

## NUEVO ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN PARA MEJORAR LA OPERACIÓN EN REDES RADIALES DE DISTRIBUCIÓN

### New voltage stability index to improve the radial distribution networks operation

#### RESUMEN

Este artículo presenta un nuevo índice de estabilidad de voltaje aplicado a redes radiales de distribución. Fue resuelto el problema de reconfiguración de alimentadores primarios usando el algoritmo genético de Chu-Beasley, en el cual el índice propuesto es usado como función objetivo.

Dos sistemas de pruebas han sido utilizados, el primero de ellos cuenta con 33 nodos y 37 ramas, y el segundo, posee 136 nodos y 156 ramas.

Los resultados muestran que el índice propuesto presenta resultados satisfactorios, es confiable y fácil de implementar al ser comparado con dos índices de estabilidad propuestos en la literatura técnica.

**PALABRAS CLAVES:** Algoritmos Genéticos, Colapso de tensión, Índice de estabilidad de tensión, reconfiguración de alimentadores primarios.

**ABSTRACT** This paper presents a new voltage stability index for radial distribution networks. The Chu-Beasley genetic algorithm was implemented to solve the feeder reconfiguration problem in which the new index is used as the objective function.

Two test systems were used. The first system has 33 nodes and 37 branches, and the second system has 136 nodes and 156 branches.

The results show that the proposed index is reliable and easy to implement. It provides satisfactory results when the index is compared with two stability indices proposed in the literature.

**KEYWORDS:** Voltage collapse, voltage stability index, feeder reconfiguration.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo que se desea obtener con el cambio de la topología en los alimentadores primarios es el de reducir al mínimo las pérdidas técnicas de potencia, mejorar los índices de estabilidad y minimizar la cantidad energía no servida entre otros. Estos problemas han sido tratados por diferentes autores en forma independiente, así: El problema de la reducción de pérdidas fue presentado por Aoki et al en [1,2], por Cinvalar et al, en [3] y Baran, en [4]. La minimización de la cantidad de energía no servida fue presentada por Monticelli et al en [5]. Adicionalmente, el problema de estabilidad de tensión en redes de distribución es presentado por Chaturvedi, en [6] y por Eminoglu, en [7].

Los problemas aquí planteados son clasificados como siendo de programación no-lineal entera mixta, de tipo combinatorio, y considerados de acuerdo a su complejidad matemática como NP- completos, los cuales requieren de la inversión de tiempos exhaustivos para obtener la solución del problema.

Técnicas heurísticas y Metaheurísticas de optimización combinatorial han sido usadas en la solución de estos problemas [8-10].

Fecha de Recepción: 8 de julio de 2009

Fecha de Aceptación: 13 de Agosto de 2009

#### JORGE MARIO ARIAS P.

Ingeniero Electricista  
Estudiante de Maestría  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[jorgeutp@gmail.com](mailto:jorgeutp@gmail.com)

#### RAMÓN ALFONSO GALLEGO

Ingeniero Electricista, PhD.  
Profesor Titular  
Programa de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[ragr@utp.edu.co](mailto:ragr@utp.edu.co)

#### ANTONIO ESCOBAR Z.

Ingeniero Electricista, PhD.  
Profesor Titular  
Programa de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
[aescobar@utp.edu.co](mailto:aescobar@utp.edu.co)

En este artículo se discute el impacto de la reconfiguración de alimentadores primarios en la estabilidad de tensión y su relación con las pérdidas de potencia. Para ello, se propone un nuevo índice de estabilidad de voltaje que hace uso de medidas fasoriales adquiridas en la subestación. Este índice será comparado con los propuestos en [6] y [7]. En la implementación del problema de reconfiguración se hace uso del algoritmo genético de Chu-Beasley. Dos sistemas de prueba han sido utilizadas para comparar los resultados, el primero es el sistema de prueba propuesto por Baran y Wu [4] que consta de 33 nodos, 2 alimentadores principales y 37 ramas, y el segundo es el sistema de prueba propuesto por Gallego et al [11] que consta de 136 nodos, 7 alimentadores principales y 156 ramas.

#### 2. ESTABILIDAD DE TENSIÓN

La estabilidad de voltaje se refiere a “la habilidad de un sistema de potencia para mantener el estado del voltaje en todas sus nodos después de presentarse una perturbación dado un punto de operación inicial” [12], si existe estabilidad de voltaje, la tensión y la potencia pueden ser controlables en todo momento.

A continuación, se ilustran los conceptos básicos relacionados con la inestabilidad de voltaje. En principio se considerarán las características de la red de transmisión y después se examina como este fenómeno es influenciado por las características de la carga.

#### A. Características de la Red de Transmisión

La inestabilidad de voltaje puede ocurrir por diferentes factores. En su forma más simple, esto puede ser ilustrado considerando la red de dos barras de la figura 1. Esta consiste en una fuente de voltaje constante ( $\bar{E}_s$ ) supliendo una carga ( $\bar{Z}_{LD}$ ) a través de una impedancia serie ( $\bar{Z}_{LN}$ ). Lo cual es representativo de una simple red radial que alimenta una carga, o de una área de carga en un gran sistema eléctrico alimentada a través de líneas de transmisión.

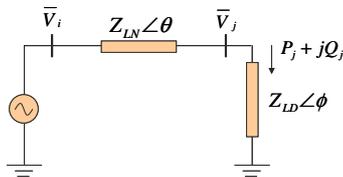


Figura 1 Un ejemplo simple para ilustrar el fenómeno de estabilidad de voltaje.

La expresión para la corriente  $\bar{I}$  del circuito de la figura 1.0 es:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_s}{\bar{Z}_{LN} + \bar{Z}_{LD}} \quad (1)$$

La magnitud de la corriente esta dada por:

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \phi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \phi)^2}} \quad (2)$$

La ecuación (2) puede ser expresada como:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_s}{Z_{LN}} \quad (3)$$

Donde

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \phi) \quad (4)$$

La magnitud del voltaje en el nodo de recibo es:

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_s \quad (5)$$

La potencia suplida a la carga es por tanto:

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_s}{Z_{LN}}\right)^2 \cos \phi \quad (6)$$

Gráficas de  $I$ ,  $V_R$  y  $P_R$  se muestran en la figura 2.0 como una función de  $Z_{LN}/Z_{LD}$ .

En la figura 2 se observa que el punto de máxima cargabilidad, el cual es el límite de estabilidad de voltaje del sistema se obtiene cuando la magnitud de la relación  $Z_{LN}/Z_{LD}$  es exactamente igual a 1. Este punto también

puede ser evaluado a través de relaciones de los fasores de voltaje y corriente adquiridos en el nodo de recibo.

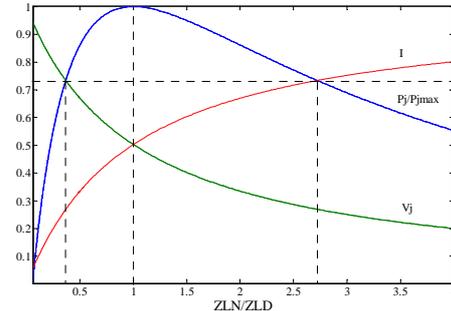


Figura 2 Voltaje en el recibo, corriente y potencia como una función de la carga demandada por el sistema de la figura 1.

#### B. Características de Carga

La potencia transmitida es máxima cuando la magnitud de la caída de tensión en la línea es igual a la magnitud del voltaje en el nodo de recibo  $V_R$ , esto como se ha mencionado con anterioridad sucede cuando  $Z_{LD} = Z_{LN}$ . Esta relación directa entre la impedancia de carga y la impedancia de línea depende implícitamente del factor de potencia de la carga, es decir, para un factor de potencia en atraso, la impedancia de carga se aproxima más rápidamente a la impedancia de línea, caso opuesto a si el factor de potencia fuera en adelanto. Para ilustrar lo anterior, se hace uso del flujo de carga continuado, el cual tiene como finalidad encontrar el punto de máxima cargabilidad del sistema donde se varía el factor de potencia de la carga y se grafican las respectivas curvas P-V.

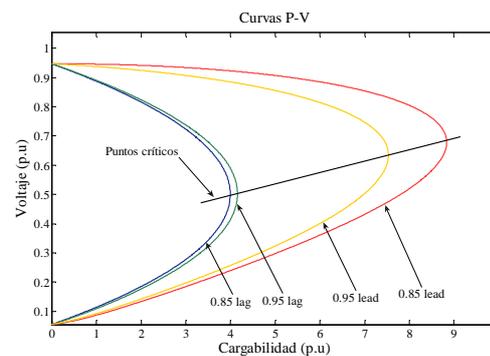


Figura 3 Curvas P-V para diferentes factores de potencia en el nodo de carga de la figura 1.

En la figura 3 se observa que para factores de potencia en atraso la cargabilidad del sistema es menor y por lo tanto el punto de inestabilidad se encuentra más cercano al punto de operación de la red, caso opuesto a si el factor de potencia esta en adelanto.

La anterior descripción del fenómeno de estabilidad de voltaje es básica y pretende ayudar a clasificar y entender

los diferentes aspectos de la estabilidad de voltaje en un sistema de potencia.

### 3. NUEVO ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Como puede observarse en la figura 2 es posible evaluar el punto de máxima transferencia de potencia (límite de estabilidad de voltaje) relacionando los fasores de voltaje y corriente adquiridos.

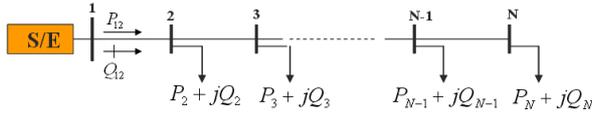


Figura 4 Red de distribución radial.

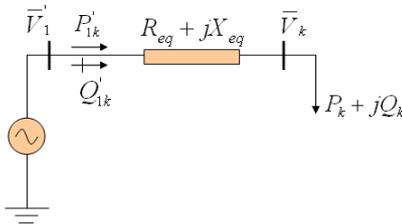


Figura 5 Equivalente eléctrico de dos barras del sistema de distribución de la figura 4.0.

En un sistema de distribución (figura 4), la figura 5 representa el equivalente del sistema visto desde la subestación, tal y como se presenta en [6].

Para que los sistemas de las figuras 4 y 5 sean equivalentes, es necesario que la potencia suministrada por las fuentes de alimentación sean iguales, es decir, el efecto interno de ambas redes debe ser idéntico. Así, se debe cumplir que:

$$P_{12} + jQ_{12} = P'_{1k} + jQ'_{1k} \quad (7)$$

La potencia demandada en el nodo  $k$  del circuito equivalente se define como la suma de todas las potencias demandadas en los nodos del sistema de distribución real, es decir:

$$P_k = \sum_{i=2}^N P_i \quad (8)$$

$$Q_k = \sum_{i=2}^N Q_i \quad (9)$$

La impedancia serie del circuito ilustrado en la figura 5.0 deben ser tal, que al circular una corriente que sale de la fuente de alimentación a través de ella se generen las mismas pérdidas de potencia activa y reactiva del sistema de distribución real. Así:

$$R_{eq} = \frac{\sum P_{loss}}{(P_k + \sum P_{loss})^2 + (Q_k + \sum Q_{loss})^2} \quad (10)$$

$$X_{eq} = \frac{\sum Q_{loss}}{(P_k + \sum P_{loss})^2 + (Q_k + \sum Q_{loss})^2} \quad (11)$$

La potencia activa y reactiva inyectada en el nodo  $k$  puede ser evaluada de la siguiente manera en relación al circuito de la figura 5.0:

$$P_k = G_{kk} V_k^2 + G_{k1} V_k V_1' \cos \delta - B_{k1} V_k V_1' \sin \delta \quad (12)$$

$$Q_k = -B_{kk} V_k^2 - G_{k1} V_k V_1' \sin \delta - B_{k1} V_k V_1' \cos \delta \quad (13)$$

Donde

$$G_{kk} = \frac{R_{eq}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (14)$$

$$B_{kk} = \frac{-X_{eq}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (15)$$

$$G_{k1} = -G_{kk} \quad (16)$$

$$B_{k1} = -B_{kk} \quad (17)$$

$$\delta = \theta_1 - \theta_k \quad (18)$$

La condición de inestabilidad de voltaje conlleva a que la matriz de sensibilidad asociada al sistema equivalente de dos barras sea singular, es decir, en el punto de inestabilidad:

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \cdot \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} - \frac{\partial P_k}{\partial V_k} \cdot \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = 0 \quad (19)$$

Calculando cada una de las respectivas derivadas parciales y evaluando (19) se llega a que la singularidad (límite de estabilidad de voltaje) se genera cuando:

$$V_k = \frac{V_1'}{2 \cos \delta} \quad (20)$$

Para satisfacer la ecuación (7) es necesario que:

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_1 \quad (21)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_1 \quad (22)$$

Reemplazando (21) en (20) se llega a que:

$$V_k = \frac{V_1}{2 \cos \delta} \quad (23)$$

La caída de tensión en la impedancia serie se puede calcular fácilmente como:

$$\Delta \bar{V}_{line} = (R_{eq} + jX_{eq}) \cdot \bar{I}_1 \quad (24)$$

Relacionando (23) y (24) y tomando en consideración el circuito de la figura 5, se concluye que en el punto de inestabilidad de tensión ocurre cuando:

$$\Delta V_{line} = \frac{V_1}{2 \cos \delta} \quad (25)$$

En operación normal, la diferencia angular entre los fasores de voltaje en los nodos de envío y recibo se puede aproximar a cero, con lo cual  $\cos \delta \approx 1$ .

Con la consideración anterior, un nuevo índice de estabilidad de voltaje se presenta como:

$$VSI_k = 1 - \frac{\Delta V_{line}}{V_1} \quad (26)$$

Este nuevo índice de estabilidad de tensión tiene un límite igual a 1 para el sistema bajo la condición ideal que no

presenta caída de voltaje en la impedancia serie e igual a 0.5 cuando se entra a la inestabilidad.

#### 4. RECONFIGURACIÓN DE ALIMENTADORES PRIMARIOS

El problema de la reconfiguración óptima de sistemas de distribución consisten en encontrar una topología radial del sistema, con algunos alimentadores operando y otros fuera de operación, de forma que sea optimizado un objetivo [13]. Por lo tanto, en general el problema intenta encontrar aquella configuración radial, del espacio de configuraciones posibles, que genera la mejor función objetivo en el sistema de distribución y que satisfaga las siguientes restricciones:

- Límite de tensión.
- Capacidad de las líneas y transformadores.
- Balance de potencia
- Topología radial.

En un sistema real la explosión combinatorial de alternativas en el problema vuelve difícil su solución a través de métodos de enumeración explícita, por lo cual, es necesario recurrir a técnicas heurísticas o metaheurísticas de optimización de las que hace parte el algoritmo genético de Chu-Beasley, el cual ha sido implementado en este estudio para evaluar la eficiencia del índice propuesto.

##### A) Algoritmo Genético de Chu-Beasley

El algoritmo genético de Chu-Beasley utiliza los conceptos fundamentales del algoritmo genético básico, pero posee unas características que lo convierten en un algoritmo más eficiente [13] las cuales se enuncian a continuación:

- Utiliza una función *fitness* para identificar el valor de la solución de mejor calidad. Maneja la infactibilidad separadamente para el proceso de reemplazo de una solución infactible en otra.
- A diferencia del algoritmo genético básico, el algoritmo genético de Chu-Beasley sólo sustituye un individuo a la vez en la población, en cada ciclo generacional.
- Es un algoritmo elitista, ya que un padre será reemplazado por un descendiente en la próxima generación, si y sólo si, el descendiente es de mejor calidad.
- Cada individuo que entra a hacer parte de la población debe ser diferente a todos los que conforman la población actual (*criterio de diversidad controlada*).
- Incluye un criterio de aspiración que consiste en que un individuo puede ingresar a la población actual, a pesar de no cumplir con el criterio de diversidad controlada, si este tiene mejor función objetivo que la incumbente y eliminar de la población aquellos individuos con los que tiene conflicto.
- Puede incluir una etapa de mejoramiento después de realizar selección, recombinación y mutación.

##### AI) Codificación del Problema

En este caso las variables del problema son fácilmente identificables y se debe generar una red radial con líneas activas e inactivas, en la cual, una línea activa o energizada

se denotará por un "1" y una inactiva o fuera de operación se denotará por un "0". Así, un individuo de la población que representa en forma completa la topología de la red tendría la siguiente forma:

$$H_i = [1 \ 0 \ 1 \ K \ 1 \ 0] \quad (27)$$

La dimensión del vector  $H_i$  está determinado por el número total de ramas del sistema de distribución (activas e inactivas), y el número de unos "1's" en el mismo vector debe ser igual en cantidad a  $(n-1)$ , donde  $n$  representa el número de barras del sistema.

##### A2) Función de Adaptación (*fitness*)

Para el cálculo del impacto de la estabilidad de tensión de la red en el problema de la reconfiguración de alimentadores primarios, se probarán cuatro funciones objetivo, tres de ellas ampliamente estudiadas en la literatura técnica y la cuarta, será el índice propuesto en este artículo. A continuación se presentan los cuatro objetivos las cuales se optimizarán de forma independiente.

###### 1. Minimizar Pérdidas

El objetivo del problema en este caso es minimizar las pérdidas técnicas de energía relacionadas al sistema, con lo cual la función objetivo se puede plantear de la siguiente forma [3]:

$$\min v = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (28)$$

###### 2. Maximizar $VSI_{eq-1}$

Este índice es propuesto en [6] y se fundamenta en que la magnitud del voltaje en el nodo de recibo  $k$  de la figura 5.0 debe ser siempre una cantidad real, por lo cual se debe satisfacer la siguiente condición:

$$V_i^2 - 4(P_k \cdot R_{eq} + Q_k \cdot X_{eq}) \geq 0 \quad (29)$$

Donde  $V_i$  es la magnitud del voltaje en la subestación.

Así, el índice propuesto en [6] adquiere la siguiente forma:

$$VSI_{eq-1} = V_i^2 - 4(P_k \cdot R_{eq} + Q_k \cdot X_{eq}) \quad (30)$$

Entre mayor sea el valor del índice el sistema presentará mejores características de estabilidad. Por lo tanto, la función de adaptación puede presentarse como:

$$\max v = V_i^2 - 4(P_k \cdot R_{eq} + Q_k \cdot X_{eq}) \quad (31)$$

###### 3. Minimizar $VSI_{eq-2}$

Este índice de estabilidad de tensión es propuesto en [7] se deduce de la descripción del circuito equivalente mostrado en la figura 5.0. Su formulación matemática adquiere la siguiente forma:

$$VSI_{eq-2} = 4 \left[ (X_{eq} P_k - R_{eq} Q_k)^2 + X_{eq} Q_k + R_{eq} P_k \right] \quad (32)$$

El comportamiento de la red es mejor ante problemas de inestabilidad siempre y cuando el índice

presentado en (32) sea lo menor posible. La función objetivo se plantea como:

$$\min v = 4 \left[ (X_{eq} P_k - R_{eq} Q_k)^2 + X_{eq} Q_k + R_{eq} P_k \right] \quad (33)$$

4. Maximizar  $VSI_k$  (propuesto)

Este índice se desarrolló en la sección III del presente artículo representado mediante la ecuación (26), el cual tiene un valor cercano a 1 para operación estable y cercano a 0.5 para operación anormal. De modo que la función objetivo puede plantearse como:

$$\max v = 1 - \left| \frac{(R_{eq} + jX_{eq}) \cdot \bar{I}_1}{\bar{V}_1} \right| \quad (34)$$

Lo cual es equivalente a minimizar la caída de tensión en la impedancia serie del circuito equivalente de la figura 5.0.

A3) Generación de Población Inicial

Las configuraciones de la población inicial pueden ser generadas aleatoriamente siguiendo alguna técnica de árboles de mínima expansión.

A4) Selección

El proceso de selección utilizado en este algoritmo genético es el comúnmente denominado: "Proceso de Selección por Torneo", usando dos padres por torneo [13].

A5) Recombinación

Los padres resultantes del proceso de selección son sometidos a recombinación. Se usa recombinación de 1 punto como se muestra en [13].

A6) Mutación

Básicamente la mutación en la codificación binaria significa simplemente cambiar para el problema de reconfiguración dos variables de 0 para 1 ó viceversa de forma independiente en el vector  $H_i$  presentado en (27).

Este paso reconfiguración debe hacerse por medio de indicadores de sensibilidad para darle eficiencia al método, es decir, la selección de la variable a ser mutada debe ser determinística.

5. SISTEMA DE PRUEBA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de la introducción del algoritmo genético de Chu-Beasley, es obtener una configuración del sistema que optimice cada una de las funciones objetivo planteadas en la sección anterior. Para ello, se hará uso de dos sistemas de prueba ampliamente estudiados en la literatura especializada. El primer sistema de prueba utilizado es un hipotético sistema de distribución de 33 nodos, 2 alimentadores principales y 37 ramas el cual es presentado en [4]. La configuración inicial del sistema con las líneas activas 1-32 presenta las siguientes características:

Tabla I  
Características de la Configuración Base  
(Sistema 33 nodos)

| Lopen | Pérd [kW] | Vmin [p.u] |
|-------|-----------|------------|
| 33-37 | 210.96    | 0.9037     |

Tabla II  
Evaluación de Función Objetivo (caso base)  
(Sistema 33 nodos)

| Pérd   | $VSI_{eq-1}$ | $VSI_{eq-2}$ | $VSI_k$ |
|--------|--------------|--------------|---------|
| 210.96 | 0.7918       | 0.2082       | 0.9448  |

Al aplicar el algoritmo genético de Chu-Beasley para optimizar cada una de las funciones objetivo, se obtienen las siguientes configuraciones en el sistema.

Tabla II  
Mejores Configuraciones Encontradas  
(Sistema 33 nodos)

| Pérd         | $VSI_{eq-1}$ | $VSI_{eq-2}$ | $VSI_k$ |
|--------------|--------------|--------------|---------|
| Lopen        | Lopen        | Lopen        | Lopen   |
| 7            | 7            | 7            | 7       |
| 9            | 9            | 9            | 9       |
| 14           | 14           | 14           | 14      |
| 32           | 32           | 32           | 32      |
| 37           | 37           | 37           | 37      |
| Pérd[kW]     | 139.53       | 139.53       | 139.53  |
| $VSI_{eq-1}$ | 0.8538       | 0.8538       | 0.8538  |
| $VSI_{eq-2}$ | 0.1462       | 0.1462       | 0.1462  |
| $VSI_k$      | 0.9618       | 0.9618       | 0.9618  |
| Vmin[p.u]    | 0.9377       | 0.9377       | 0.9377  |

El segundo sistema de prueba utilizado es un hipotético sistema de distribución de 136 nodos, 7 alimentadores principales y 156 ramas [11]. La configuración inicial del sistema con las líneas activas 1-135 presenta las siguientes características:

Tabla III  
Características de la Configuración Base  
(Sistema 136 nodos)

| Lopen   | Pérd [kW] | Vmin [p.u] |
|---------|-----------|------------|
| 136-156 | 320.4     | 0.9307     |

Tabla IV  
Evaluación de Función Objetivo (caso base)  
(Sistema 136 nodos)

| Pérd  | $VSI_{eq-1}$ | $VSI_{eq-2}$ | $VSI_k$ |
|-------|--------------|--------------|---------|
| 320.4 | 0.8914       | 0.1109       | 0.95238 |

Al optimizar cada una de las funciones objetivo se obtienen las configuraciones para el sistema mostradas en la tabla V.

Como puede observarse en las tablas II y V, al reducir las pérdidas de potencia, se mejoran los flujos, se corrigen los perfiles de tensión en cada una de las barras y por lo tanto, se mejora la estabilidad del sistema en general.

Para validar afirmación anterior, puede observarse en la tabla II que al optimizar cada uno de los índices, estos coincidieron con la misma topología óptima que se obtiene al minimizar las pérdidas de potencia. En la tabla V esto no sucedió, pero es posible apreciar la relación directa entre los resultados, es decir, entre mejor sea cada uno de

los índices de estabilidad, menor son las pérdidas de potencia.

Lo cual indica que atender la carga de un sistema de distribución con las menores pérdidas posibles mejora implícitamente la seguridad del sistema respecto a la estabilidad de tensión.

Tabla V  
Mejores Configuraciones Encontradas  
(Sistema 136 nodos)

|                  | <b>Pérd</b>  | $VSI_{eq-1}$ | $VSI_{eq-2}$ | $VSI_k$      |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                  | <b>Lopen</b> | <b>Lopen</b> | <b>Lopen</b> | <b>Lopen</b> |
|                  | 7            | 9            | 7            | 51           |
|                  | 51           | 35           | 9            | 53           |
|                  | 53           | 51           | 49           | 90           |
|                  | 84           | 55           | 51           | 96           |
|                  | 90           | 84           | 53           | 106          |
|                  | 96           | 90           | 84           | 118          |
|                  | 106          | 92           | 90           | 126          |
|                  | 118          | 96           | 96           | 135          |
|                  | 126          | 104          | 106          | 136          |
|                  | 128          | 106          | 119          | 137          |
|                  | 137          | 126          | 126          | 138          |
|                  | 138          | 135          | 138          | 141          |
|                  | 139          | 136          | 139          | 144          |
|                  | 141          | 138          | 144          | 145          |
|                  | 144          | 141          | 145          | 146          |
|                  | 145          | 143          | 147          | 147          |
|                  | 147          | 144          | 148          | 148          |
|                  | 148          | 145          | 150          | 150          |
|                  | 150          | 148          | 151          | 151          |
|                  | 151          | 150          | 155          | 155          |
|                  | 156          | 155          | 156          | 156          |
| <b>Pérd[kW]</b>  | 280.22       | 295.96       | 281.81       | 281.52       |
| $VSI_{eq-1}$     | 0.9046       | 0.8995       | 0.9040       | 0.9043       |
| $VSI_{eq-2}$     | 0.0972       | 0.1025       | 0.0978       | 0.0975       |
| $VSI_k$          | 0.9671       | 0.9652       | 0.9669       | 0.9670       |
| <b>Vmin[p.u]</b> | 0.9598       | 0.9586       | 0.9587       | 0.9598       |

## 6. CONCLUSIONES

- Se propone un nuevo índice de estabilidad de tensión y para su comprobación se estudió su comportamiento en el problema de la reconfiguración de alimentadores primarios del sistema de distribución.
- El índice de estabilidad propuesto es de fácil implementación ya que hace uso de medidas fasoriales de fácil acceso en la central de distribución, además fue comprobada su validez en el estudio de la estabilidad de tensión del sistema de distribución.
- El algoritmo genético de Chu-Beasley presenta gran eficiencia en la solución del problema, para los cuatro índices estudiados, requiriendo de poco esfuerzo computacional para obtener soluciones de muy alta calidad.
- Se observó una gran relación entre minimizar las pérdidas de potencia y maximizar la estabilidad de

voltaje del sistema, ya que implícitamente tanto en las pérdidas como en la estabilidad se busca mejorar el perfil de tensión.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Aoki, I. Ichinori, M Kanczashi, "Normal state optimal load allocation in distribution systems": Power Delivery, No. 1, 1987, pp. 147-155
- [2] K. Aoki, H. Kawabara, T Satoh, M. Kane", "An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1988, p.p. 1865-1872.
- [3] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.3, pp. 1217- 1223, Jul 1988.
- [4] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, 1989, pp. 140 1-1407.
- [5] A. L. Morelato and A. Monticelli, "Heuristic search approach to distribution system restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 2235-2240.
- [6] Chaturvedi A, Prasad K, Ranjan R. "A new voltage stability index for radial distribution systems". International Journal of Power and Energy. 26(1), paper No. 203-3454, 2006.
- [7] Eminoglu, U., Hocaoglu, M. H. "A voltage stability index for radial distribution networks," Universities Power Engineering Conference, 2007 UPEC 2007. 42<sup>nd</sup> International, pp. 260-266, 2004.
- [8] F. V Gomes, S. Carneiro et al, "A new heuristic Reconfiguration algorithm for large distribution systems", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005.
- [9] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, 1989, pp. 1492-1498.
- [10] T. E. McDermott, I. Drezga, y R. P. Broadwater, "A heuristic non-linear constructive method for distribution system reconfiguration," IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1999.
- [11] Ramon A. Gallego, Alcir J. Monticelli, Ruben Romero, "Optima capacitor placement in radial distribution networks" IEEE Trans. on power systems, vol. 16, no. 4, november 2001.
- [12] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", Electric Power Research Institute. McGraw-Hill.
- [13] Ramón A. Gallego, Antonio H. Escobar, Eliana M. Toro. "Técnicas Metaheurísticas de Optimización". Universidad Tecnológica de Pereira.