

## ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN RECONFIGURACIÓN DE CIRCUITOS PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN

### Voltage Stability Analysis in Power Distribution Feeder Reconfiguration

#### RESUMEN

La estabilidad de voltaje determina la máxima cargabilidad de un sistema de potencia y la reconfiguración de circuitos primarios de distribución determina alternativas óptimas de conexión de las cargas para aumentar la confiabilidad del servicio. Aunque fuertemente relacionados entre sí, estos análisis han sido tradicionalmente realizados en forma independiente; así, este artículo presenta un estudio sobre la relación existente entre ellos. El principal resultado es que el criterio de minimización de pérdidas aplicado en el análisis de reconfiguración lleva implícitamente a la mejora de la estabilidad de voltaje, pero un análisis explícito de estabilidad permite identificar soluciones alternativas de reconfiguración que sin ser óptimas brindan buena cargabilidad y estabilidad.

**PALABRAS CLAVES:** Estabilidad de voltaje, sistemas de distribución de energía, reconfiguración de alimentadores primarios.

#### ABSTRACT

*Voltage stability determines the maximum loadability of a power system and power distribution feeder reconfiguration determines optimum feasible alternatives for load connection in order to increase service reliability. Although strongly connected, these analyses have been traditionally performed independently; thus, this paper presents a study on their relationship. The main result is the criterion of losses minimization applied in the reconfiguration analysis implicitly leads to the improvement of voltage stability but an explicit assessment of voltage stability allows the identification of reconfiguration alternatives that although are not optimum offer good loadability and stability.*

**KEYWORDS:** Voltage stability, power distribution, feeder reconfiguration.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de voltaje determina la máxima cargabilidad de un sistema de potencia; así, diversos índices para estimar la distancia del punto de operación al punto de máxima cargabilidad han sido propuestos en la literatura técnica, la mayoría deducidos a través de la construcción de un sistema equivalente de dos barras. Por otra parte, la reconfiguración es una estrategia que permite ante salida planeada o no planeada de alguno de los componentes del circuito primario de distribución determinar alternativas de conexión de las cargas con el fin de aumentar la disponibilidad del servicio, aplicando un criterio de optimización que tradicionalmente ha sido la minimización de pérdidas técnicas [1]. La figura 1 muestra un esquema de análisis de alternativas para reconfiguración.

Aunque fuertemente relacionados entre sí, estos dos tipos de análisis han sido tradicionalmente realizados en forma independiente; así, un asunto de interés es el determinar la relación existente entre ellos lo cual es el tema de estudio en el presente artículo.

Fecha de Recepción: 26 de enero de 2009

Fecha de Aceptación: 13 de abril de 2009

#### OSCAR GÓMEZ

Ingeniero Electricista, MSc  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jr@utp.edu.co

#### CARLOS J. ZAPATA

Ingeniero Electricista, PhD (C)  
Profesor Asociado  
Universidad Tecnológica de Pereira  
cjzapata@utp.edu.co

#### JORGE M. ARIAS

Ingeniero Electricista  
Asistente de Investigación  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jorgeutp@gmail.com

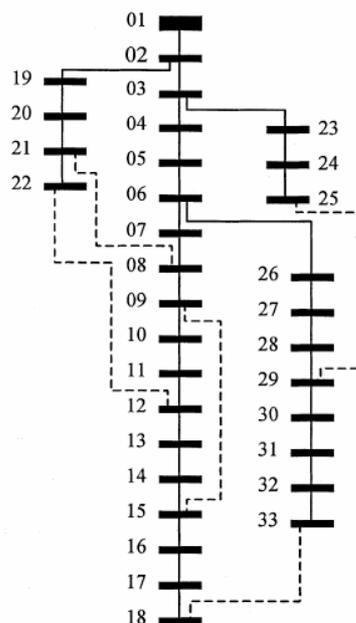


Figura 1. Sistema de prueba IEEE-33 (Topología 0).

## 2. ÍNDICES DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

### 2.1 Índice de Estabilidad de Voltaje VSI.

El principio básico del índice VSI (Voltage Stability Index VSI) presentado en [2] se puede deducir describiendo el circuito mostrado en la figura 2.

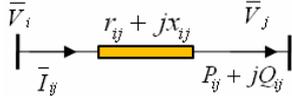


Figura 2. Modelo circuital de una línea del sistema de distribución.

Las ecuaciones que describen el anterior circuito son:

$$V_i \angle \delta_i - V_j \angle \delta_j = (r_{ij} + jx_{ij}) I_{ij} \angle \phi \quad (1)$$

$$V_j \angle -\delta_j \cdot I_{ij} \angle \phi = P_j - jQ_j \quad (2)$$

Relacionando las ecuaciones anteriores y asumiendo  $\delta = \delta_i - \delta_j \approx 0$  (con lo cual,  $\cos \delta \approx 1$  y  $\sin \delta \approx 0$ ), se obtiene:

$$V_j^2 - V_i V_j + (P_j \cdot r_{ij} + Q_j \cdot x_{ij}) = 0 \quad (3)$$

Resolviendo la ecuación anterior para  $V_j$  se llega a:

$$V_j = \frac{V_i \pm \sqrt{V_i^2 - 4(P_j \cdot r_{ij} + Q_j \cdot x_{ij})}}{2} \quad (4)$$

La ecuación (4) genera dos posibles soluciones para la tensión de recibo  $V_j$ . La solución factible es la mínima solución de las dos posibles dado a que la magnitud del voltaje en el nodo de recibo debe ser menor que la magnitud de la tensión en el nodo de envío  $V_i$ . Por lo tanto,  $V_j$  puede ser calculado simplemente como:

$$V_j = \frac{V_i - \sqrt{V_i^2 - 4(P_j \cdot r_{ij} + Q_j \cdot x_{ij})}}{2} \quad (5)$$

Por otro lado, la magnitud del voltaje es siempre una cantidad real, por lo cual la siguiente relación debe ser satisfecha:

$$V_i^2 - 4(P_j \cdot r_{ij} + Q_j \cdot x_{ij}) \geq 0 \quad (6)$$

Usando la ecuación (6), es posible evaluar la cercanía al colapso de voltaje nodal mediante el VSI (7) para un barraje determinado.

$$VSI_j = V_i^2 - 4(P_j \cdot r_{ij} + Q_j \cdot x_{ij}) \quad (7)$$

Este índice debe ser evaluado en cada uno de los barrajes de la red y mientras mayor sea el valor de VSI, el sistema será más estable.

Además, es posible evaluar un índice general para el sistema haciendo uso de la misma formulación pero utilizando un sistema equivalente visto desde la subestación, tal como se ilustra en la figura 3.

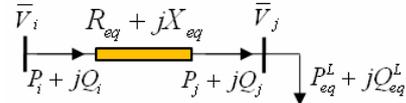


Figura 3. Equivalente de dos nodos para una un sistema de distribución radial.

Donde:

$$P_j = P_{eq}^L + P_{loss} \quad (8)$$

$$Q_j = Q_{eq}^L + Q_{loss} \quad (9)$$

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

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

De las anteriores ecuaciones,  $P_{eq}^L$  y  $Q_{eq}^L$  se refiere a la demanda total de potencia activa y reactiva del sistema respectivamente. Por su lado,  $P_{loss}$  y  $Q_{loss}$  se refiere a las pérdidas totales de potencia activa y reactiva en el sistema.

Con lo anterior, es posible formular un índice  $VSI_{eq}$  para el sistema, utilizando la ecuación (7).

$$VSI_{eq} = V_i^2 - 4(P_j \cdot R_{eq} + Q_j \cdot X_{eq}) \quad (12)$$

### 2.2 Índice de Cargabilidad Máxima MLI.

El índice  $MLI$  propuesto en [3] evalúa la cantidad de potencia adicional que se debe inyectar en determinado alimentador, como un factor de la demanda actual, para llevarlo a su punto de cargabilidad máxima.

Su deducción se realiza a través de la ecuación de flujo de potencia compleja, expresado como  $P_{ij} + jQ_{ij}$ , a través de un tramo de línea (figura 1), el cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_j - jQ_j = (V_j \angle \delta_j)^* \left( \frac{V_i \angle \delta_i - V_j \angle \delta_j}{r_{ij} + jx_{ij}} \right) \quad (13)$$

Llevando (13) a su forma cartesiana se tiene:

$$\begin{aligned} (P_{ij} r_{ij} + Q_{ij} x_{ij}) + j(P_{ij} x_{ij} - Q_{ij} r_{ij}) = \\ V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) + j V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j) - V_j^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Al igualar la parte imaginaria en ambos lados de la ecuación (14) se obtiene:

$$P_{ij} \cdot x_{ij} - Q_{ij} \cdot r_{ij} = V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (15)$$

Reemplazando (15) en (14) es posible llegar a:

$$V_j^2 = A \pm B \quad (16)$$

donde:

$$A = - \left[ P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right] \quad (17)$$

$$B = \sqrt{\left[ P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right]^2 - [r_{ij}^2 + x_{ij}^2][P_{ij}^2 + Q_{ij}^2]} \quad (18)$$

De (18), se observa que la solución del voltaje no existe cuando  $B^2$  es negativo, por lo tanto, la solución existe cuando:

$$\left[ P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right]^2 - [r_{ij}^2 + x_{ij}^2][P_{ij}^2 + Q_{ij}^2] \geq 0 \quad (19)$$

La máxima cargabilidad es alcanzada cuando  $(P_{ij} + jQ_{ij})$  es incrementado hasta el punto en el cual  $B^2$  se hace 0. Para determinar este punto se reemplaza el término  $(P_{ij} + jQ_{ij})$  por  $MLI \cdot (P_{ij} + jQ_{ij})$  asumiendo un factor de potencia constante. Al introducir el Índice de Cargabilidad Máximo (Maximum Loading Index MLI) en la ecuación (19), he igualando a cero para obtener el punto de máxima cargabilidad, se obtiene:

$$\left[ r_{ij} \cdot MLI \cdot P_{ij} + x_{ij} \cdot MLI \cdot Q_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right]^2 - [r_{ij}^2 + x_{ij}^2] \cdot MLI^2 \cdot [P_{ij}^2 + Q_{ij}^2] = 0 \quad (20)$$

Reescribiendo (20) como ecuación cuadrática para MLI y solucionándola se obtiene:

$$MLI_j = \frac{V_i^2 \left[ - (P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij}) + \sqrt{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)} \right]}{2(P_{ij} \cdot x_{ij} - Q_{ij} \cdot r_{ij})^2} \quad (21)$$

Mientras mayor sea este índice, más potencia puede alimentar el sistema. Para cuando el MLI se acerque a 1 el sistema se va volviendo crítico debido a la menor cantidad de potencia que puede alimentar. En el caso en que el MLI sea menor a 1, el sistema debe devolver potencia debido a la incapacidad de alimentar la potencia demandada (sistema inestable).

Utilizando los parámetros del sistema equivalente de dos nodos del sistema de distribución, se puede obtener un estimativo de la cantidad de potencia que puede alimentar el sistema sin caer en la inestabilidad de tensión. El valor de  $(MLI_{eq}-1) \cdot 100\%$ , calculado mediante el equivalente del sistema, indica la máxima cantidad de potencia en porcentaje, en términos de la demanda actual que el sistema puede alimentar.

## 2.3 Índice de Estabilidad de Tensión para Redes Radiales de Distribución

En [4], se presenta un índice de estabilidad de voltaje para identificar el nodo más sensible al colapso de voltaje en un sistema de distribución radial. El índice está basado en la potencia activa y reactiva transferida en una línea del sistema de distribución y su deducción se apoya en el diagrama presentado en la figura 1.

La ecuación cuadrática utilizada para calcular el voltaje en el nodo de recibo en un análisis de flujo de carga puede ser escrita en forma general como:

$$V_j^4 + 2V_j^2 (P_{ij} r_{ij} + Q_{ij} x_{ij}) - V_i^2 V_j^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) = 0 \quad (22)$$

De esta ecuación, la potencia activa y reactiva en el nodo de recibo puede ser escrita como:

$$P_{ij} = \left[ -\cos \varphi \cdot V_j^2 \pm \sqrt{\cos^2 \varphi \cdot V_j^4 - V_j^4 - Z_{ij}^2 \cdot Q_{ij}^2 - 2 \cdot V_j^2 \cdot Q_{ij} \cdot x_{ij} + V_i^2 V_j^2} \right] / |Z_{ij}| \quad (23)$$

$$Q_{ij} = \left[ -\sin \varphi \cdot V_j^2 \pm \sqrt{\sin^2 \varphi \cdot V_j^4 - V_j^4 - Z_{ij}^2 \cdot P_{ij}^2 - 2 \cdot V_j^2 \cdot P_{ij} \cdot r_{ij} + V_i^2 V_j^2} \right] / |Z_{ij}| \quad (24)$$

De las ecuaciones (23) y (24) se observa que el valor real de la potencia activa y reactiva en el nodo de recibo existe, siempre y cuando, se satisfagan las siguientes condiciones:

$$\cos^2 \varphi \cdot V_j^4 - V_j^4 - Z_{ij}^2 \cdot Q_{ij}^2 - 2 \cdot V_j^2 \cdot Q_{ij} \cdot x_{ij} + V_i^2 V_j^2 \geq 0 \quad (25)$$

$$\sin^2 \varphi \cdot V_j^4 - V_j^4 - Z_{ij}^2 \cdot P_{ij}^2 - 2 \cdot V_j^2 \cdot P_{ij} \cdot r_{ij} + V_i^2 V_j^2 \geq 0 \quad (26)$$

Sumando las ecuaciones (25) y (26) se obtiene:

$$2 \cdot V_i^2 V_j^2 - V_j^4 - 2 \cdot V_j^2 (P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij}) - Z_{ij}^2 (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \geq 0 \quad (27)$$

De la anterior ecuación, el valor decrece con el incremento de la potencia transferida por la línea, y esto puede ser usado como un indicador de la estabilidad de tensión:

$$SIr_j = 2 \cdot V_i^2 V_j^2 - V_j^4 - 2 \cdot V_j^2 (P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij}) - Z_{ij}^2 (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \quad (28)$$

## 2.4 Índice de Estabilidad de Voltaje para Redes Radiales de Distribución.

El índice propuesto en [5], denominado VSI (en este trabajo, y para no confundirlo con el descrito en la sección 2.1, se denominará VSI-2), se obtiene usando el circuito de la figura 2 y las siguientes relaciones:

$$P_i = \left[ R_{eq} (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 \right] + P_{eq}^L \quad (29)$$

$$Q_i = \left[ X_{eq} (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 \right] + Q_{eq}^L \quad (30)$$

Combinando (29) y (30) se obtiene:

$$X_{eq} (P_i + P_{eq}^L) = R_{eq} (Q_i + Q_{eq}^L) \quad (31)$$

Reemplazando (31) en (29) y (30) se obtiene:

$$AP_i^2 - BP_i + C = 0 \quad (32)$$

$$AQ_i^2 - DQ_i + E = 0 \quad (33)$$

donde:

$$A = R_{eq}^2 + X_{eq}^2 \quad (34)$$

$$B = 2X_{eq}^2 P_{eq}^L - 2R_{eq} X_{eq} Q_{eq}^{L2} + R_{eq} \quad (35)$$

$$C = X_{eq}^2 P_{eq}^{L2} + R_{eq}^2 Q_{eq}^{L2} + R_{eq} - 2R_{eq} X_{eq} P_{eq}^L Q_{eq}^L + R_{eq} P_{eq}^L \quad (36)$$

$$D = 2R_{eq}^2 Q_{eq}^L - 2R_{eq} X_{eq} P_{eq}^L + X_{eq} \quad (37)$$

$$E = X_{eq}^2 P_{eq}^{L2} + R_{eq}^2 Q_{eq}^{L2} - 2R_{eq} X_{eq} P_{eq}^L Q_{eq}^L + X_{eq} Q_{eq}^L \quad (38)$$

Resolviendo (32) y (33) se concluye que:

$$B^2 - 4AC \geq 0 \quad (39)$$

$$D^2 - 4AE \geq 0 \quad (40)$$

Simplificando las ecuaciones (39) y (40)

$$4 \left[ (X_{eq} P_{eq}^L - R_{eq} Q_{eq}^L)^2 + X_{eq} Q_{eq}^L + R_{eq} P_{eq}^L \right] \leq 1 \quad (41)$$

La ecuación (41) representa un indicador de estabilidad de tensión (VSI-2). Un punto de operación aceptable se obtiene cuando  $VSI-2 \leq 1$ . Por lo tanto, el indicador de estabilidad de voltaje se define como:

$$VSI-2 = 4 \left[ (X_{eq} P_{eq}^L - R_{eq} Q_{eq}^L)^2 + X_{eq} Q_{eq}^L + R_{eq} P_{eq}^L \right] \quad (42)$$

Entre menor sea el valor del índice  $VSI-2$ , mejor es el comportamiento del sistema o nodo analizado.

## 2.5 Índice de Estabilidad de Voltaje para Redes de Distribución Radial

En [6] se propone un índice de estabilidad de voltaje el cual determina el nodo más propenso a un evento de inestabilidad de voltaje. Su deducción se realiza usando el circuito de la figura 1 y las siguientes relaciones:

$$\bar{I}_{ij} = \frac{\bar{V}_i - \bar{V}_j}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (43)$$

$$P_{ij} - jQ_{ij} = \bar{V}_j \bar{I}_{ij} \quad (44)$$

De (43) y (44) se obtiene que:

$$V_j^4 - [V_i^2 - 2P_{ij}r_{ij} - 2Q_{ij}x_{ij}]V_j^2 + [P_{ij}^2 + Q_{ij}^2][r_{ij}^2 + x_{ij}^2] = 0 \quad (45)$$

Haciendo

$$b_{ij} = [V_i^2 - 2P_{ij}r_{ij} - 2Q_{ij}x_{ij}] \quad (46)$$

$$c_{ij} = [P_{ij}^2 + Q_{ij}^2][r_{ij}^2 + x_{ij}^2] \quad (47)$$

De (45), (46) y (47) se obtiene:

$$V_j^4 - b_{ij}V_j^2 + c_{ij} = 0 \quad (48)$$

De la ecuación (48) se puede observar que el voltaje en el nodo de recibo tiene cuatro posibles soluciones:

$$0.707 \left[ b_{ij} - \{b_{ij}^2 - 4 \cdot c_{ij}\}^{1/2} \right]^{1/2} \quad (49)$$

$$-0.707 \left[ b_{ij} - \{b_{ij}^2 - 4 \cdot c_{ij}\}^{1/2} \right]^{1/2} \quad (50)$$

$$-0.707 \left[ b_{ij} + \{b_{ij}^2 - 4 \cdot c_{ij}\}^{1/2} \right]^{1/2} \quad (51)$$

$$0.707 \left[ b_{ij} + \{b_{ij}^2 - 4 \cdot c_{ij}\}^{1/2} \right]^{1/2} \quad (52)$$

De las cuatro soluciones, solamente la cuarta es positiva y factible, con lo cual, la solución de la ecuación (48) es:

$$V_j = 0.707 \left[ b_{ij} + \{b_{ij}^2 - 4 \cdot c_{ij}\}^{1/2} \right]^{1/2} \quad (53)$$

La ecuación (53) es válida si se asegura que:

$$b_{ij}^2 - 4 \cdot c_{ij} \geq 0 \quad (54)$$

De (46), (47) y (54) se tiene:

$$\left[ V_i^2 - 2P_{ij}r_{ij} - 2Q_{ij}x_{ij} \right]^2 - 4 \cdot [P_{ij}^2 + Q_{ij}^2] \cdot [r_{ij}^2 + x_{ij}^2] \geq 0 \quad (55)$$

Así, es posible definir el índice en forma simplificada como:

$$SI_j = V_i^4 - 4(P_{ij}x_{ij} - Q_{ij}r_{ij})^2 - 4 \cdot V_i^2 (P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) \quad (56)$$

Para operación estable, el índice debe ser mayor que cero para todos los nodos. Entre mayor sea el valor del índice, mayor es el nivel de estabilidad del sistema de distribución.

## 3. RECONFIGURACIÓN DE ALIMENTADORES PRIMARIOS

Los sistemas de distribución cuentan con interruptores y suplencias a lo largo de los alimentadores primarios que permiten modificar la topología del sistema para lograr un mejor punto de operación de acuerdo a un criterio seleccionado (pérdidas, precios de la energía, confiabilidad, etc.) y considerando variables tales como:

- Niveles de tensión adecuados.
- Pérdidas mínimas.
- Capacidad de líneas y subestaciones.
- Radialidad del sistema.
- Abastecimiento de la demanda.
- Confiabilidad del suministro.

Estos cambios pueden ser realizados en tiempo real o bajo un horizonte de planeamiento de acuerdo al grado de sistematización. Las variables o restricciones consideradas hacen que el problema de la reconfiguración sea especialmente complejo por cuanto, normalmente, es

necesario recurrir a técnicas heurísticas y metaheurísticas para su solución.

Dado que se quiere analizar el efecto de la reconfiguración sobre la estabilidad de voltaje en el sistema de distribución, se utilizarán topologías propuestas en otros trabajos [2,6].

#### 4. CASOS DE PRUEBA Y RESULTADOS

Para evaluar el impacto de la reconfiguración sobre la estabilidad de tensión en los sistemas de distribución, se considerará el sistema de prueba IEEE-33 (Figura 1) [1]. Con el fin de analizar diferentes topologías del sistema, se considerarán las reconfiguraciones planteadas en [1] cuyo objetivo fue la maximización de la cargabilidad y las planteadas en [6] para minimización de las pérdidas del sistema y el mejoramiento en los perfiles de tensión. La topología del sistema se muestra en la figura 3 y los datos de líneas y de demanda se presentan en la tabla 1.

Línea	Nodo envío	Nodo recibo	R <sub>ij</sub> Ω	X <sub>lij</sub> Ω	Demanda Nodo de recibo	
					P (kW)	Q (kVar)
1	1	2	0.0922	0.0477	100.0	
2	2	3	0.4930	0.2511	90.0	40.0
3	3	4	0.3660	0.1864	120.0	80.0
4	4	5	0.3811	0.1941	60.0	30.0
5	5	6	0.8190	0.7070	60.0	20.0
6	6	7	0.1872	0.6188	200.0	100.0
7	7	8	1.7114	1.2351	200.0	1000.0
8	8	9	1.0300	0.7400	60.0	20.0
9	9	10	1.0400	0.7400	60.0	20.0
10	10	11	0.1466	0.0650	45.0	30.0
11	11	12	0.3744	0.1238	60.0	35.0
12	12	13	1.4680	1.1550	60.0	35.0
13	13	14	0.5416	0.7129	120.0	80.0
14	14	15	0.5910	0.5260	60.0	10.0
15	15	16	0.7463	0.5450	60.0	20.0
16	16	17	1.2890	1.7210	60.0	40.0
17	17	18	0.7320	0.5740	90.0	40.0
18	2	19	0.1640	0.1565	90.0	40.0
19	19	20	1.5042	1.3554	90.0	40.0
20	20	21	0.4095	0.4784	90.0	40.0
21	21	22	0.7089	0.9373	90.0	40.0
22	3	23	0.4512	0.3083	90.0	50.0
23	23	24	0.8980	0.7091	420.0	200.0
24	24	25	0.8960	0.7011	420.0	2000.0
25	6	26	0.2030	0.1034	60.0	25.0
26	26	27	0.2842	0.1447	60.0	25.0
27	27	28	1.0590	0.9337	60.0	20.0
28	28	29	0.8042	0.7006	120.0	70.0
29	29	30	0.5075	0.2585	200.0	600.0
30	30	31	0.9744	0.9630	150.0	70.0
31	31	32	0.3105	0.3619	210.0	100.0
32	32	33	0.3410	0.5302	60.0	40.0
33	21	8	0.0000	2.0000	---	---
34	9	15	0.0000	2.0000	---	---
35	12	22	0.0000	2.0000	---	---
36	18	33	0.0000	0.5000	---	---
37	25	29	0.0000	0.5000	---	---

Tabla 1. Datos del sistema de prueba IEEE-33

Topologías	Líneas Abiertas	Pérdidas del Sistema (KW)
Topología 0	33-34-35-36-37	210.7380
Topología 1	6-9-14-32-37	128.1022
Topología 2	7-9-14-31-37	123.0261

Topología 3	9-14-28-32-33	139.1590
-------------	---------------	----------

Tabla 2. Topologías del sistema y pérdidas totales.

Topologías	VSI	Slr	SI
Topología 0	13-15-16-17-18	14-1516-17-18	13-15-16-17-18
Topología 1	13-16-17-18-20	16-17-29-30-33	28-29-30-31-32
Topología 2	29-30-31-32-33	29-30-31-32-33	29-30-31-32-33
Topología 3	28-29-30-31-32	29-30-31-32-33	29-30-31-32-33

Tabla 3. Nodos críticos de cada topología.

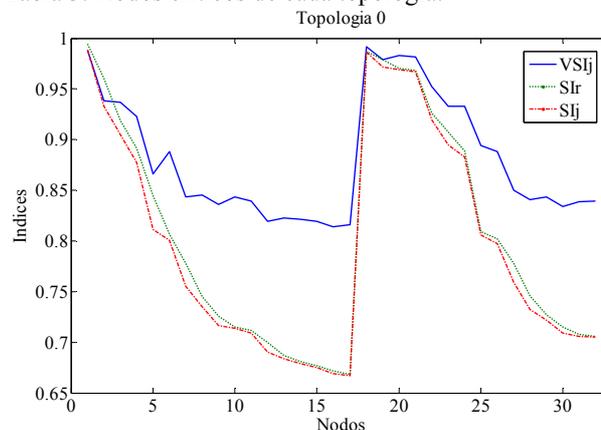


Figura 4. Comportamiento de los índices VSI, Slr, SI, Topología 0.

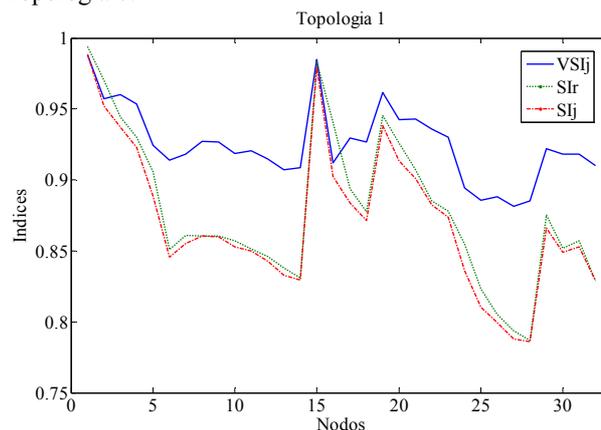


Figura 5. Comportamiento de los índices VSI, Slr, SI, Topología 1.

Topologías	VSIeq	MLIeq	VSI-2
Topología 0	0.7920	4.8053	0.2080
Topología 1	0.8589	7.0487	0.1412
Topología 2	0.8619	7.1858	0.1383
Topología 3	0.8537	6.8248	0.1463

Tabla 4. Índices de sistema

Nótese que los índices nodales, presentan un comportamiento relacionado con la caída de tensión del sistema, es decir, a medida que los nodos se alejan de la subestación, los índices nodales disminuyen.

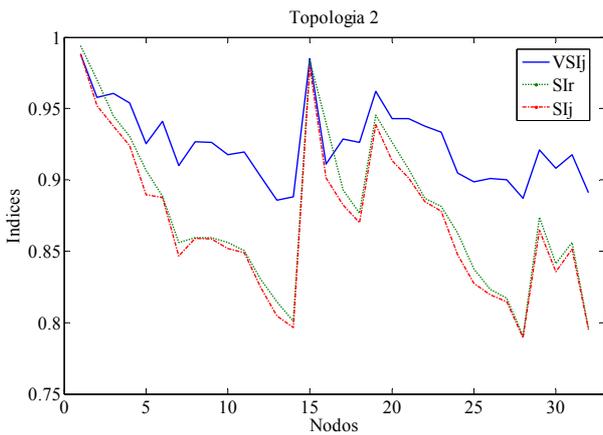


Figura 6. Comportamiento de los índices VSI, SIr, SI, Topología 2.

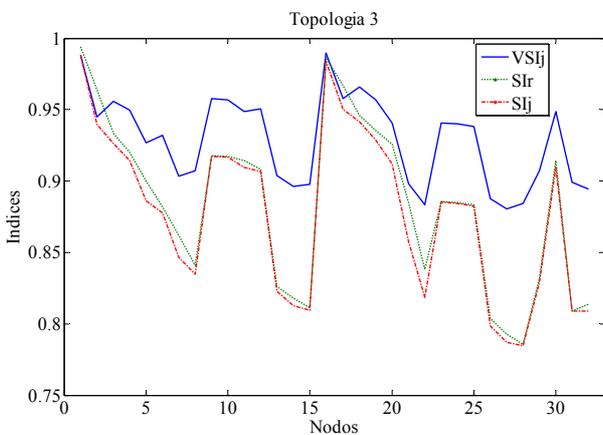


Figura 7. Comportamiento de los índices VSI, SIr, SI, Topología 3.

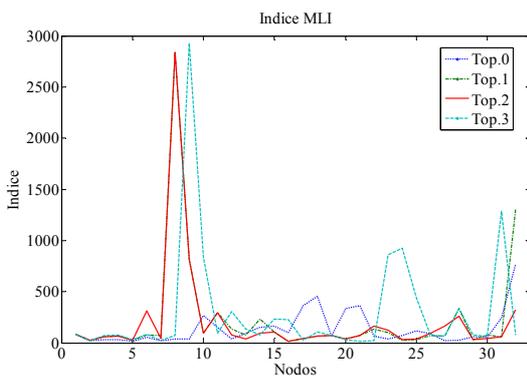


Figura 6. Comportamiento del índice MLI en los nodos.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La minimización de las pérdidas del sistema está directamente relacionada con el incremento de la cargabilidad del sistema y por lo tanto del mejoramiento de la estabilidad de voltaje del sistema. Quiere esto decir, que el criterio de minimización de pérdidas que ha sido

tradicionalmente aplicado en el análisis de reconfiguración lleva implícitamente a la mejora de la estabilidad de voltaje

Sin embargo, al incorporar explícitamente el análisis de estabilidad de voltaje dentro de la reconfiguración se pueden identificar soluciones alternas que sin ser óptimas ofrecen buena cargabilidad y estabilidad. Así, se recomienda incorporar el criterio de estabilidad de voltaje dentro del análisis de reconfiguración puesto que no siempre la alternativa óptima matemáticamente es la que mejor cumple otros criterios de factibilidad para su implementación física.

Respecto a los índices de estabilidad del sistema, el MLIeq brinda mayor selectividad de las topologías ya que diferencia mejor las topologías 1 y 3 las cuales tienen valores bastantes diferentes de pérdidas. Lo anterior permite que este índice pueda ser incluido en procesos de optimización.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. H. Yin S. Civalar, J.J Grainger and S.S H. Lee. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction". IEEE Trans. Power Delivery 3(3): 1217-1223. Jul 1988.
- [2]. 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.
- [3]. Venkatesh, B., Ranjan, R., Gooi, H.B. "Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19 No. 1, pp. 260-266, 2004.
- [4]. Eminoglu, U., Hocaoglu, M. H. "A voltage stability index for radial distribution networks," Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International, pp. 408-413, 4-6 Sept. 2007.
- [5]. H. P. Schmidt, A.M.G.Cabezas, N. Kagan, M.R. Gouvêa, P. Agozzini. "Reconfiguración de sistemas de distribución utilizando el Método de Newton en formulaciones cuadráticas". IEEE Latin America Transactions, Vol. 6, No. 2, June 2008.
- [6]. M. Chakravorty, D. Das. "Voltage stability analysis of radial distribution networks". International Journal of Electric and Power Energy System. No. 23, pp. 129-135. 2001.