



## TRABAJO TEORICOEXPERIMENTAL

### La estabilidad de la tensión de los sistemas eléctricos de potencia utilizando el programa "PSAF"

#### *Voltage stability of electric power system using the program "PSAF"*

Juan Gualberto - Boza Valerino  
Raúl - Estrada Núñez

Annavell - Herrera Díaz  
Moisés - Barreto Banderas

Recibido: Septiembre del 2011

Aprobado: Febrero del 2012

#### Resumen/ Abstract

En el trabajo se realiza una breve reseña histórica sobre los distintos programas utilizados en los estudios de los regímenes estacionarios y transitorios utilizados en la Unión Eléctrica (UNE). Se exponen los resultados obtenidos mediante el programa Análisis de los Sistemas de Potencia (PSAF, por sus siglas en inglés), adquirido recientemente por la Empresa de Proyectos (INEL). Se hace énfasis en los métodos estáticos empleados para el análisis de la estabilidad de la tensión: Curvas P-V, Curvas V-Q y el Análisis Modal. Se aplica un procedimiento establecido en el trabajo al caso de estudio, sistema de 14 barras de la IEEE. El procedimiento se ha desarrollado atendiendo a la información, los criterios de estabilidad de la tensión y los resultados que proporciona el programa PSAF. Los resultados obtenidos con el caso estudio utilizado se consideran adecuados al ser validado con la literatura revisada.

**Palabras clave:** análisis modal, curvas P-V y Curvas V-Q, estabilidad de la tensión.

*In the work is carried out a brief historical review on the different programs used in the studies of the steady state and transient operation in the Electric Union. The results exposed are obtained by means of the program Power Systems Analysis Framework (PSAF), acquired recently for the Electricity engineering and Project-making enterprise (INEL). Emphasis is made in the static methods employees for the voltage stability analysis: P-V curves, V-Q curves and the Modal Analysis. A procedure is applied in the work to the, system of 14 bus of the IEEE. The procedure has been developed assisting to the information, the approaches of voltage stability and the results that it provides the program PSAF. The results obtained with the case study used are considered appropriate when being validated with cases of the revised literature.*

**Key words:** modal analysis, P-V curves, V-Q curves, voltage stability.

#### INTRODUCCIÓN

Desde la segunda mitad de la década del 60 del siglo pasado el Departamento de Desarrollo de la entonces Empresa Consolidada de la Electricidad (ECE), hoy Unión Eléctrica (UNE); ha tenido un rol significativo en la aplicación de las tecnologías avanzadas de cálculo, aplicados al estudio de los regímenes del Sistema Eléctrico (SEN) para la planificación a corto, mediano y largo plazo.

Se puede decir con seguridad que en el Departamento de Desarrollo de la ECE comenzó por primera vez (1967) en el País la aplicación de las técnicas automatizadas para el estudio de los regímenes de operación del SEN. Los acontecimientos que promovieron en esa época la aplicación de las técnicas automatizadas de cálculo fueron.

- La instalación en el Departamento de Desarrollo de la ECE de un Analizador de Redes de corriente alterna (CA) con posibilidades limitadas por el número de generadores, barras, cargas y líneas a simular para realizar estudios de flujo de carga y estabilidad transitoria.
- La participación de especialistas de los departamentos de desarrollo y del despacho de cargas de la ECE en los cursos sobre computación brindados por el Departamento de Matemáticas de la Universidad de La Habana (UH) (1966) a partir de la instalación en dicho Centro de Estudios de la computadora digital Elliot 803-B, de fabricación inglesa con su lenguaje de programación AUTOCODE; primera en el país con un programa para el cálculo del flujo de carga utilizando el método de Gauss-Seidel.
- La participación de especialistas de la ECE en la ejecución del primer estudio de desarrollo del SEN realizado en el Instituto Energoproekt de Leningrado, antigua URSS realizado a fines de 1966; con la utilización del Ábaco, Regla de Cálculo, Analizadores de Redes y Computadoras Digitales de la primera generación [1].

Se debe destacar que la aplicación de los programas desarrollados en el país ha significado un ahorro de decenas de miles de dólares por concepto de haber podido realizar numerosos estudios a corto, mediano y largo plazo; así como por no haber tenido que adquirir en el extranjero la mayor parte de esos programas.

Además y tal vez lo más importante es que se ha contribuido al logro de la cultura que existe en las universidades y empresas de la UNE, sobre la aplicación de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones aplicadas a los estudios del SEN. Sobre el desarrollo y la utilización de programas adquiridos se han realizado numerosos trabajos de diplomas, tesis de maestrías y tesis doctorales en el país.

En Cuba se ha alcanzado una gran experiencia en el análisis de la estabilidad transitoria de los SEP, no así en el análisis de la estabilidad de la tensión por no haber existido hasta ahora la herramienta de cálculos necesaria.

El paquete de programas PSAF, es prácticamente el primero que se adquiere en Cuba para realizar los cálculos y el estudio sobre la estabilidad de la tensión de los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Este programa se utiliza en este trabajo para realizar los primeros ensayos, empleando el sistema típico de la IEEE de 14 nodos muy utilizado en la literatura especializada para validar algoritmos y probar el efecto de distintos elementos que se conectan a los SEP mediante los cálculos de flujo de carga, estabilidad transitoria y estabilidad de la tensión.

Por lo anterior el presente trabajo tiene como objetivo adquirir la experiencia necesaria para realizar los estudios de la estabilidad de la tensión en los SEP. Como resultados de este trabajo ya se han presentado ponencias en el evento FIE 2010 y en la 15 Conferencia de Ingeniería y Arquitectura del ISPJAE, Diciembre del 2010.

## **DESARROLLO**

En la literatura pueden encontrarse varias definiciones de lo que significa estabilidad o inestabilidad de tensión, entre ellas: "Es la habilidad de un sistema de potencia para mantener un nivel de tensión aceptable en todas las barras del sistema bajo condiciones normales y después de ser sometido a una perturbación" [2-3].

Generalmente los problemas de la estabilidad de tensión se manifiestan como una caída progresiva e incontrolable del nivel de tensión en las barras del sistema como resultado del intento de las cargas en recuperar su consumo de potencia después de ocurrida una contingencia, o en sistemas fuertemente cargados, cuando la demanda de la carga aumenta.

Básicamente el problema consiste en mantener la tensión de la red en niveles que garanticen una operación estable, lo cual se ha hecho un poco difícil en los últimos años debido a que algunos factores han contribuido a incrementar este problema, tales como el aumento del uso de la compensación de potencia reactiva y la complejidad de los sistemas interconectados. Ante las potenciales consecuencias de un colapso de tensión, fenómeno caracterizado por una caída progresiva e incontrolable de la tensión, en parte del sistema o en todo el sistema; existen algunas posibles soluciones que permiten recuperar la estabilidad de la tensión; entre las soluciones se tienen: el redespacho de generación, la compensación de potencia reactiva mediante el uso de los generadores sincrónicos, compensadores

estáticos de reactivos, el control secundario de tensión, reforzamiento del sistema de potencia (líneas en paralelo) y la desconexión de carga [4].

## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LA TENSIÓN UTILIZANDO EL PROGRAMA PSAF

### Características generales del PSAF

El PSAF es un paquete de programas que permite realizar los estudios de: flujo de carga, análisis de contingencias, flujo óptimo, estabilidad transitoria, corto-circuitos, estabilidad de la tensión, análisis de armónicos, arranque de motores y otros módulos no adquiridos por INEL.

Los datos comunes a distintos programas y específicos para cada uno de ellos se ingresan mediante cajas de diálogos con buen nivel de interactividad.

El módulo o programa para el análisis de la estabilidad de la tensión, objeto de esta investigación, solicita datos comunes al flujo de carga, análisis de contingencias y la estabilidad transitoria; razón por la cual la explotación del mismo requiere del especialista los conocimientos básicos de esos problemas.

Los criterios sobre los que se basa el análisis de la estabilidad se ajustan a los reportados en la literatura revisada. Se destaca como un aspecto para realizar una interesante investigación el tema relacionado con la consideración de las áreas de un SEP.

Las salidas del programa se pueden obtener por tablas y/o gráficos. La salida mediante tablas permite hacer gráficos con algún editor como el EXCEL para garantizar una mejor calidad de los gráficos propios del PSAF.

El programa permite realizar el análisis de la estabilidad de la tensión mediante la curva P-V, curva V-Q, análisis de Sensibilidad y el análisis Modal. En este trabajo se exponen las pruebas realizadas con los dos primeros métodos estáticos y el Análisis Modal.

### Conceptos básicos

**Curvas P-V.** La curva potencia activa-tensión, se utiliza para determinar el límite de estabilidad de tensión en estado estacionario de un sistema de potencia, a partir de la distancia en MW desde el punto de operación al punto de tensión crítica. En la figura 1, se muestra una típica curva P-V donde P, es la potencia activa de la carga, y se toma como un parámetro que varía lentamente, y V es la tensión en la barra de la carga. También se puede observar que existen dos regiones una es la de la tensión estable y la otra es de la de la tensión inestable.

Los sistemas de potencia, se operan en la parte superior de la curva, donde es estáticamente y dinámicamente estable. La punta de la curva (también conocida como codo o nariz de la curva) se denomina el punto de máxima carga, que es el punto de colapso de la tensión cuando las cargas se modelan como potencia constante, cuando la carga se modela en función de la tensión se afecta el punto de colapso de la tensión. El sistema de potencia es de tensión inestable en el punto de colapso de tensión.

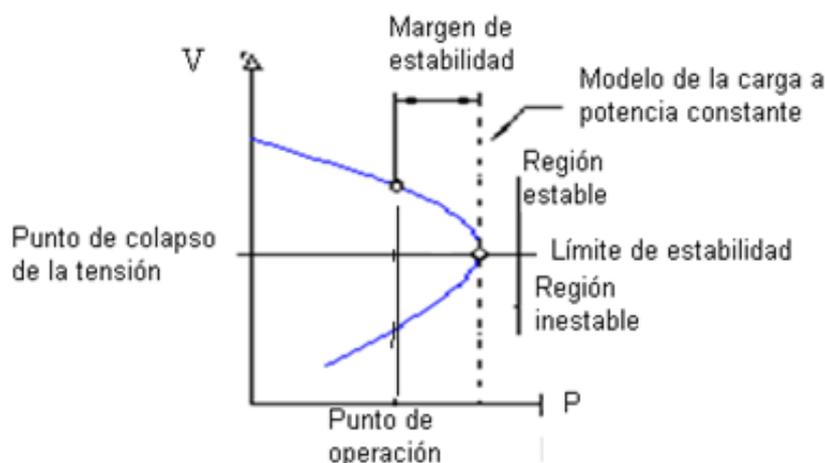


Fig. 1. Curva P-V.

Esta curva se puede obtener mediante cálculos sucesivos de flujo de carga aunque como la Jacobiana se vuelve singular en el punto de la nariz de la curva, no siempre se puede obtener la curva completa como se muestra en la figura 1. Actualmente existen algoritmos que utilizan la técnica del flujo continuado [4], mediante el cual si es posible obtener la curva completa. Con el PSAF no se puede obtener la curva completa.

**Curvas V-Q.** El estudio de estas curvas se basa en interpretar el colapso de tensión como un indicador de que existe un inadecuado balance de potencia reactiva en uno o más nodos de un sistema. La curva se obtiene aumentando el consumo del reactivo en cada una de las barras del sistema o al menos aquellas consideradas más débiles hasta llegar al colapso. Las curvas V-Q que se obtienen tienen forma de "U", en la que el punto más bajo representa el punto de colapso y el margen de potencia reactiva en esa barra.

El mínimo absoluto de ese margen en todas las barras del sistema será el margen al colapso de la tensión. Se considera un método eficiente para planificar la red. En otras palabras se dice que el margen de potencia reactiva indica la cantidad de potencia de compensación (capacitor o SVC) necesaria para restablecer un punto de operación u obtener un valor de tensión deseado. También se define como el valor mínimo que se puede incrementar el consumo de la potencia reactiva de la carga o el decrecimiento de la generación de potencia reactiva para el cual no existe punto de operación.

El colapso de voltaje comienza en la barra más débil del sistema y entonces se extiende hacia otras barras débiles. La barra más débil es la más importante en el análisis del colapso de voltaje. La barra más débil es aquella que exhibiría una de las condiciones siguientes: a) tiene el punto crítico más alto, b) tiene el margen de potencia reactiva más bajo, c) tiene la más grande insuficiencia de potencia reactiva, o d) tiene el más alto porcentaje de cambio en la tensión.

Puede verse en la figura 2, que el sistema es estable con la carga más ligera, P1. Para esta carga, hay una reserva de potencia reactiva ( $Q_{reserve}$ ) que puede usarse para mantener la estabilidad aun cuando la carga aumenta. El sistema es marginalmente estable con la carga P2. El sistema no es estable con la carga más grande P3, una cantidad de potencia reactiva ( $Q_{missing}$ ) debe inyectarse en la barra para causar una intersección con el eje X y evitar un colapso de la tensión. Por consiguiente, la medida de la cantidad de potencia reactiva de reserva ( $Q_{reserve}$ ) podría proporcionar una indicación del margen entre la estabilidad e inestabilidad.

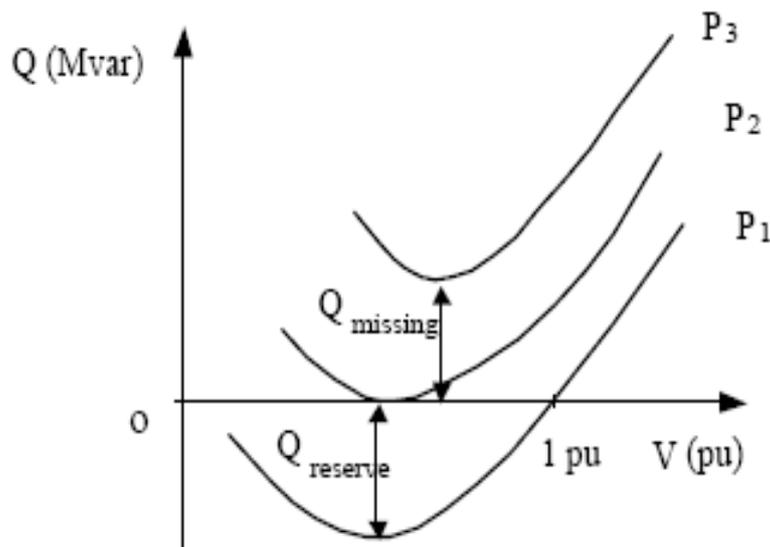


Fig. 2. Curvas V-Q para diferentes valores de la carga.

**Análisis modal.** Permite determinar los autovalores (modos) y autovectores de la matriz Jacobiana Reducida de un sistema eléctrico de potencia.

**Autovalor positivo.** El sistema es estable. A medida que el autovalor es más pequeño, más próxima está de volverse inestable el voltaje. El valor del autovalor puede representar una medida relativa de la proximidad a la inestabilidad.

**Autovalor negativo.** El sistema es inestable de voltaje.

**Autovalor cero.** El voltaje colapsa ya que cualquier cambio de la potencia reactiva origina un cambio infinito en el voltaje.

Otros indicadores basados en el análisis modal proporcionan buena información acerca de la estabilidad de la tensión de los puntos débiles e indican cómo elementos del sistema responden a ciertas variaciones y cuales áreas son las más influenciadas. Estos indicadores son.

- Factor de participación de barras
- Factor de participación de ramas
- Factor de participación de generadores

El factor de participación de barras. Identifica las áreas débiles o inestables. El tamaño del factor de participación indica la efectividad de tomar acciones en esa barra para estabilizar el modo.

El factor de participación de ramas indica cuales ramas consumen más potencia reactiva ante un incremento de la carga de potencia reactiva. Las ramas con alto factor de participación constituyen enlaces débiles o están sobrecargadas. El factor de participación es útil para tomar acciones remediales o para seleccionar las contingencias.

El factor de participación de generadores indica cual de los generadores aporta mayor cantidad de potencia reactiva ante un incremento de la carga. Proporciona información sobre la distribución de la reserva de potencia reactiva a través de todas las máquinas para mantener el valor adecuado del margen de la estabilidad de la tensión.

El PSAF solo calcula el factor de participación de barras, los factores de participación de ramas y de generadores se pueden calcular a través de la información del factor de participación de barras.

### **SOBRE LA INFORMACIÓN INICIAL**

De una forma interactiva mediante el empleo de diferentes cajas de diálogos, el programa de la estabilidad de la tensión utiliza la misma información que se requiere para el cálculo de un flujo de potencia convencional y además alguna información propia para el cálculo de la estabilidad de la tensión, en condiciones normales y ante contingencias, a saber:

Criterio del margen de estabilidad de la tensión.

Límites máximo y mínimo de la tensión en cada barra o nodo.

Reserva rodante de potencia reactiva.

Constante de inercia de cada generador.

Factor de amortiguamiento de cada generador PV.

Caída del gobernador de cada generador.

Definir el modo de realizar el redespacho de la generación: uniforme, flujo inercial o respuesta del gobernador.

### **SALIDAS DEL PROGRAMA SOBRE LA ESTABILIDAD DE LA TENSIÓN**

Se refieren a cada uno de los métodos estáticos mencionados. Se aplican al caso base y al de emergencia. Se pueden ver los resultados en forma gráfica o en tablas.

#### **Curva P-V**

- Mediante gráficos
  - Potencia activa de la carga - Tensión en la barra seleccionada
  - Flujo de potencia activa por una línea - Tensión en la barra seleccionada
- Potencia reactiva de un grupo de generadores seleccionados - Potencia activa de la carga
- Mediante tablas
  - Violación de la tensión
  - Violación de la potencia reactiva
  - Margen de estabilidad de la tensión

#### **Curva V-Q**

- Mediante gráficos
  - Potencia reactiva - Tensión

### **PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS**

1. Establecimiento del caso base [5]
2. Selección de las contingencias más severas
3. Obtención de las curvas P-V para el caso base y ante las contingencias
4. Obtención de las curvas V-Q para el caso base y ante las contingencias
5. Aplicación del análisis Modal

## ANÁLISIS DEL CASO ESTUDIO

El caso estudio es el sistema de 14 barras de la IEEE, figura 3, aceptado en la literatura [6], para hacer validaciones de programas aplicados en el análisis de los regímenes de los sistemas eléctricos de potencia.

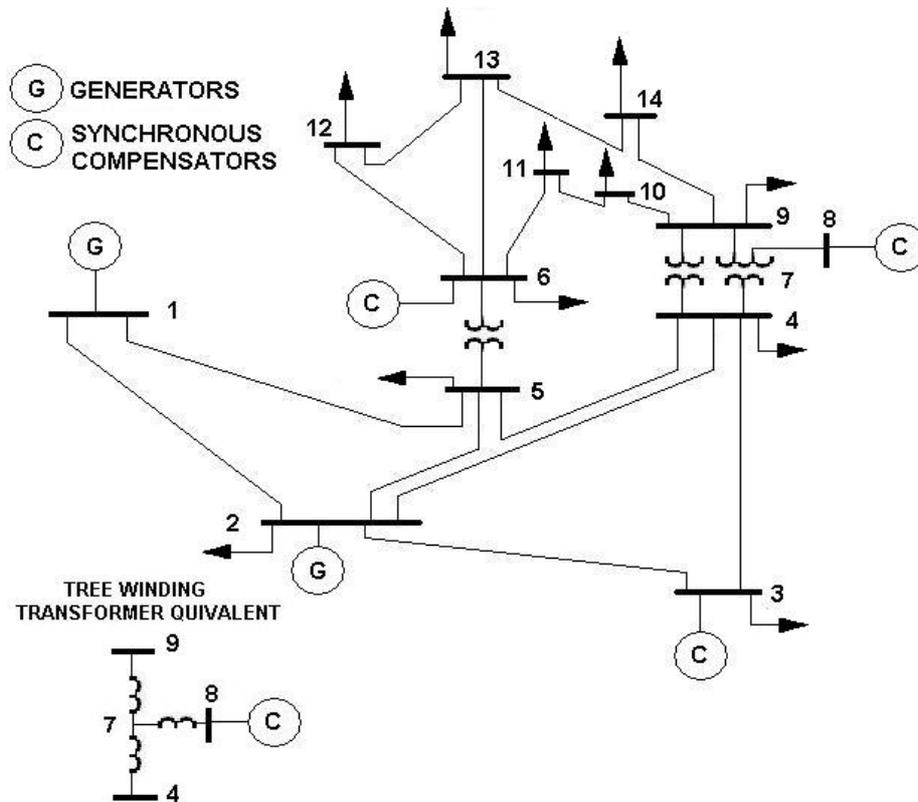


Fig. 3. Esquema típico de 14 barras de la IEEE.

Para el análisis se hacen las siguientes consideraciones.

- Margen de estabilidad de la tensión, 7%
- Límites máximo y mínimo de la tensión en cada barra o nodo, 1.1 y 0.9 pu, respectivamente
- Reserva de potencia reactiva, 15 Mvar (valor por defecto del PSAF).
- Redespacho de la generación, flujo inercial.

Estos valores son los dados por el PSAF, con excepción del último en que se toman los valores de la constante de inercia, dados por el propio ejemplo típico.

## RESULTADOS

La figura 4, muestra las características P-V de las barras 11, 12, 13 y 14, se observa que esas barras son las que acusan mayor caída de la tensión ante el crecimiento de la potencia activa del sistema. Las curvas 11, 12 y 14, que prácticamente coinciden fijan la máxima cargabilidad del sistema; aunque no se viola el margen de estabilidad de la tensión que es de 11,6%, que es mayor que el 7% que es el criterio del margen de estabilidad seleccionado.

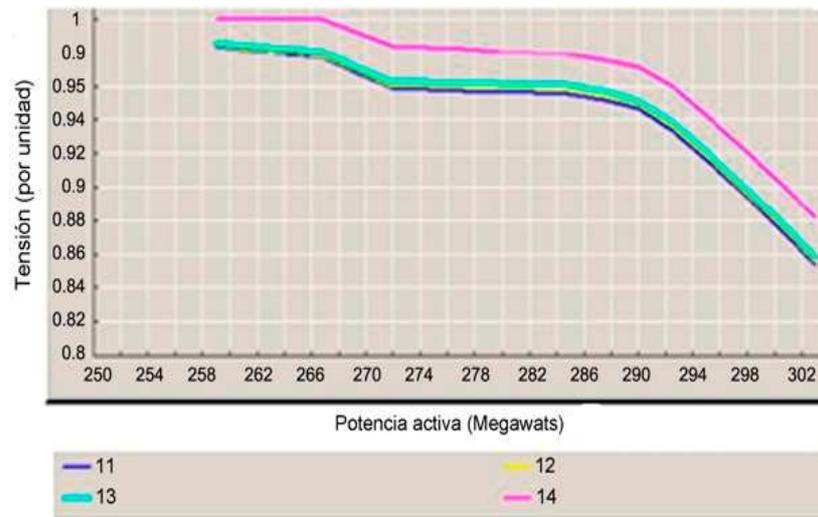


Fig. 4. Curvas P-V.

En la figura 5, se muestran las curvas PV en la barra 14 para el caso base y ante la salida del condensador sincrónico instalado en la barra 8, se observa una significativa disminución del margen de estabilidad de la tensión [7]. Ante la contingencia el margen de estabilidad de la tensión es 7,1%; prácticamente en el límite del criterio (7%), por lo que habría que tomar medidas para resolver este caso.

### Ejemplo 14 barras

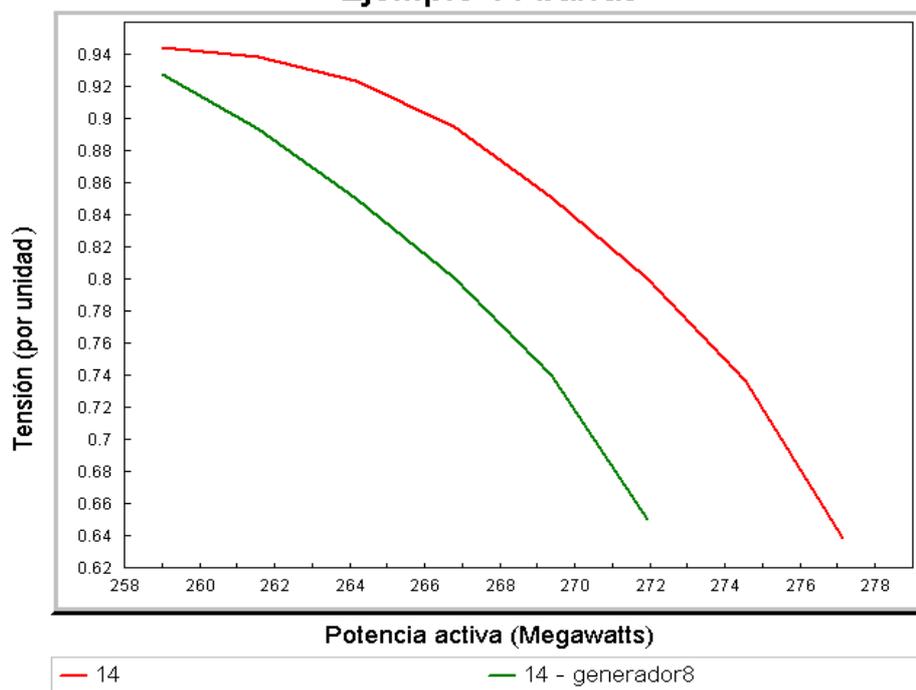


Fig. 5. Curvas P-V.

En la figura 6, se muestra la curva VQ de la barra 14 en las tres variantes analizadas, en condiciones normales obteniéndose un margen de potencia reactiva de 46Mvar, con la desconexión del generador sincrónico conectado a la barra 8, el margen de potencia reactiva es de 36 Mvar y con el caso del incremento de la carga de la red en 105% y ante la desconexión del generador sincrónico se obtiene un margen de potencia reactiva de 33Mvar.

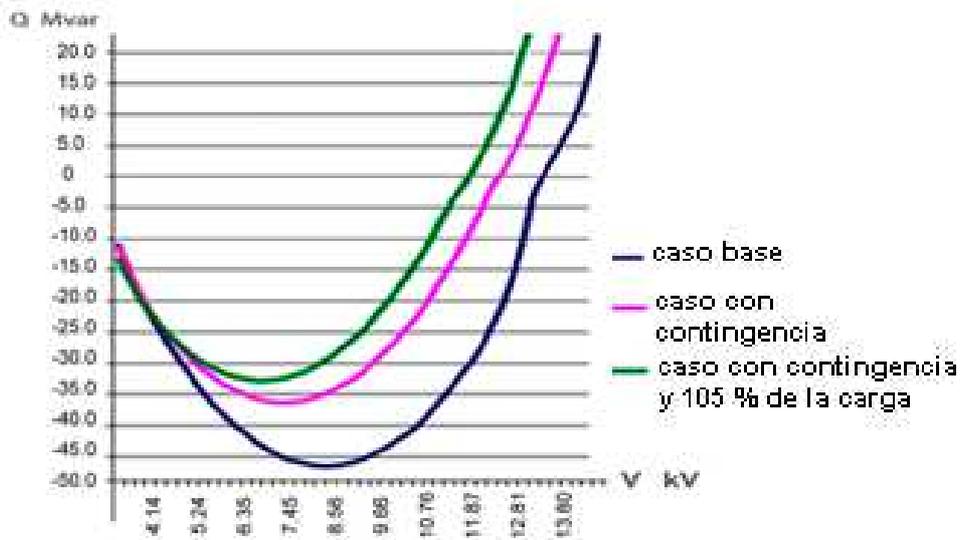


Fig. 6. Curvas V-Q en la barra 14.

El cruce por el eje 0 (eje de las abscisas) de cada una de las curvas VQ determina el valor de la tensión para cada uno de los regímenes considerados. Se observa como el valor de la tensión disminuye para los casos de salida de una línea y la salida del generador sincrónico, respecto al valor del caso base. En la figura 7, se muestran las barras (14, 10 y 11) y los valores del factor de participación de cada una de ellas en el caso base. Los mayores valores del factor de participación indican las barras más vulnerables del sistema ante la inestabilidad de la tensión. Solo se muestran 3 barras porque los resultados muestran que a partir de la cuarta barra el valor del factor de participación es a lo sumo igual al valor de la tercera barra y en la generalidad de los casos es significativamente menor.

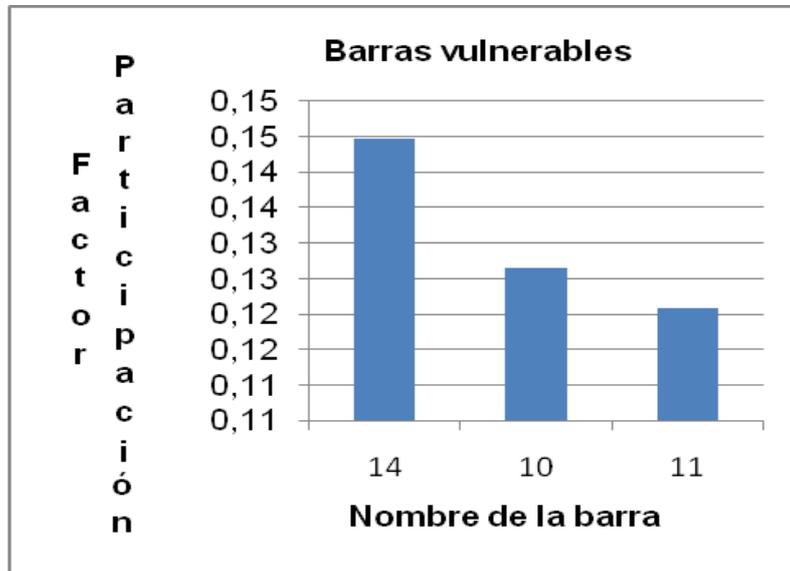


Fig. 7. Factor de participación por barras.

## CONCLUSIONES

1. Los ensayos realizados con el caso estudio de 14 barras de la IEEE permitieron probar el programa PSAF como una herramienta adecuada para realizar los estudios del SEN tomando en consideración el funcionamiento adecuado del mismo con la información utilizada, propia de cualquier sistema eléctrico de potencia.
2. El análisis de los diferentes indicadores de los métodos estáticos coinciden en señalar que en el caso estudio de 14 barras, utilizado para adquirir la experiencia necesaria para realizar los estudios del SEN, el área formada por las barras 10, 11, 12, 13 y 14, es el área débil del caso estudiado, lo cual coincide con trabajos revisados con otros software.

3. La experiencia alcanzada en este trabajo ha permitido ensayar satisfactoriamente el PSAF para realizar estudios de la estabilidad de la tensión, conjuntamente con los otros análisis, correspondientes el estudio de la "Planificación del SEN".

## REFERENCIAS

- [1] BOZA VALERINO, Juan, "Desarrollo histórico de las herramientas de cálculo de la estabilidad transitoria en Cuba". Revista Energética 2005, vol.26, n.1, [consulta: 10 de Noviembre del 2011], Disponible en: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/147/146>
- [2] KUNDUR, P., "Power System Stability and Control". New York, U.S.A: Editorial Mc Graw-Hill, 1994, p. 960-1021, ISBN 007035958X.
- [3] SANDOVAL BR. Ramón, "Restauración de la estabilidad de tensión en sistemas eléctricos de potencia mediante el bote de carga correctivo". Trabajo de diploma, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Barquisimeto, Venezuela, 2008.
- [4] GÓMEZ EXPÓSITO, Antonio, "Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica". España: Editorial Mc Graw-Hill/Interamericana, 2002, ISBN 9788448175528.
- [5] GAO, B.; MORISON, G.K.; KUNDUR, P., IEEE Students Members, "Towards the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large scale power systems". IEEE Transactions on Power Systems, August 1996, vol.11, n.3, [consulta: 12 de Octubre del 2011], Disponible en: <http://www.coep.ufrj.br/~tarang/systematic.pdf>
- [6] SAMEH Kamel; MENA Kodsi, IEEE Student Member, Claudio A. Cañizares, IEEE Senior Member, "MODELING AND SIMULATION OF IEEE 14 BUS SYSTEM WITH FACTS CONTROLLERS". Technical Report, 2003, n.3, p. 54, [consulta: 15 de noviembre del 2011], Disponible en: <https://ece.uwaterloo.ca/~ccanizar/papers/IEEEBenchmarkTFreport.pdf>
- [7] RAMIREZ ARREDONDO, Juan Manuel; CAICEDO DELGADO, Gladys, "Sistemas de Transmission Flexible FACTS". Universidad del Valle, Colombia, Septiembre 2010, p. 212-227, ISBN 9789586708227.

## AUTORES

### Juan Gualberto Boza Valerino

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.  
e-mail: [jboza@electrica.cujae.edu.cu](mailto:jboza@electrica.cujae.edu.cu)

### Raúl Estrada Núñez

Ingeniero Electricista, Especialista del Departamento de Desarrollo Perspectivo de la Empresa de Proyectos (INEL), Unión Nacional de Electricidad (UNE), La Habana, Cuba.  
e-mail: [rauli@inel.une.cu](mailto:rauli@inel.une.cu)

### Annaveil Herrera Díaz

Ingeniero Electricista, Especialista del Departamento de Desarrollo, Perspectivo de la Empresa de Proyectos de la Electricidad (INEL), Unión Eléctrica (UNE), La Habana, Cuba.  
e-mail: [annaveil@inel.une.cu](mailto:annaveil@inel.une.cu)

### Moisés Barreto Banderas

Ingeniero Electricista, Director del Departamento de Desarrollo Perspectivo de la Empresa de Proyectos (INEL), Unión Nacional de Electricidad (UNE), La Habana, Cuba.  
e-mail: [mbarreto@inel.une.cu](mailto:mbarreto@inel.une.cu)