125	bus-125	100	PV	102.000	1.020	-28.82	2388.00	-23.00	2000.00	0.00
130	bus-130	100	PV	103.000	1.030	-19.12	455.00	123.24	0.00	0.00
131	bus-131	100	PV	101.800	1.018	-20.10	575.00	94.31	0.00	0.00

## 3.2. FLUJO CONTINUADO

**3.2.1. Sistema IEEE 9 Barras.** El flujo continuado de éste sistema fue ejecutado en el programa ASPUPB. El resultado obtenido se encuentra en el [ANEXO F](#).

A continuación se presenta la solución obtenida con el programa sin tener en cuenta límites de potencia reactiva.

Figura 12. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

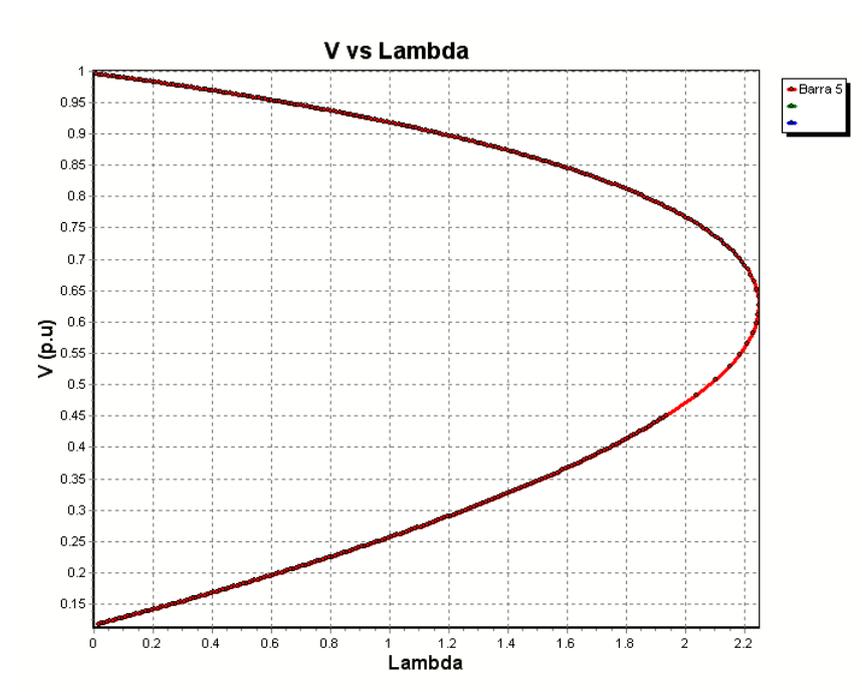


Figura 13. Curva de  $V-P$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

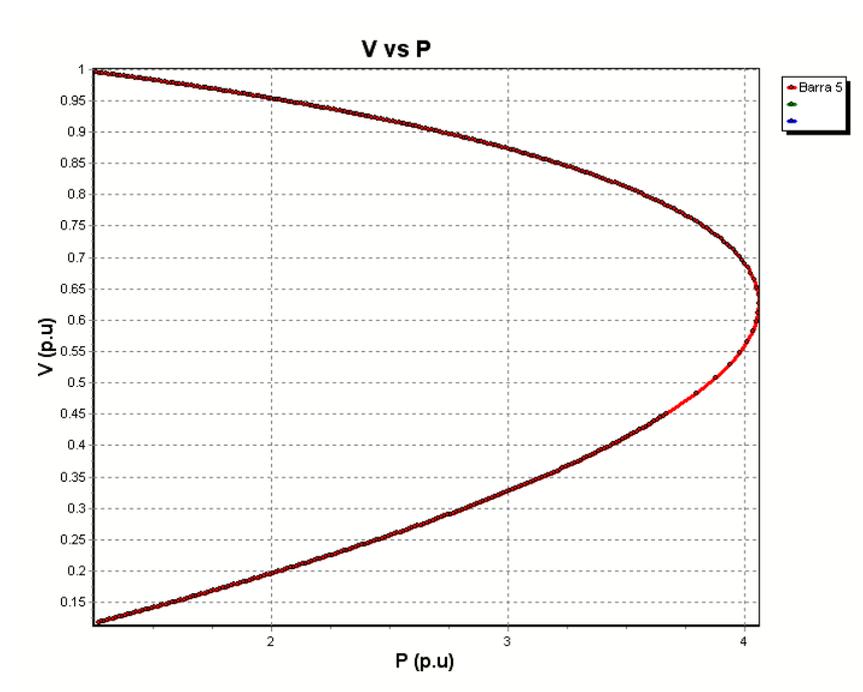
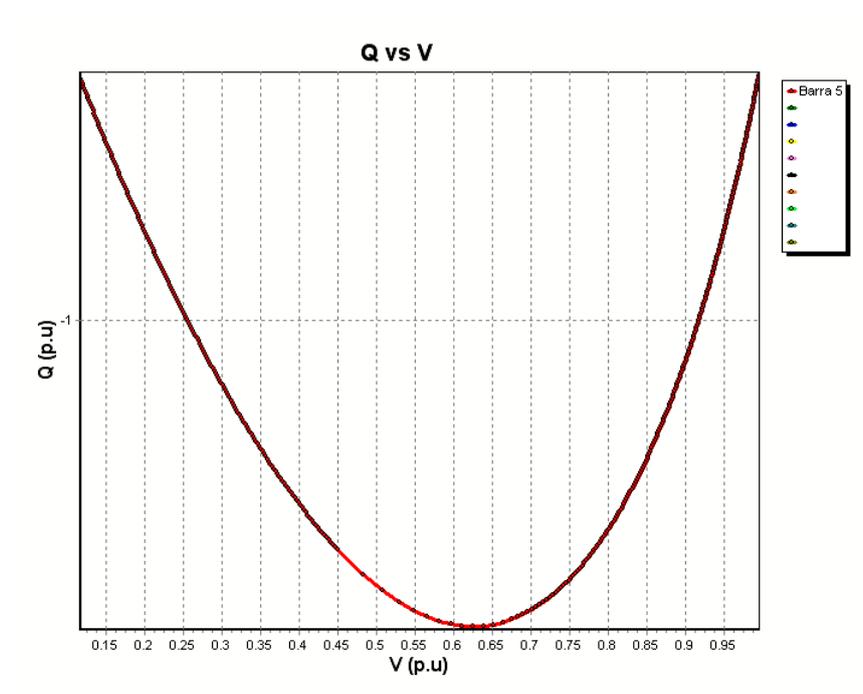


Figura 14. Curva de  $Q-V$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2



En las curvas se puede observar el comportamiento de la barra 5 a medida que se va aumentando la carga del sistema. En la Figura 12 se observa como cae la tensión en la barra a medida que se aumenta el parámetro de extensión Lambda (explicado anteriormente). En la Figura 13 se ve el mismo comportamiento, sin embargo, esta vez se puede ver la variación de la tensión a medida que se aumenta la potencia activa del sistema. Y en la Figura 14 se puede apreciar la variación de la potencia reactiva a medida que se va aumentando la tensión.

Los parámetros utilizados para la realización de las gráficas fueron los siguientes:

**Barra 5:**  $K_p = 1.25$   
 $K_q = 0.5$

El resto de barras con  $K_p$  y  $K_q$  nulos.

$\text{Sigma} = 0.01$

**3.2.2. Sistema IEEE 14 Barras.** Este sistema fue ejecutado en ASPUPB. La gráfica obtenida se encuentra en el [ANEXO G](#).

A continuación se muestra la solución que se obtuvo con el programa sin tener en cuenta límites de potencia reactiva.

Figura 15. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

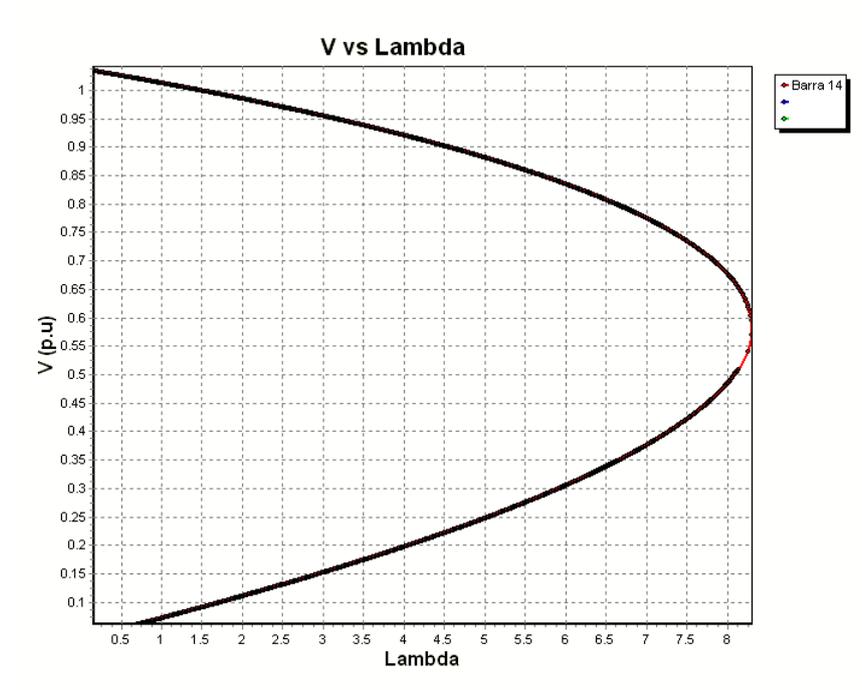


Figura 16. Curva de  $V-P$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

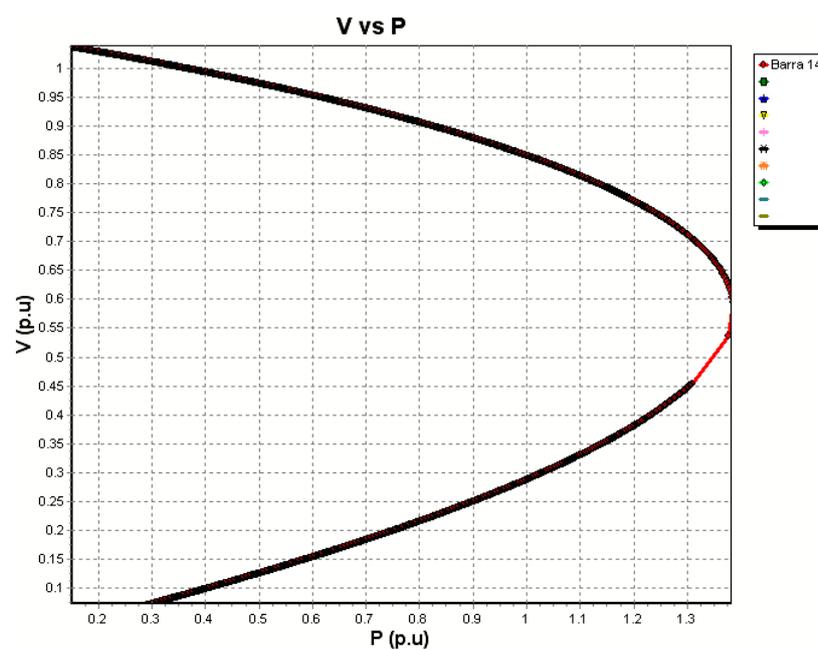
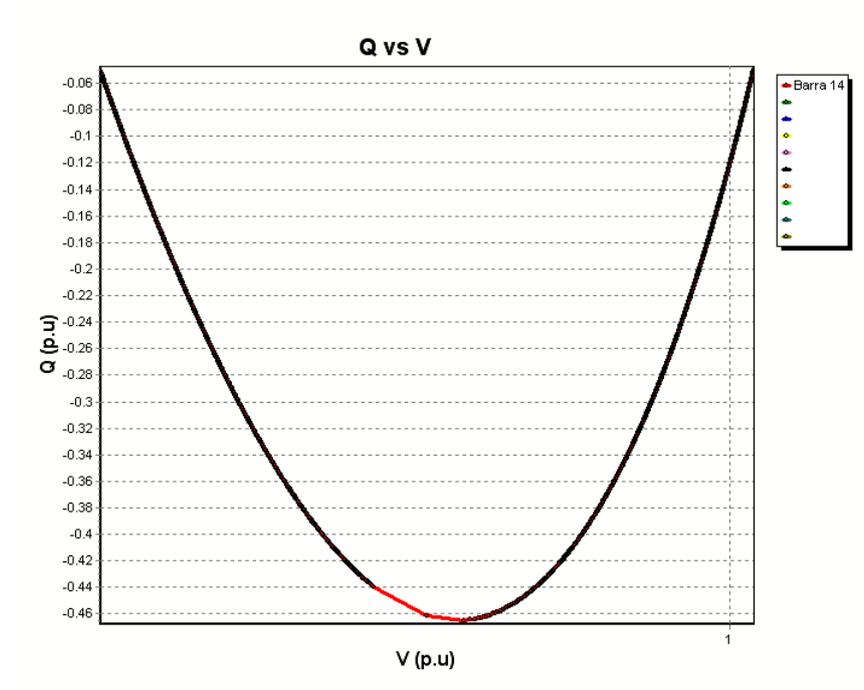


Figura 17. Curva de Q-V de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2



Los parámetros utilizados para la realización de éstas gráficas fueron los siguientes:

**Barra 14:**  $K_p = 0.149$

$K_q = 0.05$

El resto de barras con  $K_p$  y  $K_q$  nulos.

$\text{Sigma} = 0.01$

## 4. MANUAL DE USUARIO

### 4.1. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA

La utilización del programa es bastante sencilla, solo se debe tener guardado en el computador el ejecutable llamado "ASPUPB2.exe" siempre y cuando se tenga instalado el programa C++ Builder. Cuando no se tiene instalado el compilador en la máquina, se deben tener todas las librerías necesarias para correr el ejecutable. Hay una carpeta llamada "ASPUPB2" que contiene todos los elementos necesarios para correr el programa sin tener C++ Builder y solo sería copiarla en el computador. La carpeta contiene:

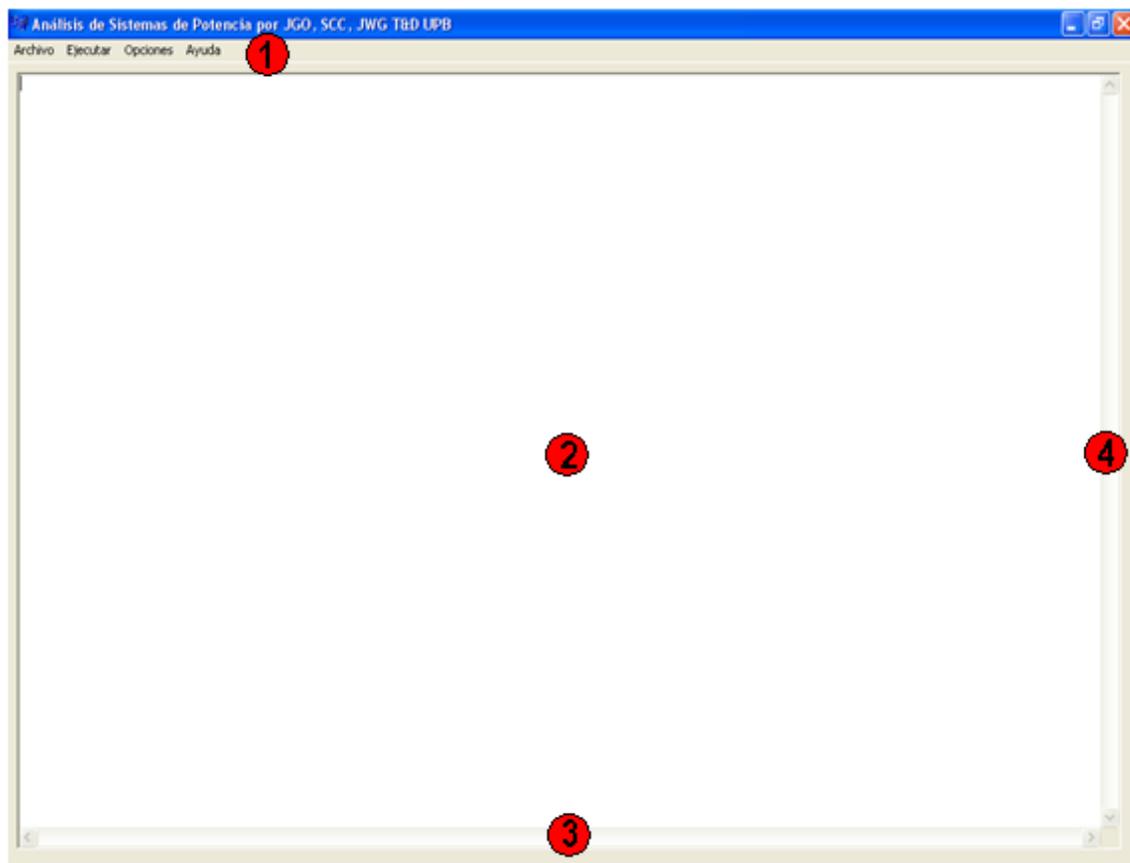
- El ejecutable llamado "ASPUPB2.exe".
- Los archivos: bcbsmp60.bpl, rtl60.bpl, xmlrtl60.bpl, tee60.bpl, vcl60.bpl, vclx60.bpl, bcb2kaxserver60.bpl
- Las librerías: borlndmm.dll, cc3260.dll, cc3260mt.dll, stlpmt45.dll
- El archivo llamado "MANUAL DE USUARIO ASPUPB2.pdf".

Para comenzar a utilizar la aplicación solo sería abrir el archivo ASPUPB2.exe e inmediatamente empezará a ejecutarse la herramienta.

### 4.2. AMBIENTE DE DESARROLLO DEL PROGRAMA

Luego de abrir el archivo ejecutable ASPUPB2.exe aparecerá el ambiente de desarrollo mostrado en la Figura 18.

Figura 18. Ventana principal del programa



Esta ventana consta de las siguientes partes:

1. Barra de menús.
2. Área de reportes.
3. Barra desplazamiento horizontal.
4. Barra desplazamiento vertical.

Ahora bien, en la barra de menús se encuentran los siguientes items:

- a.) Archivo
- b.) Ejecutar
- c.) Opciones
- d.) Ayuda

**4.2.1. Menú Archivo.** A través de éste se puede cargar el archivo en el formato que se desee (ieee o xml), guardar el reporte del flujo de cargas generado por el programa y también se encuentra la opción Salir para cerrar el programa.

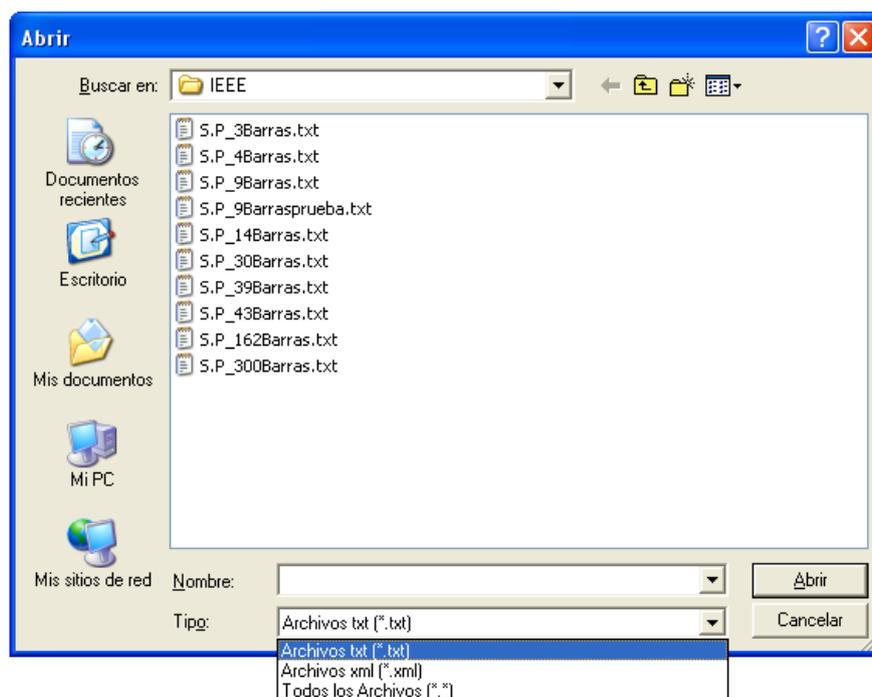
En la Figura 19 se muestra el contenido del menú Archivo.

Figura 19. Menú Archivo



Cuando se escoge la opción Cargar Archivo aparece una ventana que permite escoger la ruta donde se encuentra el archivo al que se le desea realizar el estudio. La Figura 20 muestra la ventana mencionada.

Figura 20. Ventana para cargar archivo



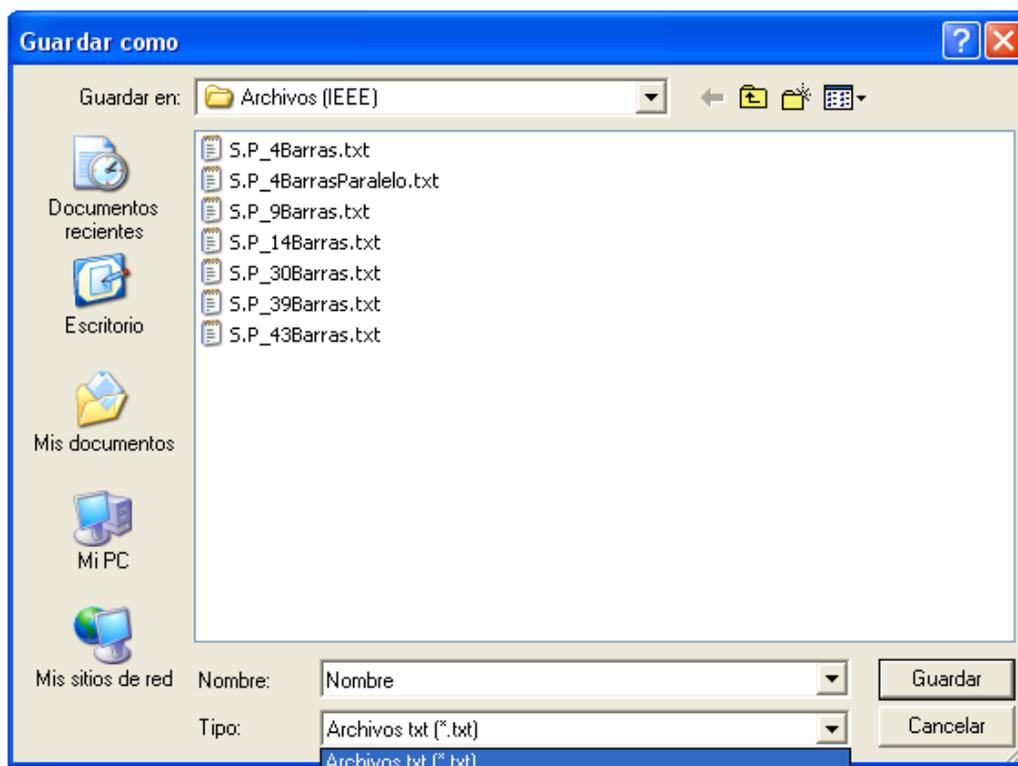
Cabe anotar que el formato XML que lee el programa se encuentra en el [Anexo B](#), el cual contiene los mismos parámetros del IEEE, sin embargo, como este formato es extensible, se podría modificar el código fuente del programa de manera que lea otro tipo de formato XML sin mayores problemas.

Cuando se escoge la opción “Todos los Archivos (\*.\*)” en el cuadro de diálogo de la Figura 20 aparecerán todos los archivos incluidos en la carpeta, y si se escoge un archivo con extensión diferente a \*.xml, se leerá el archivo como si estuviera en formato IEEE.

La opción Guardar Reporte F.C. permite almacenar el reporte generado por el programa en la ruta que se desee. Este reporte siempre se guardará con la extensión .txt. También aparece una ventana de diálogo como muestra la Figura 21.

Esta opción aparece deshabilitada mientras no se haya hecho ningún flujo de cargas de algún sistema.

Figura 21. Ventana de diálogo para guardar el reporte del flujo de cargas



**4.2.2. Menú Ejecutar.** Mediante este menú se puede realizar el flujo de cargas y el flujo continuado del sistema de potencia cargado anteriormente.

Cuando se selecciona éste menú aparecen dos opciones para ejecutar como muestra la Figura 22. Al abrir el programa, estas dos opciones aparecerán deshabilitadas, para que la opción de Flujo de Cargas se habilite, primero se debe cargar un archivo y por otro lado, la opción de Flujo Continuo se activará después de ejecutar el flujo de cargas.

Figura 22. Menú Ejecutar



Cuando se selecciona la opción Flujo de Cargas inmediatamente se ejecutará el flujo con el método de Newton-Raphson completo. A la vez, se imprime un reporte con los resultados obtenidos en el área de reportes mostrado en la Figura 18, el cual se puede guardar como se explicó en el numeral 4.2.1.

Un ejemplo del reporte generado por el programa se puede observar en la Figura 23, cuyo reporte es un sistema de potencia de 3 barras.

Figura 23. Reporte generado por ASPUPB2 de un sistema de 3 barras

```

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (SEDE MEDELLIN)
INGENIERIA ELECTRICA
GRUPO DE INVESTIGACION EN TRANSMISION Y DISTRIBUCION DE ENERGIA ELECTRICA (T60)
ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA
ARCHIVO ANALIZADO: D:\JUANGO\Tesis Ing. Eléctrica\Programa\Archivos (IEEE)\s.p_3barras.txt
SOLUCIÓN FLUJO DE CARGAS

CRITERIOS USADOS:
S_Base: 100
Tolerancia: 1E-6
Número Máximo de Iteraciones: 700
Sobretensión: 1.1
Tensión Baja: 0.9

RESUMEN DEL FLUJO DE CARGAS
Número de Iteraciones: 3
Tiempo de ejecución: Del orden de microsegundos
No se consideraron límites de Potencia Reactiva

BARRAS
Num. Nombre Tipo |V| p.u. |V_ Gen Mvar Carga Mvar
1 BUS-1 100 SL 102.000 1.020 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
2 BUS-2 100 PQ 98.782 0.988 -4.63 0.00 0.00 160.00 20.00
3 BUS-3 100 PV 100.000 1.000 0.12 80.00 0.00 0.00

LINEAS DE TRANSMISIÓN (Potencia Saliendo de la Barra)
Nombre Barra I | I | Barra J | I | Pérdidas Mvar
L-T: 1/2 MW Mvar MVA KA -18.23 -80.75 Mvar MVA KA 0.49 161.77 MW KA Mvar
L-T: 2/3 -79.25 -0.46 79.25 0.46 175.03 79.91 7.11 80.23 0.46 6.65
L-T: 3/1 0.09 -19.37 19.37 0.11 89.66 -0.05 19.76 19.76 0.11 -90.14 0.04 0.39

TRANSFORMADORES (Potencia Saliendo de la Barra)
NO HAY

GENERADORES (Potencia Entrando a la Barra)
Nombre Barra I Mvar MVA KA | I | | I | Límites de Q
GEN: 1 81.43 46.60 93.82 0.53 -29.78 -99990.00 99990.00
GEN: 3 80.00 -12.26 80.93 0.47 6.83 0.00 40.00

ELEMENTOS SHUNT (Potencia Entrando a la Barra)
NO HAY

TENSIONES FUERA DE RANGO
NO HAY

MATRIZ YBARRAS (p.u)
1 2 3
1 1.9115-j19.1705 -0.9557+j9.5852 -0.9557+j9.5852
2 -0.9557+j9.5852 1.9115-j19.1705 -0.9557+j9.5852
3 -0.9557+j9.5852 -0.9557+j9.5852 1.9115-j19.1705

Reporte Generado por ASPUPB2
Análisis de Sistemas de Potencia
Universidad Pontificia Bolivariana
Juan Gonzalo Ortega, Santiago Cadavid, Jorge W. Gonzalez
Fecha: 10/08/2009
Hora: 02:54:49 p.m.

```

El reporte está constituido por 11 partes claramente diferenciadas en la Figura 23:

1. Encabezado: incluye la dirección en memoria del archivo leído.
2. Criterios usados: muestra la potencia aparente base (en MVA), la tolerancia, el número máximo de iteraciones y los límites de sobre-tensión y baja-tensión con los que se ha ejecutado el flujo de cargas.
3. Resumen: dice el número de iteraciones y el tiempo en el que converge el flujo de cargas. También muestra los generadores que sobrepasaron los límites de potencia reactiva siempre y cuando la opción Considerar límites de Potencia Reactiva de los Generadores esté activada (ver numeral 4.2.3).
4. Barras: muestra las tensiones en kV y p.u. de las barras del sistema junto con sus respectivos ángulos en grados.
5. Líneas de Transmisión: incluye cada línea de transmisión con sus respectivas potencias y corrientes. Se muestra la información de las líneas de la forma L.T: I / J.
6. Transformadores: se muestra la información de los transformadores de la misma forma que las líneas de transmisión.
7. Generadores: muestra las potencias de generación, la corriente y los límites de potencia reactiva utilizados.
8. Elementos Shunt: aparece la información de los elementos shunt del sistema de potencia.
9. Tensiones fuera de rango: muestra que barras han sobrepasado los límites de tensión establecidos.
10. Matriz YBarras.
11. Final del reporte: muestra la fecha y la hora en la que se ejecutó el flujo de cargas junto con la propiedad intelectual del programa.

Cuando se selecciona la opción de Flujo Continuo se abre una ventana que se explicará en el numeral 4.3.

**4.2.3. Menú Opciones.** En éste se encuentra la opción Cambiar Configuraciones (ver Figura 24), que al seleccionarla, se abre una ventana como muestra la Figura 25.

Figura 24. Menú Opciones

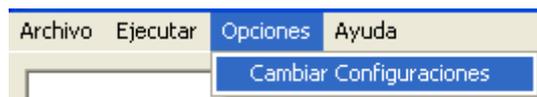


Figura 25. Ventana para cambiar configuraciones

 A screenshot of a dialog box titled 'Configuraciones'. At the top right, there is a button labeled 'Opciones por Defecto'. Below this, there are four input fields:
 

- Tolerancia: 1E-6
- Num. Max. de Iteraciones: 700 (with up/down arrows)
- Sobretensión: 1.1 p.u.
- Baja Tensión: 0.9 p.u.

 At the bottom, there is a checked checkbox labeled 'Considerar límites de Potencia Reactiva de los Generadores'. At the very bottom, there are two buttons: 'Aceptar' and 'Cancelar'.

Mediante esta ventana se pueden cambiar los criterios con los que se desea correr el programa. El botón opciones por defecto permite poner los criterios en los valores predeterminados.

No se puede acceder a otra ventana si Configuraciones se encuentra abierta. Para guardar las configuraciones se debe dar clic en el botón Aceptar. Si se presiona Cancelar se dejarán los datos anteriores, es decir, no se guardarán los cambios.

Si se efectúan cambios en las configuraciones se debe correr nuevamente el flujo de cargas.

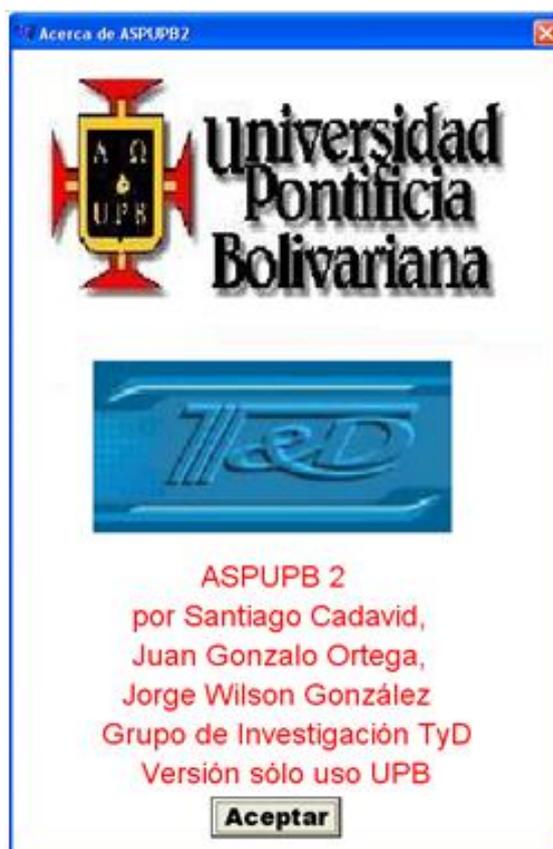
**4.2.4. Menú Ayuda.** En este menú se encuentra la opción Manual de Usuario ASPUPB2 y como su nombre lo indica, al seleccionar esta opción aparecerá el manual que ayuda a la utilización del programa. Para que el manual pueda ser abierto se debe guardar el archivo con el nombre “MANUAL DE USUARIO ASPUPB2.pdf” en la misma carpeta donde se encuentra el archivo ejecutable llamado “ASPUPB2.exe”.

También aparece la opción Acerca de ASPUPB2 que despliega una ventana como la de la Figura 27.

Figura 26. Menú Ayuda



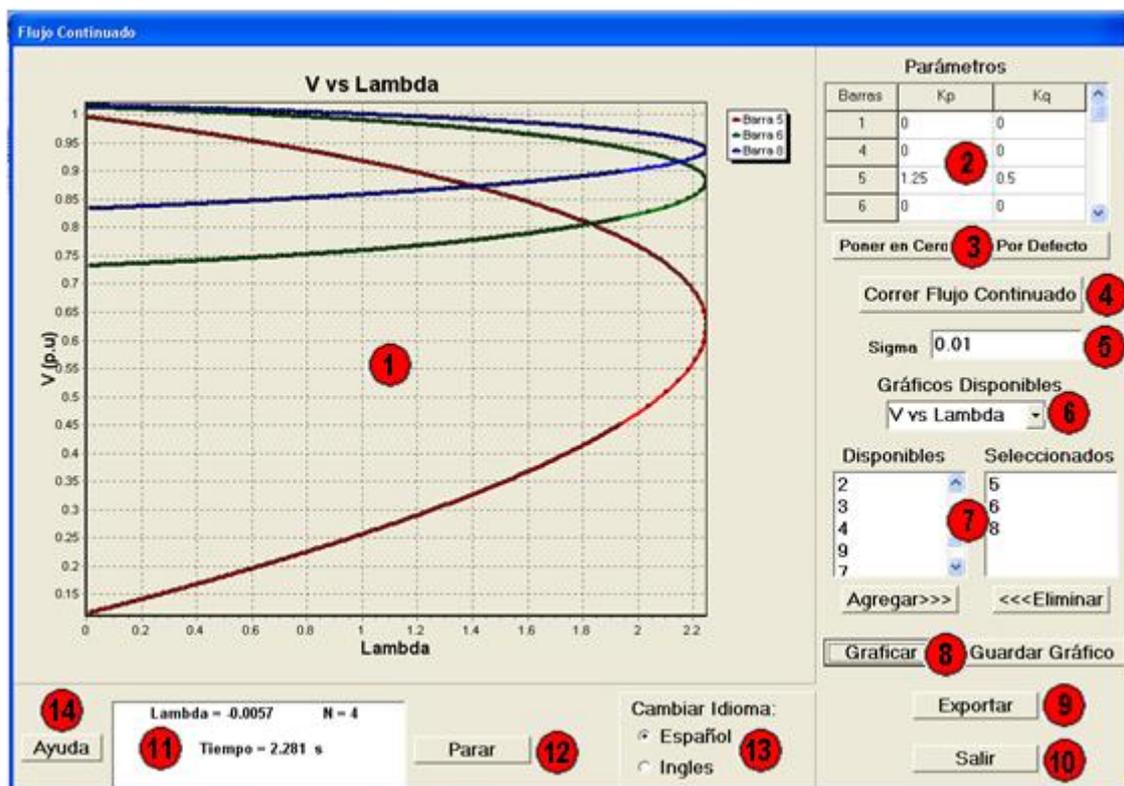
Figura 27. Acerca de ASPUPB2



### 4.3. VENTANA DE DESARROLLO DEL FLUJO CONTINUADO

La ventana para realizar el flujo continuado aparece cuando se escoge la opción Flujo Continuo del menú Ejecutar. La ventana se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Ventana de desarrollo del Flujo Continuo



Mientras esta ventana se encuentre abierta, la ventana principal del programa permanecerá deshabilitada.

La única manera de cerrar esta ventana es con el botón que se encuentra en la esquina inferior derecha (llamado Salir, ver Figura 28, opción 10).

Esta ventana se encuentra constituida por 13 partes:

1. Área de gráficos: de acuerdo con las variables seleccionadas, muestra los resultados obtenidos luego de haber realizado el flujo continuado. En la

esquina superior derecha se encuentran las etiquetas que muestran a que variable pertenece cada gráfico. Se puede hacer Zoom a través del mouse, presionando el botón izquierdo y arrastrando hacia la derecha se acerca en el área seleccionada, y si se arrastra el mouse de izquierda a derecha se aleja de nuevo y vuelve a la vista por defecto.

2. Tabla de parámetros Kp y Kq: permite al usuario modificar los parámetros Kp y Kq con los que se realizará el flujo continuado.

3. Botones Poner en Ceros y Por Defecto: el botón Poner en Ceros hace que los valores de los parámetros Kp y Kq de todas las barras se pongan en cero. Y por el contrario, cuando se presiona el botón Por Defecto, los parámetros Kp y Kq de las barras toman los valores por defecto, los cuales son las potencias de carga de cada barra en p.u. En otras palabras, el valor por defecto de Kp es la potencia activa de carga de la barra en p.u, y Kq es la potencia reactiva de carga en p.u.

4. Botón Correr Flujo Continuado: al seleccionar este botón, comienza a correr el flujo con los parámetros escogidos y mientras el programa esté realizando el flujo continuado, las únicas opciones habilitadas son la 6, 7, 11, 12 y 13. Cuando se termina el proceso, todas las opciones vuelven a habilitarse.

5. Sigma: a través de esta caja de edición se le permite al usuario modificar el valor de sigma con el que se realizará el flujo continuado.

6. Tipo de gráfica: a través de este objeto se despliegan las opciones del tipo de gráfica que se desea ver en el área de gráficos.

7. Selección de barras: mediante éste se le permite al usuario escoger la barra a la que se le desea hacer el estudio (pueden seleccionarse máximo 10 barras). Al lado izquierdo se muestran las barras disponibles del sistema y al lado derecho se muestran las que han sido seleccionadas. El usuario puede agregar o eliminar las barras de dos formas: seleccionando la barra deseada y presionando los botones agregar o eliminar según sea el caso ó haciendo doble clic sobre dicha barra.

8. Botones Graficar y Guardar Gráfica: con el botón Graficar se imprime el gráfico seleccionado en el área de gráficos y el botón Guardar Gráfico permite

guardar la gráfica mostrada en la ruta que se desee a través de una ventana de diálogo como la mostrada en la Figura 21.

9. Exportar: cuando se presiona este botón aparece un cuadro de diálogo para guardar en un archivo con extensión \*.csv los datos de la gráfica.

10. Botón Salir: mediante este botón se cierra la ventana de desarrollo del flujo continuado.

11. Cuadro de datos: muestra los valores de lambda, número de iteraciones y el tiempo transcurrido.

12. Botón Parar: presionando este botón se detiene el proceso del flujo continuado. Éste es bastante útil para cuando el proceso se haga bastante largo al no converger a una solución.

13. Cambiar Idioma: a través de esta opción se puede cambiar el idioma del entorno gráfico de la ventana (Inglés y Español).

14. Ayuda: presionando éste botón se abre el manual de usuario en pdf para ayudar al manejo del programa.

## 5. CONCLUSIONES

Los apagones son fenómenos que han generado mucho 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 puede modificar mejorando su funcionamiento sin la necesidad de contar con permisos o licencias. Además, tener herramientas que realicen estudios de estabilidad de tensión, realza el nombre de la facultad de Ingeniería Eléctrica.

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 volviendo 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, a diferencia del Matlab, que al ser su licencia tan costosa, dificulta la utilización del mismo. Además, Matlab es más utilizada para propósitos educativos, mientras que con C++ se puede llegar a investigaciones de grandes niveles.

Se garantiza la confiabilidad de los resultados que se obtienen con esta herramienta porque se han comparado con los obtenidos con programas existentes.

En el futuro, a través de una tesis para optar al título de ingeniería electrónica, se mejorará el programa aumentando la velocidad de ejecución, para que de esta manera se pueda trabajar en tiempo real y el programa sea mucho más eficiente. Además, se añadirán algunas funciones que permitirán un mejor análisis de los sistemas de potencia.

## BIBLIOGRAFÍA

BEDOYA CADENA, Andrés Fernando. Propuesta de un modelo estándar xml para intercambio de datos de análisis eléctrico. Medellín: XM S.A. ESP, 2009.

CORREDOR A., Pablo H. Sistemas de Potencia. Medellín: UPB, 1992 (Serie Nabla-Delta No 27)

CORTIJO BON, Francisco José y BERZAL GALIA, Fernando. Curso de C++ Builder [en línea]. <Disponible en: <http://elvex.ugr.es/decsai/builder/>> [consulta: 7 Jul. 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 Jun. 2009]

FERNÁNDEZ BREIS, Jesualdo Tomás. Desarrollo de aplicaciones interactivas [en línea]. <Disponible en: <http://dis.um.es/~jfernand/0506/dai/builder.pdf>> [consulta: 7 Jul. 2009]

GLOVER, J. Duncan. Power system analysis and design. Stamford: Cengage Learning, 2008.

GONZÁLEZ SÁNCHEZ, Jorge Wilson. Voltage stability model for hvdc systems connected to very weak ac networks. 2006. Trabajo de grado (PhD).

KUNDUR, Prabha. Definition and Classification of Power System Stability. En: IEEE Transactions on Power Systems. New York. Vol.19 (May 2004); pp. 1387-1401.

\_\_\_\_\_. Power System Stability and Control. Serie EPRI McGraw-Hill. USA: 1994. Biblioteca UPB.

LEDESMA, Pablo. OpenCourseWare de la Universidad Carlos III de Madrid. [en línea] <Disponible en: [http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II\\_OCSE\\_RT/node19.html](http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RT/node19.html)> [consulta: 26 Feb. 2009]

LEÓN, Ramón Alberto y KUMAR Y., Sree Rama. Voltage Collapse Events. Iowa State University of Science and Technology.

MESA JARAMILLO, Santiago. Simulación gráfica de sistemas de potencia con facts en operación simétrica usando Matlab. Medellín, 2003. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Pontificia Bolivariana. 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 Jun. 2009]

QUINTANA, Victor H.; MIRANDA D., Rodrigo y VARGAS D., Luis. Voltage collapse scenario in the chilean interconnected system. Chile: IEEE Transactions on Power Systems, 1999, Vol. 14.

SAADAT, Hadi. Power system analysis. Singapore: McGraw-Hill,1999.

SABELLI, C. y CORSI, S. General Blackout in Italy, Sunday September 28, 2003, h. 03:28:00.

STEVENSON, William D. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. México: McGraw - Hill , c 1996

Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus. Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data. Noviembre/Diciembre 1973.

UNIVERSITY OF WATERLOO. Power and Energy Systems Group [en línea] <Disponible en: <http://www.power.uwaterloo.ca/~claudio/software/pflow.htm>>. [consulta: 9 Jun. 2009]

VOURNAS, Costas. Technical Summary on the Athens and Southern Greece Blackout of July 12, 2004. Atenas: s.n., 2004.

ZULUAGA LÓPEZ, Luis Julián y PRÉSIGA DUQUE, Ricaurte De J. Colapso de Voltaje. Una Experiencia en la Operación del Sistema Eléctrico Colombo-Ecuatoriano. Medellín: Interconexión Eléctrica S.A E.S.P.



```

Columns 7-17 Name (A) (left justify) *
AA
Columns 19-20 Load flow area number (I) Don't use zero! *
P
Columns 21-23 Loss zone number (I)
TB
Columns 25-26 Type (I) *
      0 - Unregulated (load, PQ)
      1 - Hold MVAR generation within voltage limits, (PQ)
      2 - Hold voltage within VAR limits (gen, PV)
      3 - Hold voltage and angle (swing, V-Theta) (must always
          have one)

|V|
Columns 28-33 Final voltage, p.u. (F) *
|_V_
Columns 34-40 Final angle, degrees (F) *
Pcar
Columns 41-49 Load MW (F) *
Qcar
Columns 50-59 Load MVAR (F) *
Pgen
Columns 60-67 Generation MW (F) *
Qgen
Columns 68-75 Generation MVAR (F) *
Vbase
Columns 77-83 Base KV (F)
uset
Columns 85-90 Desired volts (pu) (F) (This is desired remote voltage if
this bus is controlling another bus.

max
Columns 91-98 Maximum MVAR or voltage limit (F)
min
Columns 99-106 Minimum MVAR or voltage limit (F)
G
Columns 107-114 Shunt conductance G (per unit) (F) *
B
Columns 115-122 Shunt susceptance B (per unit) (F) *
BR
Columns 124-127 Remote controlled bus number

Section end card:
-----
-999
Columns 1- 4 -999

Branch Data *
=====

Section start card *:
-----
BRANCH DATA FOLLOWS                NNNNN ITEMS
Columns 1-16 BRANCH DATA FOLLOWS (not clear that any more than BRANCH
is significant) *

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Branch data cards *:
-----
[I ] [J ] AA P 1 T[ R      ][ X      ][ B      ][SN ] [SE ] [ST ] [BC] S [ t ] 0.00000[tmin ][tmax ] [paso] [max
][min ]

I
Columns 1- 4 Tap bus number (I) *
      For transformers or phase shifters, the side of the model
      the non-unity tap is on

J
Columns 6- 9 Z bus number (I) *
      For transformers and phase shifters, the side of the model
      the device impedance is on.

AA
Columns 11-12 Load flow area (I)

```

P  
Columns 13-14 Loss zone (I)  
1  
Column 17 Circuit (I) \* (Use 1 for single lines)  
T  
Column 19 Type (I) \*  
0 - Transmission line  
1 - Fixed tap  
2 - Variable tap for voltage control (TCUL, LTC)  
3 - Variable tap (turns ratio) for MVAR control  
4 - Variable phase angle for MW control (phase shifter)

R  
Columns 20-29 Branch resistance R, per unit (F) \*  
X  
Columns 30-40 Branch reactance X, per unit (F) \* No zero impedance lines  
B  
Columns 41-50 Line charging B, per unit (F) \* (total line charging, +B)  
SN  
Columns 51-55 Line MVA rating No 1 (I) Left justify!  
SE  
Columns 57-61 Line MVA rating No 2 (I) Left justify!  
ST  
Columns 63-67 Line MVA rating No 3 (I) Left justify!  
BC  
Columns 69-72 Control bus number  
S  
Column 74 Side (I)  
0 - Controlled bus is one of the terminals  
1 - Controlled bus is near the tap side  
2 - Controlled bus is near the impedance side (Z bus)

t  
Columns 77-82 Transformer final turns ratio (F)  
0.00000  
Columns 84-90 Transformer (phase shifter) final angle (F)  
tmin  
Columns 91-97 Minimum tap or phase shift (F)  
tmax  
Columns 98-104 Maximum tap or phase shift (F)  
paso  
Columns 106-111 Step size (F)  
max  
Columns 113-119 Minimum voltage, MVAR or MW limit (F)  
min  
Columns 120-126 Maximum voltage, MVAR or MW limit (F)

Section end card:  
-----  
-999  
Columns 1- 4 -999

Loss Zone Data  
=====

Section start card  
-----

Columns 1-16 LOSS ZONES FOLLOWS (not clear that any more than LOSS  
is significant)

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Loss Zone Cards:  
-----

Columns 1- 3 Loss zone number (I)  
Columns 5-16 Loss zone name (A)

Section end card:  
-----

Columns 1- 3 -99

## Interchange Data \*

=====

## Section start card

-----

Columns 1-16 INTERCHANGE DATA FOLLOWS (not clear that any more than  
first word is significant).

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

## Interchange Data Cards \*:

-----

Columns 1- 2 Area number (I) no zeros! \*

Columns 4- 7 Interchange slack bus number (I) \*

Columns 9-20 Alternate swing bus name (A)

Columns 21-28 Area interchange export, MW (F) (+ = out) \*

Columns 30-35 Area interchange tolerance, MW (F) \*

Columns 38-43 Area code (abbreviated name) (A) \*

Columns 46-75 Area name (A)

## Section end card:

-----

Columns 1- 2 -9

## Tie Line Data

=====

## Section start card

-----

Columns 1-16 TIE LINES FOLLOW (not clear that any more than TIE  
is significant)

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

## Tie Line Cards:

-----

Columns 1- 4 Metered bus number (I)

Columns 7-8 Metered area number (I)

Columns 11-14 Non-metered bus number (I)

Columns 17-18 Non-metered area number (I)

Column 21 Circuit number

## Section end card:

-----

-999

Columns 1- 3 -999

Fuente: "Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data",  
Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow  
Data, \_IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems\_, Vol. PAS-92,  
No. 6, Noviembre/Diciembre 1973, pp. 1916-1925.

## ANEXO B: SISTEMA DE 4 BARRAS DE LA IEEE EN FORMATO XML

```

<System>
  <Encabezado>
    <Autor>IEEE</Autor>
    <Fecha>00-00-01</Fecha>
    <Sbase>100,000000</Sbase>
  </Encabezado>
  <BarrasLista>
    <Barra>
      <NumBarra>1</NumBarra>
      <Nombre>Bus_1</Nombre>
      <Tipo>3</Tipo>
      <V>1,08</V>
      <Angulo>0,00</Angulo>
      <Pcarga>0,00</Pcarga>
      <Qcarga>0,00</Qcarga>
      <Pgen>200,00</Pgen>
      <Qgen>71,01961</Qgen>
      <Vnom>230,000000</Vnom>
      <Qmax>999900</Qmax>
      <Qmin>-99990</Qmin>
      <G>0,00</G>
      <B>0,00</B>
    </Barra>
    <Barra>
      <NumBarra>2</NumBarra>
      <Nombre>Bus_2</Nombre>
      <Tipo>0</Tipo>
      <V>1,018</V>
      <Angulo>-21,33</Angulo>
      <Pcarga>0,00</Pcarga>
      <Qcarga>0,00</Qcarga>
      <Pgen>0,00</Pgen>
      <Qgen>0,00</Qgen>
      <Vnom>230,000000</Vnom>
      <Qmax>0</Qmax>
      <Qmin>0</Qmin>
      <G>0,00</G>
      <B>0,00</B>
    </Barra>
    <Barra>
      <NumBarra>3</NumBarra>
      <Nombre>Bus_3</Nombre>
      <Tipo>0</Tipo>
      <V>0,98</V>
      <Angulo>-29,97</Angulo>
      <Pcarga>300,00</Pcarga>
      <Qcarga>100,00</Qcarga>
      <Pgen>0,00</Pgen>
      <Qgen>0,00</Qgen>
      <Vnom>230,000000</Vnom>
      <Qmax>0</Qmax>
      <Qmin>0</Qmin>
      <G>0,00</G>
      <B>0,50</B>
    </Barra>
    <Barra>
      <NumBarra>4</NumBarra>
      <Nombre>Bus_4</Nombre>
      <Tipo>2</Tipo>
      <V>1,05</V>
      <Angulo>-19,72</Angulo>
      <Pcarga>0,00</Pcarga>
      <Qcarga>0,00</Qcarga>
      <Pgen>100,00</Pgen>

```

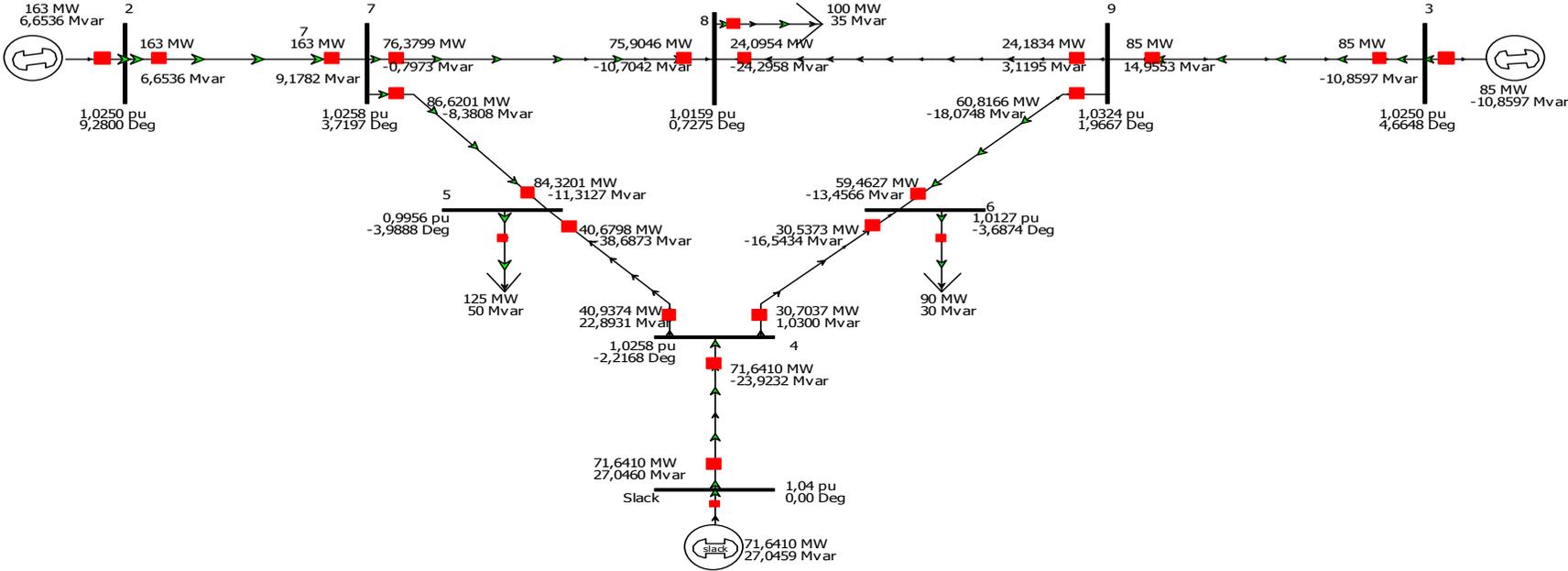
```
<Qgen>112,5976</Qgen>
  <Vnom>230,000000</Vnom>
  <Qmax>999900</Qmax>
  <Qmin>-999900</Qmin>
  <G>0,00</G>
  <B>0,00</B>
</Barra>
</BarrasLista>
<LineasLista>
  <Linea>
    <BarraInicial>1</BarraInicial>
    <BarraFinal>2</BarraFinal>
    <Tipo>0</Tipo>
    <Paralelo>1</Paralelo>
    <R>0,00</R>
    <X>0,2</X>
    <B>0,00</B>
    <Tap>0</Tap>
  </Linea>
  <Linea>
    <BarraInicial>2</BarraInicial>
    <BarraFinal>3</BarraFinal>
    <Tipo>0</Tipo>
    <Paralelo>1</Paralelo>
    <R>0,00</R>
    <X>0,05</X>
    <B>0,00</B>
    <Tap>0</Tap>
  </Linea>
  <Linea>
    <BarraInicial>2</BarraInicial>
    <BarraFinal>4</BarraFinal>
    <Tipo>0</Tipo>
    <Paralelo>1</Paralelo>
    <R>0,00</R>
    <X>0,03</X>
    <B>0,00</B>
    <Tap>0</Tap>
  </Linea>
</LineasLista>
</System>
```

**ANEXO C: FLUJO DE CARGAS DEL SISTEMA IEEE 9 BARRAS OBTENIDAS POR POWERWORLD Y ASPUPB**

**POWERWORLD:**

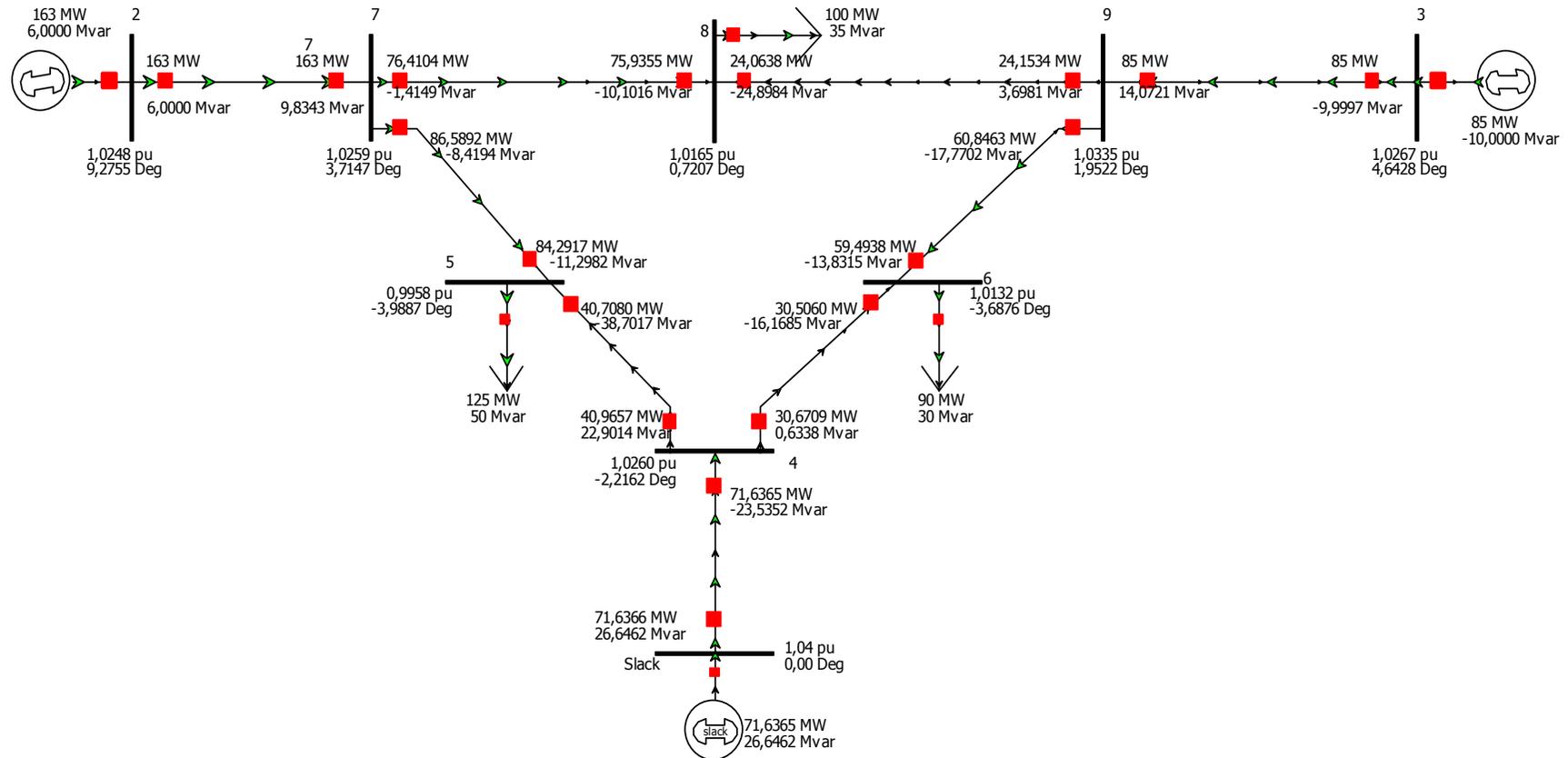
Sin tener en cuenta los límites de potencia reactiva, se obtuvo la siguiente solución:

Figura 29. Flujo de cargas con PowerWorld del sistema IEEE 9 Barras sin considerar límites de potencia reactiva



Considerando los límites de potencia reactiva nombrados en el numeral 3.1.1, se obtuvo lo siguiente:

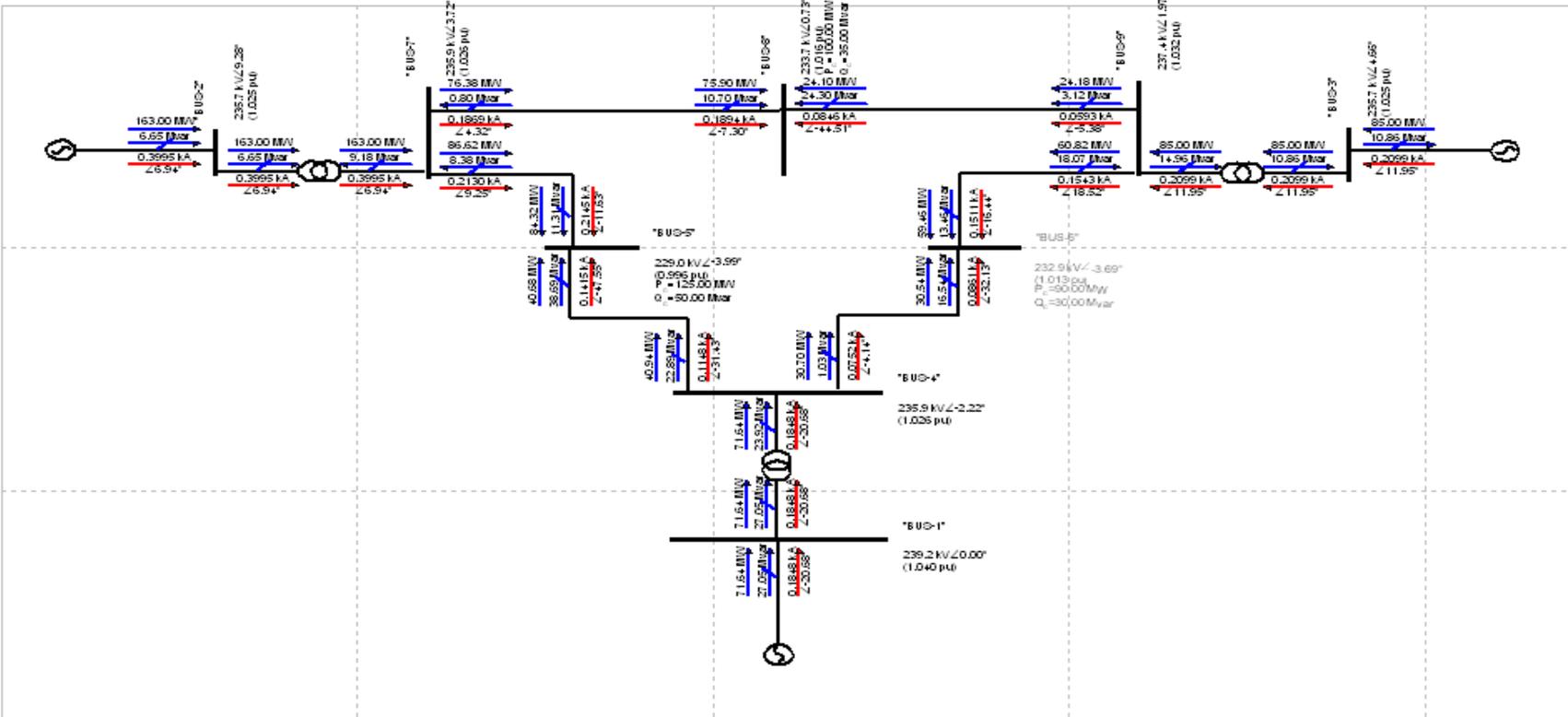
Figura 30. Flujo de cargas con PowerWorld del sistema IEEE 9 Barras considerando límites de potencia reactiva



ASPUPB:

Con este programa, solo se obtiene la solución sin considerar límites de potencia reactiva. La solución en modo gráfico se puede ver en la Figura 31.

Figura 31. Flujo de cargas con ASPUPB del sistema IEEE 9 Barras



## La solución en modo texto se muestra a continuación:

```

% UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (SEDE MEDELLÍN)
% INGENIERÍA ELÉCTRICA
% GRUPO INVESTIGACIÓN EN TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (T&d)
% ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA
% ARCHIVO ANALIZADO: C:\Archivos de programa\Matlab7\work\ASPUPB\Ejemplos\ieee-009BUS.smj
% TÍTULO: IEEE
% 009 BUS SYSTEM
% SOLUCIÓN FLUJO DE CARGAS
%
% CRITERIOS USADOS:
% S_base: 100.00 MVA
% Error Máximo de Potencia Inyectada: 1.00 kW
% Número Máximo de Iteraciones: 100
% Sobrecarga: 99.00 %
% Sobretenión: 1.100 pu
% Tensión Baja: 0.900 pu
%
% RESUMEN DE LA CORRIDA:
% Máximo error de P=0.32 kW (Barra BUS-4). Máximo error de Q=0.03 kvar (Barra BUS-2). Iteraciones 5. Tiempo de ejecución 0.906 seg.
% El Resultado es CONFIABLE

BARRAS
No) Nombre (Tipo) |V| |V_°| Gen Carga Estado
      kW pu |V_°| MW Mvar MW Mvar
1) BUS-1 SL 239.2 1.040 0.00 70.64 27.05 0.00 0.00 ENERGIZADA
2) BUS-2 PV 235.7 1.025 9.28 163.00 6.65 0.00 0.00 ENERGIZADA
3) BUS-3 PV 235.7 1.025 4.66 85.00 -10.86 0.00 0.00 ENERGIZADA
4) BUS-4 FQ 235.9 1.026 -2.22 0.00 0.00 0.00 0.00 ENERGIZADA
5) BUS-5 FQ 229.0 0.996 -3.99 0.00 0.00 125.00 50.00 ENERGIZADA
6) BUS-6 FQ 232.9 1.013 -3.69 0.00 0.00 90.00 30.00 ENERGIZADA
7) BUS-7 FQ 235.9 1.026 3.72 0.00 0.00 0.00 0.00 ENERGIZADA
8) BUS-8 FQ 233.7 1.016 0.73 0.00 0.00 100.00 35.00 ENERGIZADA
9) BUS-9 FQ 237.4 1.032 1.97 0.00 0.00 0.00 0.00 ENERGIZADA

LINEAS DE TRANSMISIÓN (Potencia Saliendo de la Barra)
No) Nombre Barra I |I| |I_°| Barra J |I| |I_°| Pérd Estado
      MW Mvar MVA kA |I_°| MW Mvar MVA kA |I_°| MW Mvar
1) LT: BUS-7/BUS-8 76.38 -0.80 76.38 0.1869 4.32 -75.90 -10.70 76.66 0.1894 172.70 0.48 -11.50 ENERGIZADO
2) LT: BUS-9/BUS-8 24.18 3.12 24.38 0.0593 -5.38 -24.10 -24.30 34.22 0.0846 135.49 0.09 -21.18 ENERGIZADO
3) LT: BUS-7/BUS-5 86.62 -8.38 87.02 0.2130 9.25 -84.32 -11.31 85.08 0.2145 168.37 2.30 -19.69 ENERGIZADO
4) LT: BUS-9/BUS-6 60.82 -18.07 63.45 0.1543 18.52 -59.46 -13.46 60.97 0.1511 163.56 1.35 -31.53 ENERGIZADO
5) LT: BUS-5/BUS-4 -40.68 -38.69 56.14 0.1415 132.45 40.94 22.89 46.90 0.1148 -31.43 0.26 -15.79 ENERGIZADO
6) LT: BUS-6/BUS-4 -30.54 -16.54 34.73 0.0861 147.87 30.70 1.03 30.72 0.0752 -4.14 0.17 -15.51 ENERGIZADO

TRANSFORMADORES BIDEVANADOS (Potencia Saliendo de la Barra)
No) Nombre Barra I |I| |I_°| Barra J |I| |I_°| Pérd Tap Estado
      MW Mvar MVA kA |I_°| MW Mvar MVA kA |I_°| MW Mvar %
10) TRF: BUS-4/BUS-1 -71.64 -23.92 75.53 0.1848 159.32 71.64 27.05 76.58 0.1848 -20.68 0.00 3.12 0.00 ENERGIZADO
11) TRF: BUS-7/BUS-2 -163.00 9.18 163.26 0.3995 -173.06 163.00 6.65 163.14 0.3995 6.94 0.00 15.83 0.00 ENERGIZADO
12) TRF: BUS-9/BUS-3 -85.00 14.96 86.31 0.2099 -168.05 85.00 -10.86 85.69 0.2099 11.95 0.00 4.10 0.00 ENERGIZADO

GENERADORES (Potencia Entrando a la Barra)
No) Nombre Barra I |I| |I_°| Pérd |E| |E_°| Estado
      MW Mvar MVA kA |I_°| MW Mvar kV pu |E_°|
7) GEN: BUS-1 71.64 27.05 76.58 0.1848 -20.68 0.43 19.67 268.3 1.166 12.27 ENERGIZADO
8) GEN: BUS-2 163.00 6.65 163.14 0.3995 6.94 1.99 91.91 277.7 1.208 37.80 ENERGIZADO
9) GEN: BUS-3 85.00 -10.86 85.69 0.2099 11.95 0.55 25.36 238.7 1.038 21.57 ENERGIZADO

IMPEDANCIAS SHUNT (Potencia Saliendo de la Barra)
NO_HAY

TRIDEVANADOS (Potencia Saliendo de la Barra)
NO_HAY

COMPENSACIONES SERIE (Potencia Saliendo de la Barra)
NO_HAY

```

COMPENSACIONES SHUNT (Potencia Entrando a la Barra)  
NO\_HAY

HVDC (Potencia Entrando a la Barra)  
NO\_HAY

HVDC concentrado modo cc-cea (Potencia entrando a la Barra)  
NO\_HAY

TENSIONES FUERA DE RANGO  
NO\_HAY

EQUIPOS CON SOBRECARGA  
NO\_HAY

MATRIZ Ybarra (PU SP)

BUS-1	0.0000-j17.3611	0	0	0.0000+j17.3611	0	0	0	0	0	0
BUS-2	0	0.0000-j16.0000	0	0	0	0	0.0000+j16.0000	0	0	0
BUS-3	0	0	0.0000-j17.0648	0	0	0	0	0	0.0000+j17.0648	0
BUS-4	0.0000+j17.3611	0	0	3.3074-j39.3089	-1.3652+j11.6041	-1.9422+j10.5107	0	0	0	0
BUS-5	0	0	0	-1.3652+j11.6041	2.5528-j17.3382	0	-1.1876+j5.9751	0	0	0
BUS-6	0	0	0	-1.9422+j10.5107	0	3.2242-j15.8409	0	0	0	-1.2820+j5.5882
BUS-7	0	0.0000+j16.0000	0	0	-1.1876+j5.9751	0	2.8047-j35.4456	-1.6171+j13.6980	0	0
BUS-8	0	0	0	0	0	0	-1.6171+j13.6980	2.7722-j23.3032	-1.1551+j9.7843	0
BUS-9	0	0	0.0000+j17.0648	0	0	0	-1.2820+j5.5882	0	-1.1551+j9.7843	2.4371-j32.1539

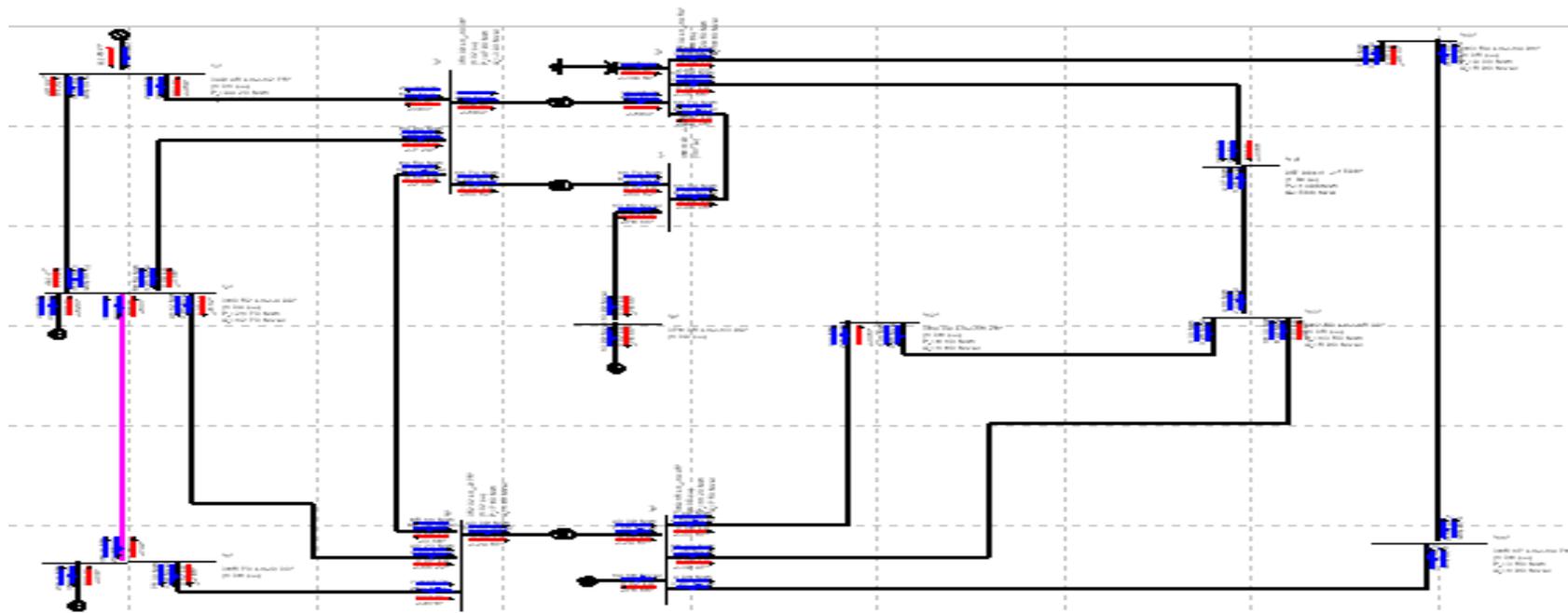
% Reporte Generado por ASPUPB\_V1.0  
% Análisis de Sistemas de Potencia  
% Universidad Pontificia Bolivariana  
% Santiago Mesa, Jorge W. Gonzalez  
%  
% 19-Aug-2009 12:05:47

## ANEXO D: FLUJO DE CARGAS DEL SISTEMA IEEE 14 BARRAS OBTENIDAS POR ASPUPB

### ASPUPB:

Solo se obtiene la solución sin considerar límites de potencia reactiva. La solución en modo gráfico se puede ver en la Figura 32.

Figura 32. Flujo de cargas con ASPUPB del sistema IEEE 14 Barras



## La solución en modo texto se muestra a continuación:

```
% UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (SEDE MEDELLÍN)
% INGENIERÍA ELÉCTRICA
% GRUPO INVESTIGACIÓN EN TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (T&D)
% ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA
% ARCHIVO ANALIZADO: D:\JUANGO\Programas Electrica\ASPUPB\ieee-014bus-Pruebas-Abrill62007.smj
% TÍTULO:
%
% SOLUCIÓN FLUJO DE CARGAS
%
% CRITERIOS USADOS:
% S_base: 100.00 MVA
% Error Máximo de Potencia Inyectada: 0.10 kW
% Número Máximo de Iteraciones: 700
% Sobrecarga: 99.00 %
% Sobretenión: 1.10 pu
% Tensión Baja: 0.90 pu
%
% RESUMEN DE LA CORRIDA:
% Máximo error de P=0.04 kW (Barra 13). Máximo error de Q=0.00 kvar (Barra 1). Iteraciones 6. Tiempo de ejecución 0.891 seg.
% El Resultado es CONFIABLE
```

### BARRAS

No)	Nombre	(Tipo)	V	∠V	Gen	Carga	Estado
			kV	°	MW	Mvar	
1)	1	SL	365.70	1.06	0.00	232.39	ENERGIZADA
2)	2	PV	360.52	1.04	40.00	42.40	ENERGIZADA
3)	3	PV	348.45	1.01	-12.75	23.39	ENERGIZADA
4)	4	FQ	351.08	1.02	-10.36	0.00	ENERGIZADA
5)	5	FQ	352.02	1.02	-8.75	0.00	ENERGIZADA
6)	9	FQ	365.39	1.06	-14.54	0.00	ENERGIZADA
7)	7	FQ	368.31	1.07	-13.89	0.00	ENERGIZADA
8)	8	FV	376.05	1.09	-13.89	0.00	ENERGIZADA
9)	6	PV	369.15	1.07	-14.45	0.00	ENERGIZADA
10)	12	FQ	364.09	1.06	-15.26	0.00	ENERGIZADA
11)	13	FQ	362.59	1.05	-15.30	0.00	ENERGIZADA
12)	14	FQ	357.98	1.04	-15.86	0.00	ENERGIZADA
13)	11	FQ	365.17	1.06	-14.76	0.00	ENERGIZADA
14)	10	FQ	363.54	1.05	-14.81	0.00	ENERGIZADA

### LINEAS DE TRANSMISIÓN (Potencia Saliendo de la Barra)

No)	Nombre	Barra I	MW	Mvar	MVA	∠I	Barra J	MW	Mvar	MVA	∠J	Pérd	Estado
					kA	°				kA	°	MW	
2)	LT: 4/5		-64.54	14.20	66.09	0.11		65.11	-13.74	66.54	0.11	0.57	ENERGIZADO
5)	LT: 7/8		0.00	-13.60	13.60	0.02		76.11	-0.00	13.88	0.02	-103.89	ENERGIZADO
7)	LT: 13/14		4.11	2.03	4.58	0.01		-41.56	-4.07	-1.96	4.52	0.03	ENERGIZADO
8)	LT: 10/11		-1.38	-2.00	2.42	0.00		109.76	1.38	2.01	2.43	0.00	ENERGIZADO
9)	LT: 6/12		7.48	2.59	7.91	0.01		-33.57	-7.41	-2.45	7.80	0.01	ENERGIZADO
12)	LT: 2/3		73.44	3.54	73.52	0.12		-7.75	-71.10	1.68	71.12	0.12	ENERGIZADO
13)	LT: 3/4		-23.10	3.31	23.33	0.04		175.41	23.46	-5.93	24.20	0.04	ENERGIZADO
14)	LT: 2/4		56.54	-1.81	56.57	0.09		-3.16	-54.84	2.99	54.92	0.09	ENERGIZADO
15)	LT: 1/2		157.11	-20.46	158.43	0.25		7.42	-152.80	27.77	155.30	0.25	ENERGIZADO
16)	LT: 2/5		41.12	0.81	41.12	0.07		-6.12	-40.23	-1.74	40.27	0.07	ENERGIZADO
17)	LT: 1/5		75.30	3.48	75.38	0.12		-2.65	-72.56	2.53	72.60	0.12	ENERGIZADO
19)	LT: 12/13		1.31	0.85	1.56	0.00		-48.30	-1.30	-0.85	1.55	0.00	ENERGIZADO
20)	LT: 6/13		16.49	7.35	18.05	0.03		-38.47	-16.30	-6.98	17.73	0.03	ENERGIZADO
21)	LT: 6/11		4.91	3.87	6.26	0.01		-52.71	-4.88	-3.81	6.19	0.01	ENERGIZADO
22)	LT: 9/7		-11.74	-8.07	14.25	0.02		130.95	11.74	8.27	14.36	0.02	ENERGIZADO
23)	LT: 9/10		7.65	3.86	8.56	0.01		-41.33	-7.62	-3.80	8.52	0.01	ENERGIZADO
24)	LT: 9/14		10.98	3.36	11.48	0.02		-31.55	-10.83	-3.04	11.25	0.02	ENERGIZADO

### TRANSFORMADORES BIDEVANADOS (Potencia Saliendo de la Barra)

No)	Nombre	Barra I	MW	Mvar	MVA	∠I	Barra J	MW	Mvar	MVA	∠J	Pérd	Estado	
					kA	°				kA	°	MW	%%	
3)	TRF: 4/9		36.38	-2.88	36.50	0.06		-5.84	-36.38	5.57	36.81	0.06	2.69	ENERGIZADO
4)	TRF: 4/7		11.74	-4.48	12.56	0.02		10.52	-11.74	5.33	12.89	0.02	-169.48	ENERGIZADO
6)	TRF: 5/6		40.08	11.35	41.65	0.07		-24.57	-40.08	-7.15	40.71	0.06	4.20	ENERGIZADO



## ANEXO E: ARCHIVO IEEE 162 BARRAS

BUS DATA FOLLOWS				162 ITEMS												
1 bus-1	100	1	1	1.032	-25.32	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-1.	0
2 bus-2	100	1	1	1.022	-29.99	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
3 bus-3	100	1	1	0.999	-32.48	2370.	96.9	2000.	0.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
4 bus-4	100	1	1	1.019	-33.74	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
5 bus-5	100	1	1	1.033	-24.5	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.5	0
6 bus-6	100	1	1	2	1.	-19.15	0.	0.	794.	180.8709	100.	1.	400.	-200.	0.	0.
7 bus-7	100	1	1	1.018	-30.38	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
8 bus-8	100	1	1	1.034	-33.81	0.	0.	-398.	-19.2	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
9 bus-9	100	1	1	1.026	-27.75	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
10 bus-10	100	1	1	0.992	-35.68	0.	0.	-226.	11.5	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
11 bus-11	100	1	1	0.999	-31.83	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
12 bus-12	100	1	1	1.037	-33.65	0.	0.	-193.	5.9	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
13 bus-13	100	1	1	1.014	-30.66	0.	0.	-204.	-37.3	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
14 bus-14	100	1	1	1.028	-31.03	0.	0.	-381.	-56.3	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
15 bus-15	100	1	1	1.018	-24.51	1420.	0.	1500.	5.9	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
16 bus-16	100	1	1	1.014	-29.57	0.	0.	54.2	-26.7	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
17 bus-17	100	1	1	1.005	-28.8	0.	0.	116.5	-44.7	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
18 bus-18	100	1	1	1.035	-33.75	34.4	11.67	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
19 bus-19	100	1	1	0.999	-38.05	0.	0.	-64.4	-3.78	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
20 bus-20	100	1	1	0.979	-32.68	37.9	12.5	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
21 bus-21	100	1	1	1.008	-30.42	0.	0.	69.8	-23.2	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
22 bus-22	100	1	1	1.033	-37.63	17.39	5.27	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
23 bus-23	100	1	1	0.988	-34.85	0.	0.	-63.5	-21.4	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
24 bus-24	100	1	1	1.009	-33.32	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
25 bus-25	100	1	1	1.001	-29.37	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.5	0
26 bus-26	100	1	1	1.032	-21.48	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.5	0
27 bus-27	100	1	1	0.997	-30.39	1824.	57.9	1500.	0.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
28 bus-28	100	1	1	0.988	-36.13	38.47	13.17	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
29 bus-29	100	1	1	0.987	-37.93	28.31	9.03	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
30 bus-30	100	1	1	0.997	-39.8	101.2	32.52	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.15	0
31 bus-31	100	1	1	0.99	-37.07	0.	0.	-72.5	3.1	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
32 bus-32	100	1	1	1.004	-41.08	52.7	15.06	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.2	0
33 bus-33	100	1	1	0.998	-43.01	45.17	15.06	0.	-0.1	100.	1.	999900	-99990	0.	0.2	0
34 bus-34	100	1	1	0.998	-42.99	14.18	5.25	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.0304	0
35 bus-35	100	1	1	0.989	-44.44	54.48	14.63	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.05	0
36 bus-36	100	1	1	0.995	-43.16	31.96	8.68	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.03	0
37 bus-37	100	1	1	0.986	-30.57	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
38 bus-38	100	1	1	1.018	-38.14	14.76	4.08	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.015	0
39 bus-39	100	1	1	0.987	-33.21	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
40 bus-40	100	1	1	0.999	-42.06	52.88	17.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
41 bus-41	100	1	1	1.007	-40.21	39.2	12.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
42 bus-42	100	1	1	1.003	-33.02	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
43 bus-43	100	1	1	1.011	-35.64	0.	0.	-41.5	17.2	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
44 bus-44	100	1	1	1.007	-36.16	16.32	3.71	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.0013	0
45 bus-45	100	1	1	0.995	-36.21	20.02	5.41	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.019	0
46 bus-46	100	1	1	0.998	-38.96	65.31	22.3	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.262	0
47 bus-47	100	1	1	0.99	-41.68	4.82	1.56	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
48 bus-48	100	1	1	0.999	-40.59	93.76	22.86	60.	29.97	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
49 bus-49	100	1	1	0.988	-41.99	6.82	1.78	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
50 bus-50	100	1	1	0.996	-39.5	0.	0.	-99.7	23.4	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
51 bus-51	100	1	1	0.991	-38.23	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
52 bus-52	100	1	1	1.014	-39.33	218.2	42.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
53 bus-53	100	1	1	0.995	-30.68	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
54 bus-54	100	1	1	0.988	-37.87	94.04	29.57	23.7	9.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
55 bus-55	100	1	1	0.996	-30.38	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
56 bus-56	100	1	1	0.991	-40.5	25.29	7.26	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.032	0
57 bus-57	100	1	1	0.997	-37.54	48.48	15.61	0.	20.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
58 bus-58	100	1	1	1.008	-28.68	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
59 bus-59	100	1	1	0.984	-33.03	84.43	27.05	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
60 bus-60	100	1	1	0.992	-34.01	0.	0.	-244.	-26.	100.	1.	999900	-99990	0.	-0.0011	0
61 bus-61	100	1	1	0.983	-31.43	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.0011	0
62 bus-62	100	1	1	1.023	-18.47	0.	0.	865.6	70.8	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
63 bus-63	100	1	1	0.988	-29.76	0.	0.	-59.1	2.9	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
64 bus-64	100	1	1	1.015	-28.89	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
65 bus-65	100	1	1	0.996	-25.32	0.	0.	26.3	-116.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
66 bus-66	100	1	1	1.	-31.11	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.5	0
67 bus-67	100	1	1	0.999	-41.74	22.54	7.03	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.06	0
68 bus-68	100	1	1	1.013	-40.23	40.42	12.68	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.12	0
69 bus-69	100	1	1	1.02	-38.92	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
70 bus-70	100	1	1	1.026	-23.58	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
71 bus-71	100	1	1	0.992	-31.77	29.87	11.93	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.12	0
72 bus-72	100	1	1	1.016	-30.78	0.	0.	-427.	-110.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0
73 bus-73	100	1	1	2	1.	-18.46	0.	447.	85.9411	100.	1.	267.	-72.	0.	0.	0
74 bus-74	100	1	1	1.011	-33.56	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0
75 bus-75	100	1	1	1.03	-25.43	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.5	0
76 bus-76	100	1	1	2	1.	-16.48	0.	1055.	136.183	100.	1.	605.	-170.	0.	0.	0
77 bus-77	100	1	1	1.011	-40.49	26.41	8.78	0.	-0.1	100.	1.	999900	-99990	0.	0.047	0
78 bus-78	100	1	1	1.022	-38.24	79.12	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0

79 bus-79	100	1	1	1.031	-36.19	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	
80 bus-80	100	1	1	1.009	-38.36	15.76	5.25	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0.028	
81 bus-81	100	1	1	1.	-46.42	50.88	16.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.221	0	
82 bus-82	100	1	1	0.998	-42.03	62.28	20.26	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.104	0	
83 bus-83	100	1	1	1.003	-41.13	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
84 bus-84	100	1	1	1.009	-37.77	37.9	9.49	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.026	0	
85 bus-85	100	1	1	0.97	-41.07	40.52	11.26	0.	-0.1	100.	1.	999900	-99990	0.	0.12	0	
86 bus-86	100	1	1	0.969	-44.99	50.73	13.35	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.12	0	
87 bus-87	100	1	1	0.979	-43.54	16.91	4.23	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
88 bus-88	100	1	1	0.988	-44.76	60.6	4.44	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
89 bus-89	100	1	1	0.991	-46.17	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
90 bus-90	100	1	1	0.961	-48.65	50.21	16.76	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.1	0	
91 bus-91	100	1	1	1.012	-36.54	51.24	12.83	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.0018	0	
92 bus-92	100	1	1	1.002	-37.51	36.12	9.05	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
93 bus-93	100	1	1	1.029	-32.65	103.8	34.56	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.017	0	
94 bus-94	100	1	1	1.026	-36.93	164.	6.49	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
95 bus-95	100	1	1	1.029	-36.55	117.2	39.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.0018	0	
96 bus-96	100	1	1	1.001	-45.07	119.2	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
97 bus-97	100	1	1	1.026	-37.22	22.84	5.71	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.0013	0	
98 bus-98	100	1	1	1.044	-35.31	151.1	50.35	0.	30.	100.	1.	999900	-99990	0.	-0.017	0	
99 bus-99	100	1	2	1.	-31.41	0.	0.	130.9	5.473584	100.	1.	75.6	-60.6	0.	0.	0	
100 bus-100	100	1	1	0.987	-45.83	23.21	6.9	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.03	0	
101 bus-101	100	1	1	2	1.	-40.09	0.	82.	30.40282	100.	1.	38.6	-24.4	0.	0.	0	
102 bus-102	100	1	1	1.003	-37.02	16.54	4.08	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
103 bus-103	100	1	1	1.015	-34.67	0.	0.	-322.	45.8	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
104 bus-104	100	1	1	0.992	-44.63	31.52	10.46	0.	-0.1	100.	1.	999900	-99990	0.	0.0544	0	
105 bus-105	100	1	1	1.033	-38.59	24.84	6.23	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.017	0	
106 bus-106	100	1	1	0.994	-43.01	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
107 bus-107	100	1	1	0.99	-43.89	35.41	5.41	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
108 bus-108	100	1	1	3	1.	-27.68	0.	551.1201155	6204	100.	1.	9999.	-9999.	0.	0.	0	
109 bus-109	100	1	1	1.013	-33.05	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
110 bus-110	100	1	1	1.027	-29.52	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
111 bus-111	100	1	1	1.005	-33.93	65.41	16.72	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
112 bus-112	100	1	1	1.027	-27.01	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	-0.5	0	
113 bus-113	100	1	1	1.025	-30.95	0.	0.	-32.7	95.2	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
114 bus-114	100	1	1	2	1.	-23.67	0.	131.	22.32868	100.	1.	33.	-25.	0.	0.	0	
115 bus-115	100	1	1	1.017	-36.04	17.32	3.34	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
116 bus-116	100	1	1	1.024	-37.29	56.08	11.2	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
117 bus-117	100	1	1	1.014	-37.95	101.9	20.06	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
118 bus-118	100	1	1	2	1.	-34.02	0.	173.	59.80875	100.	1.	100.	-44.	0.	0.	0	
119 bus-119	100	1	1	1.009	-35.25	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
120 bus-120	100	1	1	1.023	-27.36	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
121 bus-121	100	1	1	2	1.	-20.09	0.	620.	151.026	100.	1.	250.	-120.	0.	0.	0	
122 bus-122	100	1	1	0.988	-45.83	47.28	9.36	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
123 bus-123	100	1	1	0.999	-46.19	0.	0.	-165.	54.67	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
124 bus-124	100	1	1	1.008	-31.02	2000.	90.9	2571.	0.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
125 bus-125	100	1	1	2	1.02	-29.34	2000.	0.	2388.	-23.0042	100.	1.02	9900.	-1099.	0.	0.	0
126 bus-126	100	1	1	1.01	-26.59	2000.	0.	2467.	63.8	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
127 bus-127	100	1	1	0.984	-29.54	0.	0.	52.6	-65.	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
128 bus-128	100	1	1	1.023	-27.26	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
129 bus-129	100	1	1	1.024	-27.48	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
130 bus-130	100	1	1	2	1.03	-19.35	0.	455.	123.2414	100.	1.03	288.	-144.	0.	0.	0	
131 bus-131	100	1	1	2	1.018	-20.42	0.	575.	94.31067	100.	1.018	320.	-265.	0.	0.	0	
132 bus-132	100	1	1	1.019	-30.35	0.	0.	-159.	-36.1	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
133 bus-133	100	1	1	1.035	-32.18	30.1	6.02	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
134 bus-134	100	1	1	1.023	-30.85	17.46	3.34	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
135 bus-135	100	1	1	1.032	-32.23	20.06	4.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
136 bus-136	100	1	1	1.025	-32.5	20.06	4.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
137 bus-137	100	1	1	1.029	-32.46	20.06	4.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
138 bus-138	100	1	1	1.031	-31.27	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
139 bus-139	100	1	1	1.026	-32.05	10.1	2.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
140 bus-140	100	1	1	1.028	-32.38	13.58	2.68	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
141 bus-141	100	1	1	1.002	-33.91	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
142 bus-142	100	1	1	1.027	-40.63	27.09	5.35	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
143 bus-143	100	1	1	1.005	-39.42	21.07	4.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
144 bus-144	100	1	1	1.022	-36.16	12.37	2.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
145 bus-145	100	1	1	1.018	-34.4	10.83	2.21	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
146 bus-146	100	1	1	1.009	-39.89	21.33	4.01	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
147 bus-147	100	1	1	1.01	-38.97	216.4	42.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
148 bus-148	100	1	1	1.013	-40.	120.	24.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
149 bus-149	100	1	1	1.025	-23.75	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
150 bus-150	100	1	1	1.023	-24.4	4.8	1.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
151 bus-151	100	1	1	1.009	-26.69	24.	8.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
152 bus-152	100	1	1	1.023	-26.78	0.	0.	-6.	2.8	100.	1.	999900	-99990	0.	0.	0	
153 bus-153	100	1	1	1.017	-25.8	4.	1.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
154 bus-154	100	1	1	0.974	-32.1	28.	9.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.06	0	
155 bus-155	100	1	1	0.985	-30.27	12.	4.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
156 bus-156	100	1	1	0.978	-31.78	8.	2.4	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
157 bus-157	100	1	1	0.98	-32.54	32.	10.4	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
158 bus-158	100	1	1	0.968	-33.49	16.	5.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.03	0	
159 bus-159	100	1	1	0.968	-33.32	8.	2.4	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
160 bus-160	100	1	1	0.971	-32.76	14.4	4.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.03	0	
161 bus-161	100	1	1	1.003	-28.09	32.	10.4	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	
162 bus-162	100	1	1	1.	-28.97	20.	6.4	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.	0	

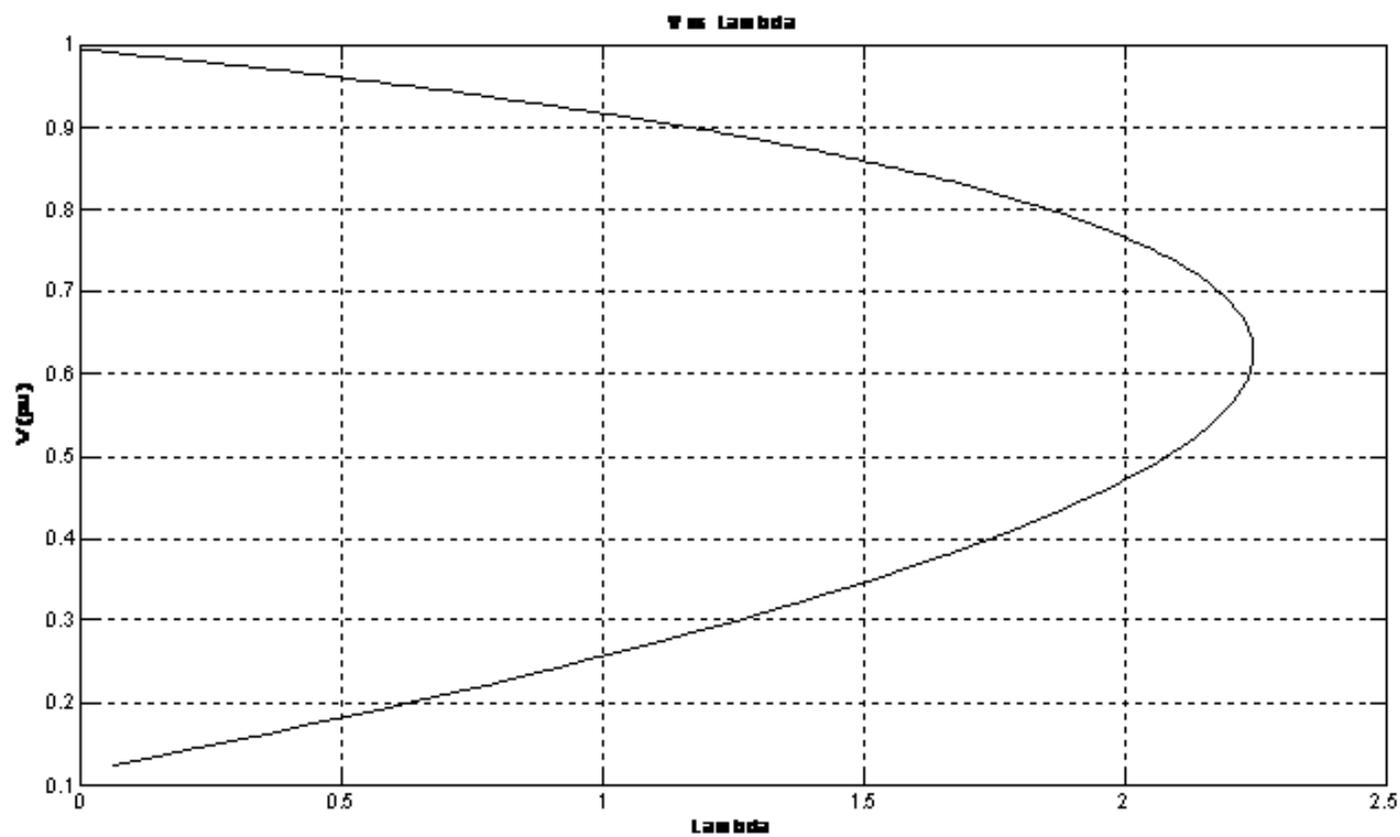
**ANEXO F: FLUJO CONTINUADO DEL SISTEMA IEEE 9 BARRAS CON ASPUPB**Figura 33. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB

Figura 34. Curva de V-P de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB

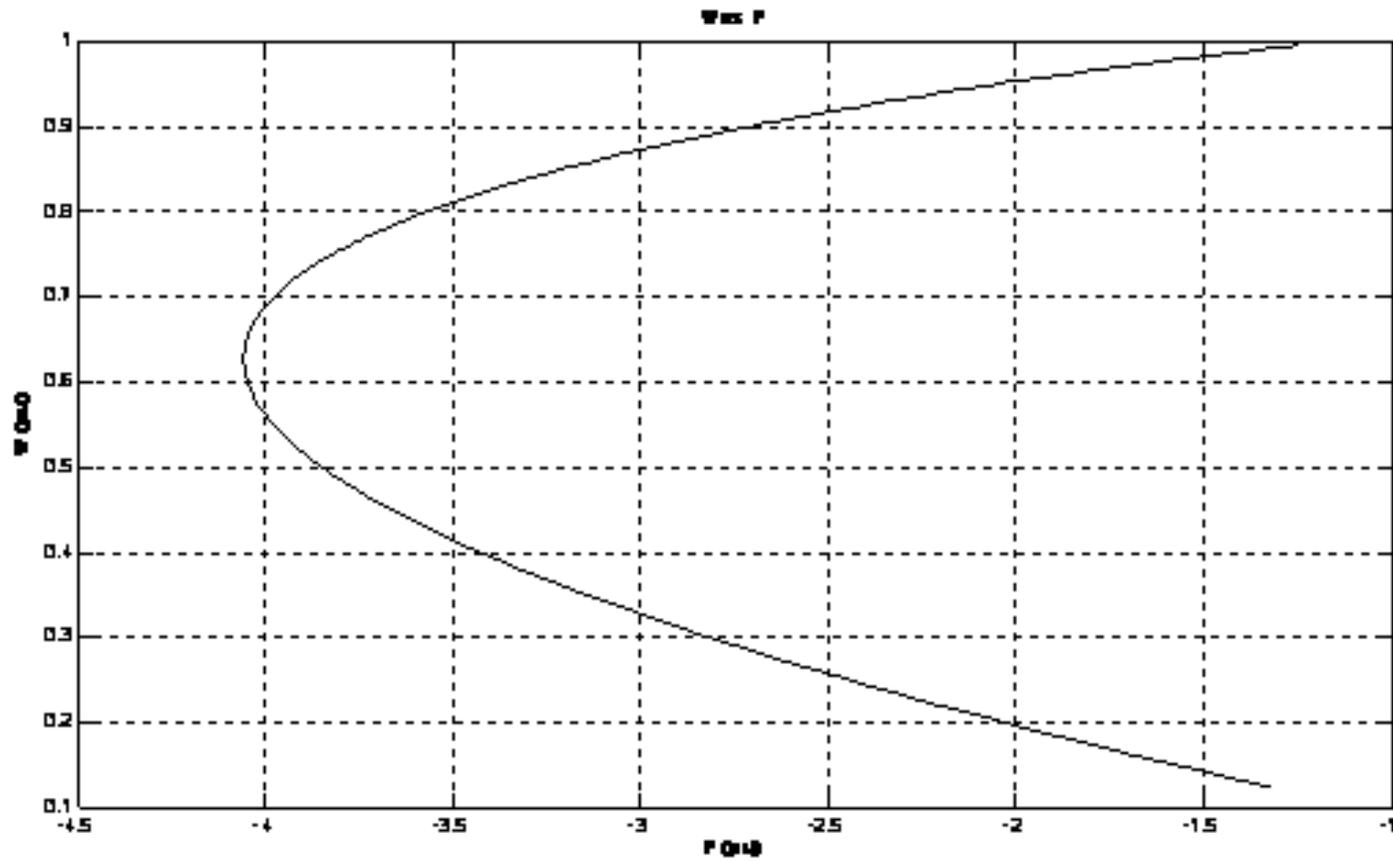
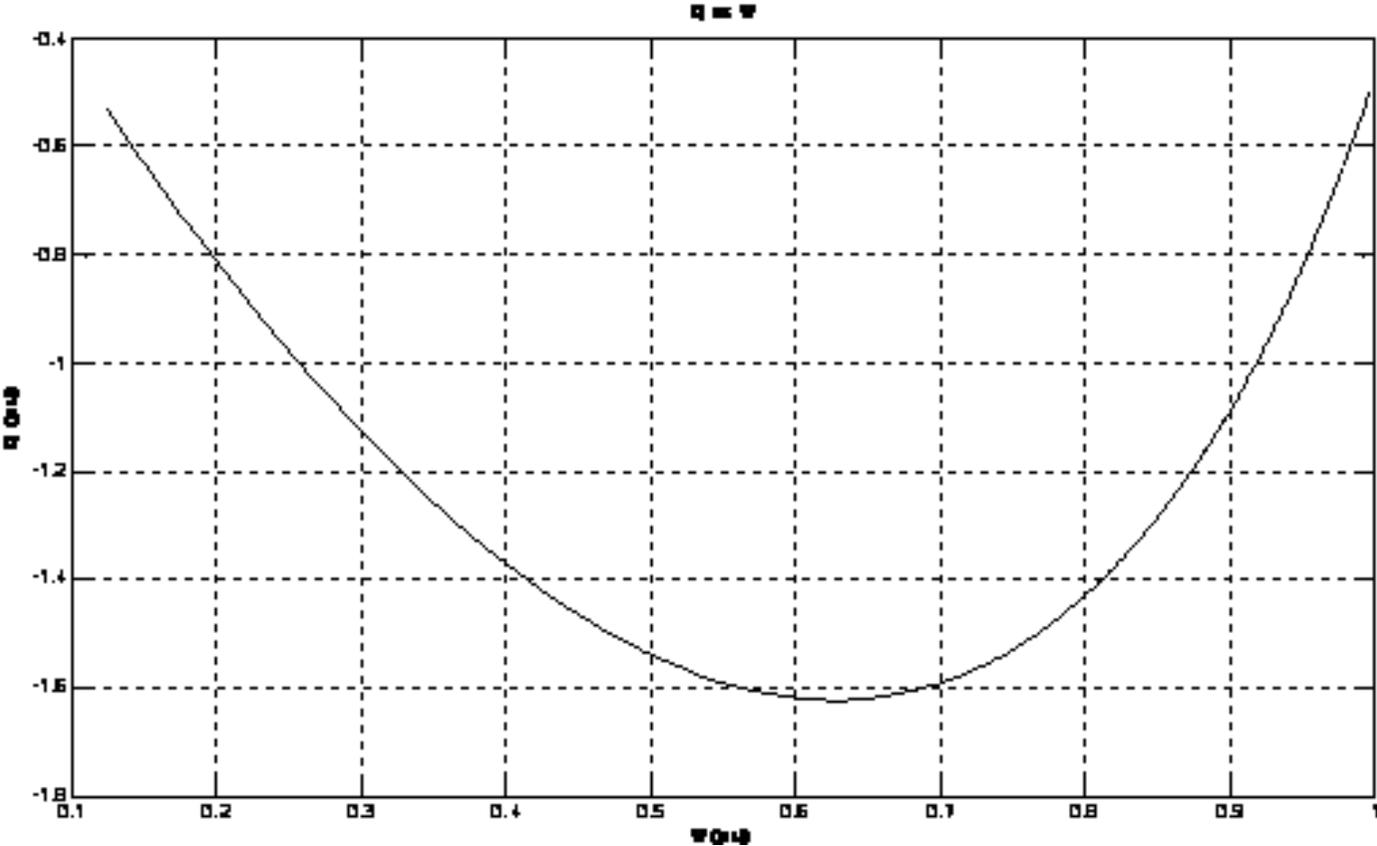


Figura 35. Curva de Q-V de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB



**ANEXO G: FLUJO CONTINUADO DEL SISTEMA IEEE 14 BARRAS CON ASPUPB**

Figura 36. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB

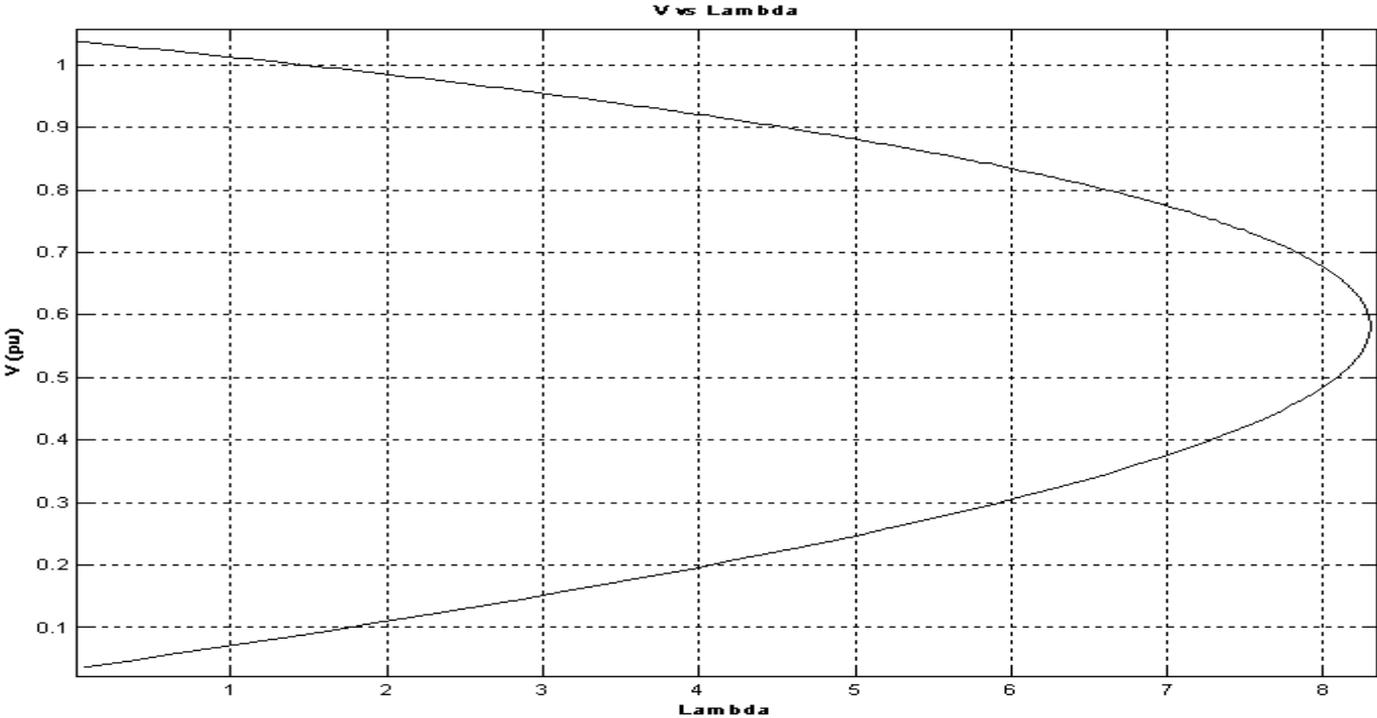


Figura 37. Curva de V-P de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB

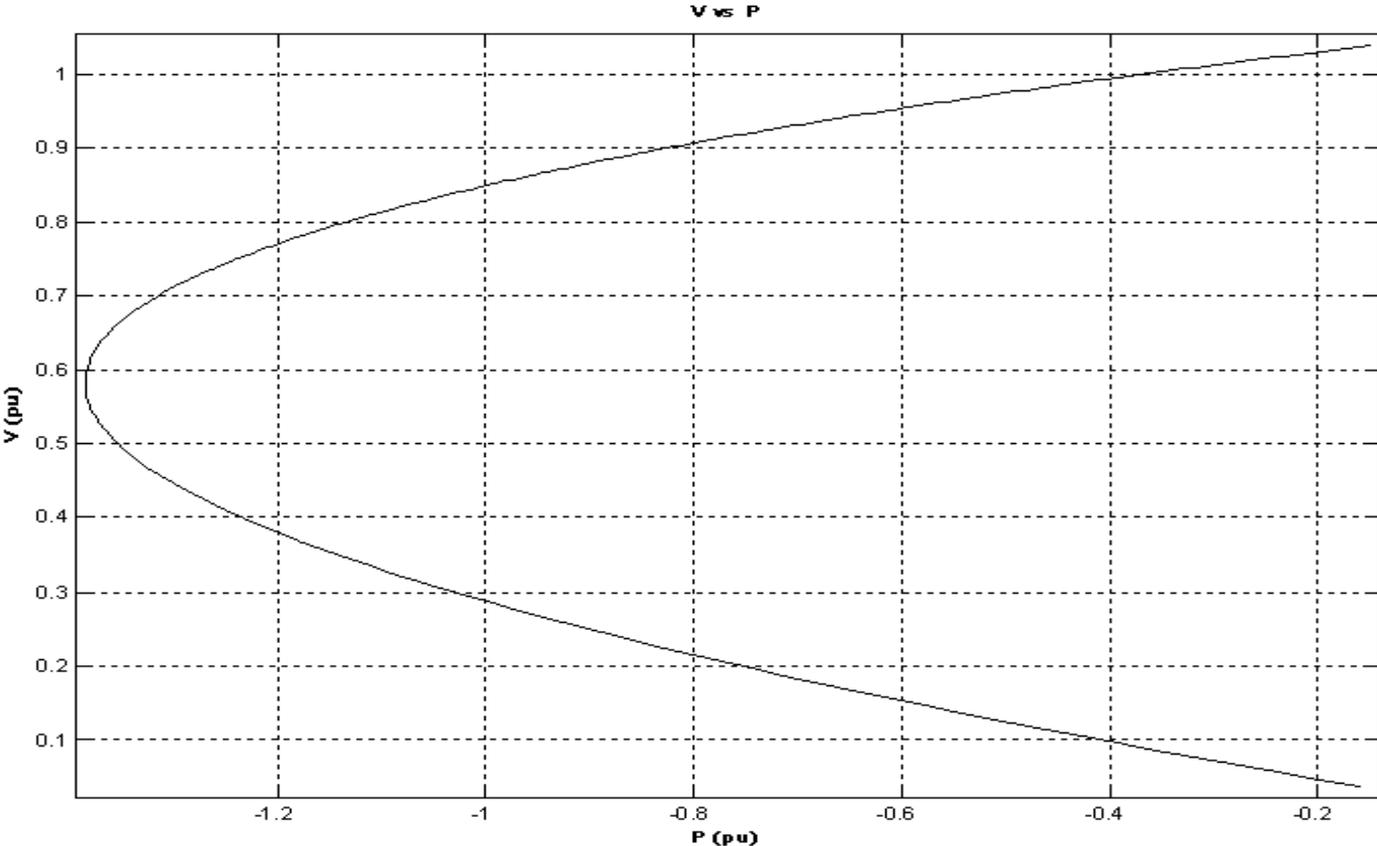
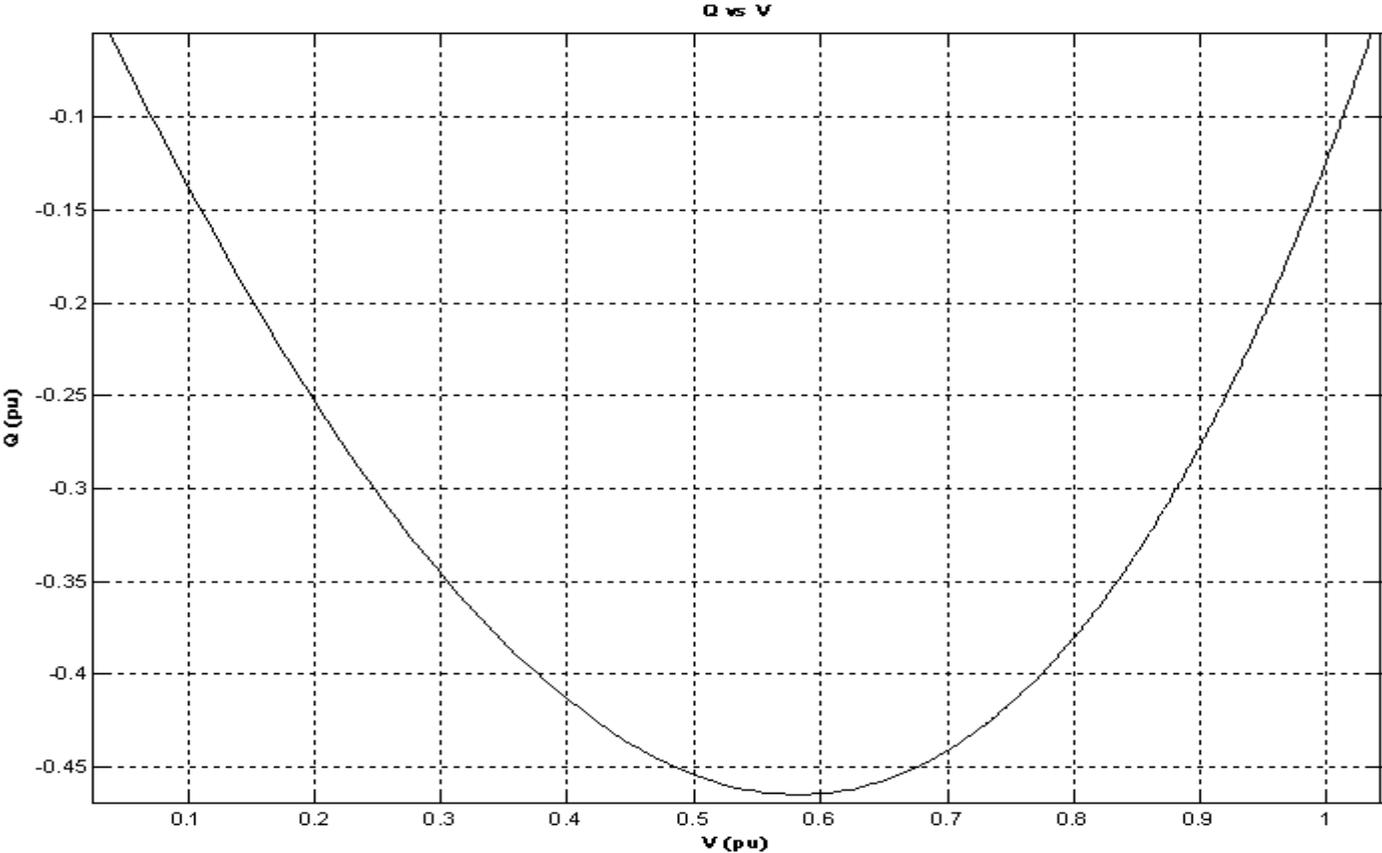


Figura 38. Curva de Q-V de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB



**ANEXO H: DATOS DEL TRABAJO DE GRADO (ANTEPROYECTO)****1. INVOLUCRADOS****ESTUDIANTE:**

Nombre y Apellidos: Juan Gonzalo Ortega Pulgarín  
C.C.: 1.128.266.649  
Programa: Ingeniería Eléctrica  
ID: 000020501  
Grado: Estudiante de décimo semestre de la facultad de Ingeniería eléctrica de la U.P.B.

**ESTUDIANTE:**

Nombre y Apellidos: Santiago Cadavid Carvajal  
C.C.: 1.128.264.488  
Programa: Ingeniería Eléctrica  
ID: 000020155  
Grado: Estudiante de décimo semestre de la facultad de Ingeniería eléctrica de la U.P.B.

**DIRECTOR:**

Nombre y Apellidos: Jorge Wilson González Sánchez  
C.C.: 98'542.056  
Título: Ingeniero Electricista  
Cargo: Docente y Coordinador Grupo Investigación TyD de la Escuela de Ingenierías de la UPB.

**ASESOR:**

Nombre y Apellidos: Juan Carlos Vélez  
C.C.: 98'670.513  
Título: Ingeniero Electrónico  
Cargo: Docente de la Escuela de Ingenierías de la UPB

**2. MODALIDAD**

El trabajo de grado se realizará bajo la modalidad de Investigación, con el grupo de investigación de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica con el fin de contribuir mediante una herramienta computacional en un macro proyecto del Grupo TyD sobre la prevención de apagones.

**3. TEMA DEL PROYECTO**

Este proyecto consiste en aportar mediante una herramienta computacional en la investigación sobre un tema de alta preocupación en el ámbito eléctrico nacional y mundial: las fallas totales o escalonadas de los sistemas eléctricos de potencia, conocidas técnicamente como "Apagones".

Debido a que el problema de los apagones está siendo y ha sido en los últimos años responsable de importantes pérdidas de dinero y lesiones a los sectores productivos y sociales, empeorado por la evidente falta de conocimiento sobre el tema y complicado con una red moderna de transmisión, el grupo de transmisión y distribución de la Universidad está trabajando en un proyecto que permita desarrollar una metodología de selección de soluciones para prevenir los apagones. Por esta razón, con este proyecto se pretende desarrollar una herramienta mediante el lenguaje de programación C++ con la cual se puedan analizar los fenómenos de los apagones desde el punto de la estabilidad de tensión y

hasta se puedan prevenir para obtener una operación más óptima y segura tanto en estado estable como durante contingencias.

Finalmente, las investigaciones y aplicativos desarrollados se pondrán al servicio de la comunidad científica y tecnológica para su futura integración en la planeación y operación de las redes eléctricas que aporten al propósito nacional y mundial de evitar y controlar los nefastos efectos de los apagones e inestabilidades de los sistemas eléctricos de potencia.

Distribución porcentual según el tipo de trabajo:

Tipo de Trabajo	Teórico		Experimental (Laboratorio)	Aplicado		Gestión
	Busc./Estudio	Desarrollo		Prototipo	De Campo	
%	40%	60%	0	0	0	0

Distribución porcentual por áreas a las que pertenece el proyecto:

Áreas	Transmisión de Energía Eléctrica	Informática	Ciencia Básica
%	50	40	10

#### 4. ANTECEDENTES

En la UPB, el Grupo de investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, ha estudiado los apagones desde los problemas de estabilidad de tensión. Es así como fue desarrollado el proyecto CIDI: "Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia con sistemas modernos de transmisión" código 038A-05/07-26 en el que se obtuvo teoría y herramientas computacionales e indicadores de utilidad para el análisis de posibles apagones por inestabilidad de tensión.

Se cuenta entonces con programas para el análisis de la estabilidad de tensión en Matlab los cuales cuentan con un entorno gráfico que facilitan la interacción del usuario con el programa pero al hacer análisis de

grandes sistemas el tiempo de ejecución no es el más deseado pensando en su aplicabilidad en centros de control, en donde deben tomarse decisiones rápidas con el fin de evitar apagones y otros tipos de problemas derivados del estudio de la estabilidad del tensión de un sistema de interconexión. Tampoco es posible, con este programa, especificar los límites de potencia reactiva (Q), en los que se deben mantener los nodos del sistema de potencia.

En el mundo se tienen herramientas que permiten predecir el impacto de las contingencias, algunas de éstas son:

QuickStab<sup>®</sup>: desarrollado por la empresa Energy Consulting International, Inc. de Estados Unidos, es una herramienta que dado un flujo de potencia o estimación de estado, utiliza un método de estabilidad de voltaje para calcular, tanto la cargabilidad máxima como la potencia que puede ser transferida dentro de un margen de seguridad predefinido en un área determinada, también, identifica máquinas que pueden causar inestabilidad, identifica los nodos críticos en la red y ordena los generadores y las interconexiones en función de su impacto sobre la estabilidad.

QuickStab<sup>®</sup> ha sido implementado en programación de operaciones, despacho de tiempo real, operación de mercados eléctricos, y planeamiento de transmisión en los Estados Unidos, Latinoamérica, Europa y Asia.

DSATools<sup>™</sup>: Dynamic Security Assessment Software desarrollados por Powertech de Canadá, son herramientas computacionales que permiten hacer análisis de planeamiento y en tiempo real de la seguridad de sistemas de energía, estudiando todas las formas de estabilidad. Incluye herramientas como:

PSAT: Powerflow & Short circuit Analysis Tool

VSAT: Voltage Security Assessment Tool

TSAT: Transient Security Assessment Tool

SSAT: Small Signal Analysis Tool

El software proporciona a los operadores de red información importante acerca de los límites de seguridad del sistema, contingencias críticas y las medidas correctoras necesarias para evitar los fallos del sistema.

UWPFLOW: es un programa de flujo 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. El programa está escrito en C y C++, y tiene disponibles dos versiones para Windows 95/98/XP/Vista y UNIX que incluyen ejemplos y un breve tutorial. Este programa es proporcionado sin costo alguno para propósitos de prueba y no puede ser utilizado para aplicaciones comerciales. El programa también genera una serie de archivos de salida que permiten hacer nuevos análisis. El programa es desarrollado por Claudio Cañizares perteneciente al Power & Energy Systems Group de la Universidad de Waterloo de Canadá que es uno de los mayores grupos de investigación en ingeniería eléctrica en América del Norte.

El problema más grande con estos software es no poder añadir funciones que se puedan necesitar en un futuro, mientras que con el proyecto la universidad junto con el grupo de investigación TyD tendrán un software propio, al cual se le pueden hacer modificaciones necesarias con proyectos futuros sin ningún problema. Por ejemplo, en algunos proyectos anteriores se han desarrollado indicadores novedosos para evaluar o juzgar la estabilidad de tensión de una red, por lo cual es una necesidad del grupo TyD disponer de herramientas para una rápida y eficiente evaluación.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. Objetivo General**

- Desarrollar una herramienta computacional en C++ que entregue el análisis de la estabilidad de tensión en un sistema ingresado por el usuario en un formato determinado, permitiendo una operación más óptima y segura tanto en estado estable como durante contingencias.

### **5.2. Objetivos Específicos**

- Estudio y análisis de la teoría sobre estudios eléctricos en torno al tema de los apagones, estableciendo bases conceptuales sólidas que permitan analizar el problema mediante los flujos de carga y la estabilidad de tensión.
- Revisar antecedentes mundiales y nacionales con sus reportes de apagones.
- Investigar y analizar las herramientas actuales empleadas para el estudio de apagones.
- Diseño de algoritmos y estudio de los programas existentes en la UPB con la ayuda de m-files.
- Analizar formatos de bases de datos en función de la tecnología actual, para luego definir los formatos de intercambio de datos que utilizaría el programa.
- Mediante una herramienta computacional, entregar un análisis detallado del sistema ingresado por el usuario, entregando gráficas que permitan al usuario volver a correr el programa mejorando la estabilidad de tensión en el sistema.
- Realizar un manual de usuario que contenga todas las instrucciones de manejo del programa, además de recomendaciones de uso.

## **6. JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS**

Mediante este material se busca aportar a la línea de investigación de transmisión de energía un software que permita el análisis básico de una red, dando como beneficios la ejecución rápida del programa y la prevención de un posible apagón.

Por medio de esta herramienta las personas o empresas interesadas tendrán la facilidad de conocer el estado de la red, y así poder obtener la máxima eficiencia sin riesgos de perder la estabilidad del sistema, además de recibir análisis y recomendaciones que puedan mejorar y prevenir posibles apagones.

## **7. ALCANCES**

- Se pretende entregar material completo con la recopilación de la fundamentación teórica necesaria, los diferentes algoritmos creados y el programa como tal funcionando cumpliendo con todos los objetivos planteados. La información se limitará a la obtenida en Internet y en las bibliotecas de la ciudad.
- La herramienta digital será provisional, puede ser modificada por proyectos futuros que permitan mejorarla.

## **8. TABLA DE CONTENIDO**

Capítulo 1. Introducción.

Se hará una introducción al tema, de manera teórica, en la cual se explique en qué consiste un apagón y las consecuencias que podría traer, además de revisar algunos antecedentes nacionales y mundiales con sus respectivos reportes de apagones. También se analizarán algunas herramientas actuales, incluyendo las desarrolladas en UPB, empleadas para

el estudio de apagones, mostrando su funcionamiento básico y sus debilidades.

#### Capítulo 2. Diseño del Software.

Se estudiarán los diferentes programas existentes en la UPB y con la ayuda de algunos m-files se diseñarán los diferentes algoritmos para el desarrollo del software. Se definirán los formatos de bases de datos que leerá el programa procediendo al desarrollo de la herramienta como tal en el lenguaje C++, para luego mostrar su funcionamiento mediante un modelo de aplicación.

#### Capítulo 3. Aplicaciones y validación del programa.

Se presentarán simulaciones con diferentes sistemas de potencia y a la vez se comparará el resultado obtenido con programas ya validados. UWPFLOW de Claudio Cañizares y el ASPUPB son opciones para una validación apropiada. Hay que tener en cuenta que la velocidad, los indicadores y la compatibilidad de interacción con otros sistemas informáticos marcan la diferencia con los programas utilizados para validar.

#### Capítulo 4. Manual de usuario del programa.

Se presentará un ilustrado manual que permita al usuario entender el funcionamiento del programa y poder ingresar fácilmente cualquier modelo de interés.

Conclusiones

Bibliografía

Anexos.

## 9. PRESUPUESTO Y RECURSOS NECESARIOS

RECURSO	Participación (miles de pesos)				Implica desembolso	
	Estudiante	UPB	Externo	Donación	Si (nuevo)	No (Existente)
Bibliografía		200				200
Papelería	100					100
Telecomunicaciones	100					100
Trabajo Estudiantes 500h @ \$10K/h	5000					5000
Trabajo Director 160h @ \$30K/h	4800					4800
Trabajo Asesor 60h @ \$30K/h	1800					1800
SUBTOTAL	11800	200				12000
Imprevistos (10%)	1180	20				1200
TOTAL	12980	220				13200

GRAN TOTAL	13200	13200
------------	-------	-------

## 10. FINANCIACIÓN

Los gastos requeridos por el proyecto serán asumidos por los estudiantes.

## 11. CRONOGRAMA Y OCUPACIÓN.

Actividades / Meses	Ene 2009	Feb 2009	Mar 2009	Abr 2009	May 2009	Jun 2009	Jul 2009	Ago 2009	Sept 2009	Ocupación (horas)
1. Formulación del proyecto	X	X								40
2. Documentación		X	X	X						100
3. Desarrollo marco teórico		X	X	X						60
4. Desarrollo Software				X	X	X	X	X		250
5. Simulaciones							X	X		40
6. Manual de usuario							X	X		30
7. Revisión Informe por parte de los Jurados									X	
<b>Número Graduandos:</b>	2		<b>Total de Horas por c/u:</b>						520	

## 12. PROPIEDAD INTELECTUAL Y DESTINACIÓN DEL PROYECTO

La autoría del proyecto pertenece a los estudiantes, con participación del director, donde éste proporciona ayuda y asesoría a los estudiantes que trabajan dentro de un objetivo total y definido por los alumnos, y obtienen en consecuencia un reconocimiento como desarrolladores del proyecto con reconocimiento para el director en la elaboración del proyecto.

A continuación se encuentran incluidas las cartas de intención y apoyo del presente proyecto, junto con el acta de propiedad intelectual:

**ACTA DE PROPIEDAD INTELECTUAL DEL PROYECTO:  
HERRAMIENTA COMPUTACIONAL BÁSICA PARA EL ANÁLISIS Y  
CONTRIBUCIÓN EN LA PREVENCIÓN DE APAGONES**

1. Los derechos morales corresponden a los graduandos **SANTIAGO CADAVID CARVAJAL** y **JUAN GONZALO ORTEGA PULGARÍN**, y a toda persona que a criterio de los graduandos, haga aportes originales intelectuales en los avances y en el resultado final del proyecto.
2. Los graduandos **SANTIAGO CADAVID CARVAJAL** y **JUAN GONZALO ORTEGA PULGARÍN** y el Ing. **JORGE WILSON GONZÁLEZ SÁNCHEZ** serán coautores de todas las publicaciones nacionales e internacionales que genere el proyecto. El asesor el Ing. **JUAN CARLOS VÉLEZ** será mencionado por sus aportes en el proyecto. Adicionalmente en la divulgación que se haga, se dará crédito a la Universidad Pontificia Bolivariana, Ingenierías Eléctrica y Electrónica y al Grupo de investigación de Transmisión y Distribución de Energía eléctrica.
3. Los derechos patrimoniales corresponden a los graduandos **SANTIAGO CADAVID CARVAJAL** y **JUAN GONZALO ORTEGA PULGARÍN**. Incluirá al director Ing. **JORGE WILSON GONZÁLEZ SÁNCHEZ** y a la **UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**, en partes iguales para cada uno de ellos.
4. Confidencialidad: Toda la información sobre el proyecto quedará protegida bajo las normas del secreto industrial, por lo tanto, la divulgación no consentida será causal de incumplimiento del presente acuerdo.
5. Causales de retiro. El retiro podrá ser voluntario o ser motivado por el incumplimiento de las obligaciones de una de las partes.

6. Constancias: Todos los participantes conocen y aceptan el “Estatuto de propiedad intelectual” de la Universidad Pontificia Bolivariana, el reglamento de elaboración de trabajos de grado de IE y se comprometen a cumplir los deberes que allí se estipulan, siempre y cuando respeten la Constitución y la Ley.

Juan Gonzalo Ortega Pulgarín  
CC. 1.128.266.649 Medellín  
(Graduando)

Santiago Cadavid Carvajal  
CC. 98'542.056 Envigado  
(Graduando)

Ing. Jorge Wilson González  
CC. 98.542.056 Medellín  
(Director)

Ing. Juan Carlos Vélez  
CC. 98.670.513  
(Asesor)



**ANEXO J: ARTÍCULO PUBLICABLE**

# HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN

IE Santiago Cadavid Carvajal, IE Juan Gonzalo Ortega Pulgarín, IE Ph.D Jorge W. González S. Grupo de investigación T&D, UPB

**Abstract**— This project develops physical and mathematical concepts for the creation of a program in the C++ language, used in the loads flow simulation 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, it is exposed some of the actual tools that allows 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; Tension instability; Steady state; Contingencies

## INTRODUCCIÓN

Los apagones han ocurrido en el mundo y en Colombia desde hacia 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 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 ésta 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 de que la cuantificación del riesgo se realice de manera rápida, en tiempo real y para múltiples simulaciones fuera de línea.

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

### *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.

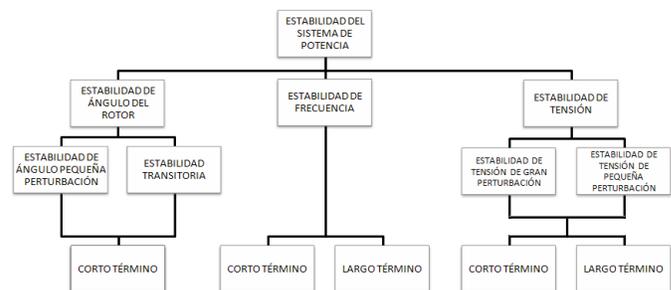


Fig. 1. Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia [8]

### *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.

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.

### Curvas P-V y V-Q

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. 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.

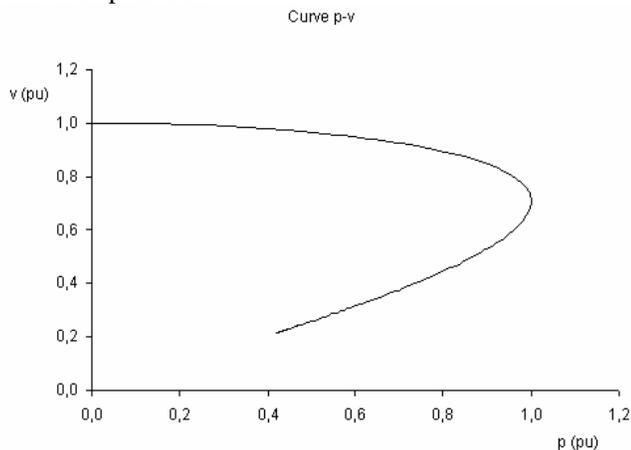


Fig 2. Curva P-V para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas

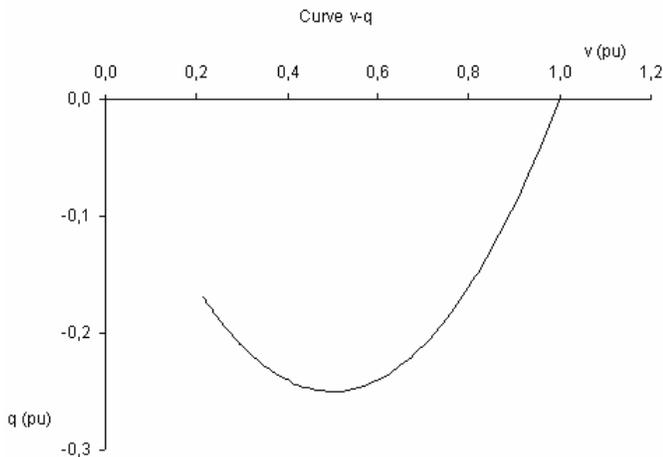


Fig 3. Curva V-Q para una carga resistiva alimentada por una línea sin pérdidas

### Antecedentes Nacionales y Mundiales

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

- Interconexión Colombia-Ecuador. 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 Zeballos a 69 kV (Ecuador), y luego se perdieron dos unidades de generación en la

subestación Gonzalo Zeballos 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.
- Atenas. Julio 12 de 2004.
- Italia. Septiembre 28 de 2003.
- 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.

### Herramientas Actuales

Existen diferentes herramientas computacionales que permiten predecir el impacto de las contingencias.

- 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.
- QuickStab. Desarrollado por la empresa Energy Consulting International, Inc. de Estados Unidos. Es una herramienta que permite recalculer 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.
- 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.

### GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DEL ALGORITMO

#### 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.

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 llamado 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.

#### 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 lo "pesado" computacionalmente 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.

#### Algoritmo para la solución del Flujo de Cargas Continuado

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 esto 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.

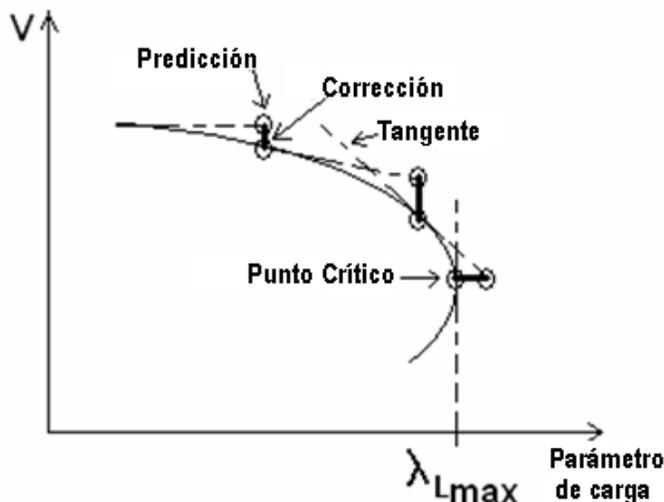


Fig 4. Método de predicción y corrección [7]

#### 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.

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

#### APLICACIONES DEL ALGORITMO

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

#### Flujo de Cargas

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

BARRAS Num.	Nombre	Tipo	V  kV	p.u	$I_{V_0}$	
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.

#### Flujo Continuado

- **Sistema IEEE 9 Barras.** Los resultados obtenidos del flujo continuado fueron:

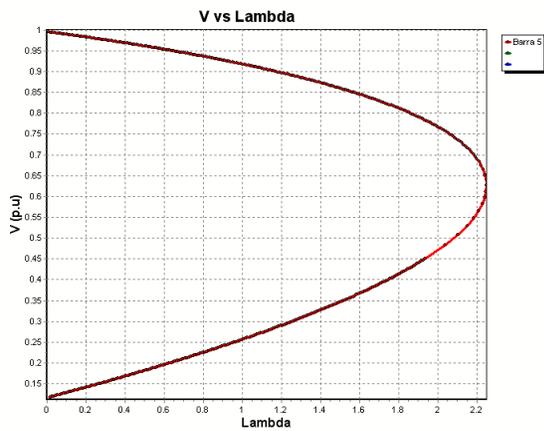


Fig 5. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

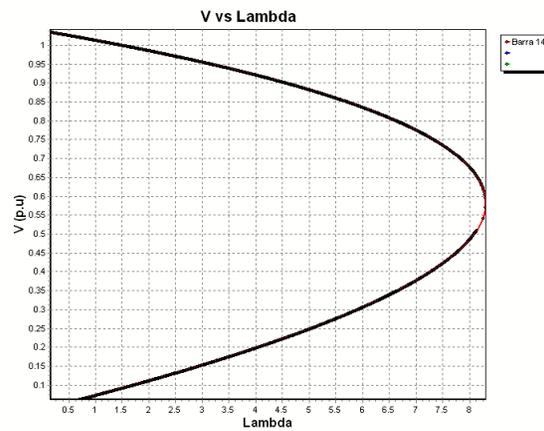


Fig 8. Curva de  $V-\lambda_L$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

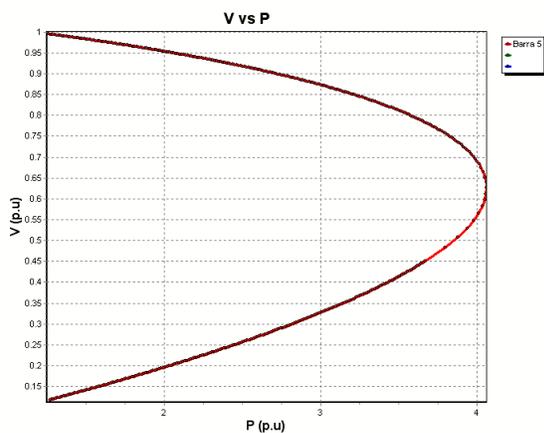


Fig 6. Curva de  $V-P$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

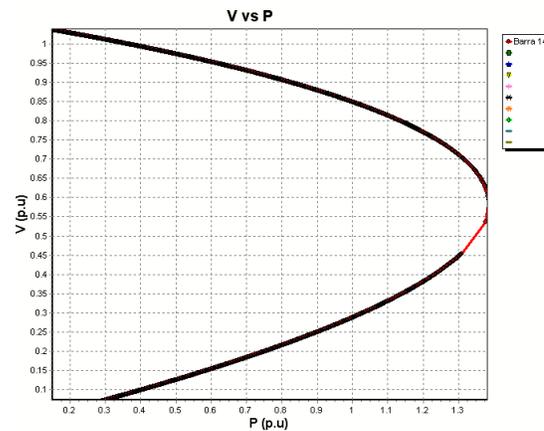


Fig 9. Curva de  $V-P$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

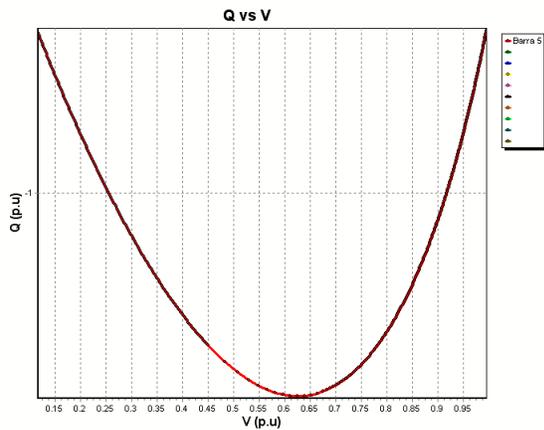


Fig 7. Curva de  $Q-V$  de la barra 5 para el sistema IEEE 9 barras arrojada por ASPUPB2

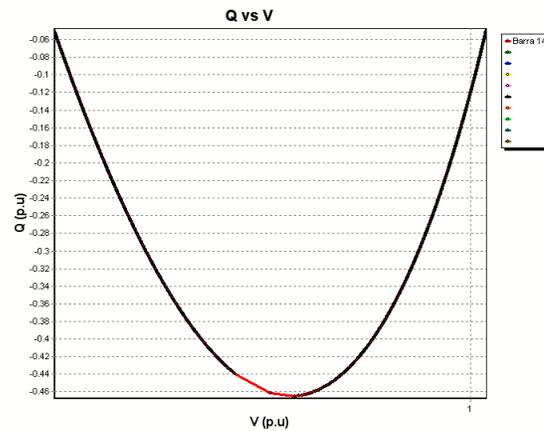


Fig 10. Curva de  $Q-V$  de la barra 14 para el sistema IEEE 14 barras arrojada por ASPUPB2

- Sistema IEEE 14 Barras. Este sistema fue ejecutado con el programa y los resultados fueron:

## CONCLUSIONES

Los apagones son fenómenos que han generado mucho 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 puede modificar mejorando su funcionamiento sin la necesidad de contar con permisos o licencias. Además, tener herramientas que realicen estudios de estabilidad de tensión, realza el nombre de la facultad de Ingeniería Eléctrica.

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 volviendo 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 T&D: 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, a diferencia del Matlab, que al ser su licencia tan costosa, dificulta la utilización del mismo. Además, Matlab es más utilizada para propósitos educativos, mientras que con C++ se puede llegar a investigaciones de grandes niveles.

## REFERENCIAS

- [1] BEDOYA CADENA, Andrés Fernando. Propuesta de un modelo estándar xml para intercambio de datos de análisis eléctrico. Medellín: XM S.A. ESP, 2009.
- [2] CORREDOR A., Pablo H. Sistemas de Potencia. Serie Nabla-Delta No 27 UPB. Colombia. 1992. Biblioteca UPB.
- [3] CORTIJO BON, Francisco José y BERZAL GALIA, Fernando. Curso de C++ Builder [en línea]. <Disponible en: <http://elvex.ugr.es/decsai/builder/>> [consulta: 7 Jul. 2009]
- [4] 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 Jun. 2009]
- [5] FERNÁNDEZ BREIS, Jesualdo Tomás. Desarrollo de aplicaciones interactivas [en línea]. <Disponible en: <http://dis.um.es/~jfernand/0506/dai/builder.pdf>> [consulta: 7 Jul. 2009]
- [6] GLOVER, J. Duncan. Power system analysis and design. Stamford: Cengage Learning, 2008.
- [7] GONZÁLEZ SÁNCHEZ, Jorge Wilson. VOLTAGE STABILITY MODEL FOR HVDC SYSTEMS CONNECTED TO VERY WEAK AC NETWORKS. 2006. Trabajo de grado (PhD).

- [8] KUNDUR, Prabha. Definition and Classification of Power System Stability. En: IEEE Transactions on Power Systems. New York. Vol.19 (May 2004); pp. 1387-1401.
  - [9] \_\_\_\_\_. Power System Stability and Control. Serie EPRI McGraw-Hill. USA: 1994. Biblioteca UPB.
  - [10] LEDESMA, Pablo. OpenCourseWare de la Universidad Carlos III de Madrid. [en línea] <Disponible en: [http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II\\_OCSE\\_RT/node19.html](http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RT/node19.html)> [consulta: 26 Feb. 2009]
  - [11] LEÓN, Ramón Alberto y KUMAR Y., Sree Rama. Voltage Collapse Events. Iowa State University of Science and Technology.
  - [12] MESA JARAMILLO, Santiago. SIMULACIÓN GRÁFICA DE SISTEMAS DE POTENCIA CON FACTS EN OPERACIÓN SIMÉTRICA USANDO MATLAB. Medellín, 2003. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
  - [13] Powertech Labs Inc. DSATools Dynamic Security Assessment Software Powertech [en línea]. <Disponible en: <http://www.dsatools.com/>> [consulta: 9 Jun. 2009]
  - [14] QUINTANA, Victor H.; MIRANDA D., Rodrigo y VARGAS D., Luis. Voltage collapse scenario in the chilean interconnected system. Chile: IEEE Transactions on Power Systems, 1999, Vol. 14.
  - [15] SAADAT, Hadi. Power system analysis. Singapore: McGraw-Hill, 1999.
  - [16] SABELLI, C. y CORSI, S. General Blackout in Italy, Sunday September 28, 2003, h. 03:28:00.
  - [17] STEVENSON, William D. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. México: McGraw - Hill , c 1996
  - [18] Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and. Noviembre/Diciembre 1973. Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data, Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data. Noviembre/Diciembre 1973.
  - [19] UNIVERSITY OF WATERLOO. Power and Energy Systems Group [en línea] <Disponible en: <http://www.power.uwaterloo.ca/~claudio/software/pflow.htm>>. [consulta: 9 Jun. 2009]
  - [20] VOURNAS, Costas. Technical Summary on the Athens and Southern Greece Blackout of July 12, 2004. Atenas: s.n., 2004.
  - [21] ZULUAGA LÓPEZ, Luis Julián y PRÉSIGA DUQUE, Ricaurte De J. Colapso de Voltaje. Una Experiencia en la Operación del Sistema Eléctrico Colombo-Ecuatoriano. Medellín: Interconexión Eléctrica S.A E.S.P.
- IE Santiago Cadavid C.** Nacido en Colombia. Graduado de la Universidad Pontificia Bolivariana en el año 2.009. Es miembro del grupo de investigación T&D en la UPB. santiagocc86@hotmail.com
- IE Juan G. Ortega P.** Nacido en Colombia. Graduado de la Universidad Pontificia Bolivariana en el año 2.009. Es miembro del grupo de investigación T&D en la UPB. juango25@gmail.com
- IE Ph.D Jorge W. González S.** Nacido en Colombia. Graduado de la Universidad Nacional de Colombia en el año 1.992. Recibió el Título de Doctorado en el año 2006. Trabajó como ingeniero consultor en Mejía y Villegas S.A. de 1.992 a 2.000. Ahora es profesor de tiempo completo de la Universidad Pontificia Bolivariana. Es el director del grupo de investigación T&D en la UPB. jorgew.gonzalez@upb.edu.co