

Distribution System Operation and Expansion Planning Using Network Reconfiguration

I. Benitez, E. Chaparro, *Member, IEEE*, and B. Barán, *Senior Member, IEEE*

Abstract—This paper presents an algorithm for network reconfiguration which could help in the operation and expansion planning of three-phase distribution systems. Considering the fact that power losses lead to decrease utility benefits, and the three-phase unbalanced voltage can damage electrical machines, the proposed algorithm is presented as a multi-objective optimization problem based on Evolutionary Algorithms where the power losses and three-phase unbalanced voltage are simultaneously minimized. In order to validate the efficiency of the proposed reconfiguration algorithm, a large-scale radial electric distribution system, under maximum load conditions, is considered for operation planning. In addition, different scenarios are compared to test the algorithm as an expansion planning tool. The proposed algorithm maximizes the utility profits and improves system performance reducing power loss and unbalanced voltage.

Index Terms—Expansion, Operation, Planning, Distribution system, Reconfiguration, Three-phase unbalanced voltage, Losses.

I. INTRODUCCIÓN

EL consumo de energía en los sistemas eléctricos está en constante aumento. Esto hace difícil la distribución uniforme de las cargas en las tres fases de los Sistemas Eléctricos de Distribución (SED) de topología radial. Frecuentemente, se conectan cargas monofásicas a lo largo de alimentadores trifásicos, lo que produce un Desequilibrio de Voltaje (DDV) en el sistema. Asimismo, la impedancia asimétrica de líneas de distribución, causada por mala transposición, es algo que incrementa el DDV [1]. El DDV de un sistema eléctrico es la condición en la cual las tres fases presentan diferencias en el valor del módulo de tensión y/o presentan un desfase (desvío angular), diferente a 120° . Según [2], el DDV puede causar efectos adversos a equipos y al sistema eléctrico, lo que se intensifica por el hecho de que un pequeño desequilibrio de voltaje puede causar un desequilibrio desproporcionadamente mayor en las corrientes de fase. En [3], se concluye que el DDV afecta a motores de inducción, causando calentamiento excesivo, pérdidas, ruido y vibraciones.

El DDV es un inconveniente que debe ser corregido para lograr el correcto funcionamiento de los SED. La solución de este inconveniente va tomando mayor importancia con las nuevas tendencias en los SED, que actualmente están experimentando la inserción de energía solar fotovoltaica en

conexiones domiciliarias que provocan efectos adversos, causando DDV, como se puede apreciar en [4]. La mitigación de los inconvenientes generados por la energía solar fotovoltaica es un tema recurrente en investigaciones actuales, como se observa en [5] y [6], donde se proponen controladores para regular la cantidad de corriente inyectada a la red por los paneles fotovoltaicos.

Conforme fuera mencionado anteriormente, la inserción de energía solar fotovoltaica no es la única responsable de la aparición de DDV en los sistemas de distribución, por tal motivo, las publicaciones científicas han encarado la corrección del DDV de distintas maneras; en [7] se realiza la Reconfiguración de Sistemas de Distribución (RSD) para la optimización de sistemas considerando el DDV como una restricción. Esto limita la percepción de los inconvenientes de desequilibrio que podría estar atravesando el sistema debido a que soluciones óptimas podrían estar muy cerca de infringir los límites de desequilibrio. Esta situación pasaría desapercibida teniendo en cuenta que las soluciones óptimas no ofrecen datos de DDV, cuando el DDV es considerado meramente como restricción.

Por otro lado, en [8], un controlador dinámico inteligente de intercambio de fases es propuesto para la minimización del DDV; el controlador realiza el intercambio de carga entre fases de cada uno de los nodos del sistema de forma dinámica. Sin embargo, para realizar el intercambio de fases de forma dinámica en todo el sistema, es necesario disponer de equipos y automatización no disponibles en la mayoría de los SED.

En [9], se plantea una metodología de transferencia de carga entre fases buscando disminuir la cantidad de maniobras. Aunque el número de maniobras se reduce, todavía se requieren equipos para realizar el intercambio de fases; de otra forma, se necesitarían de cuadrillas de técnicos que constantemente realicen dicho intercambio. Por lo tanto, este método sería de difícil aplicación en la planificación a corto plazo de la operación de SED sin modernos equipos intercambiadores de fases.

En el presente trabajo, se propone una solución alternativa para mejorar los niveles de DDV en SED trifásicos de forma sencilla, considerando la operación del sistema a corto plazo, sin la necesidad de costosas tecnologías adicionales. Se plantea utilizar únicamente equipos de maniobras frecuentemente disponibles, permitiendo la operación de SED de forma económica. Para ello, se propone utilizar una metodología ampliamente conocida en la minimización de pérdidas de SED, pero aún no explorada en la mejora de los niveles de DDV. La idea es optimizar el índice de desequilibrio trifásico de voltaje a través de la RSD, primeramente planteando el

I. Benitez, PTI, Parque Tecnológico Itaipú, Hernandarias, Paraguay. E-mail: ivo.benitez@pti.org.py, ivobenitezcattani@gmail.com.

E. Chaparro, Itaipú Binacional, Hernandarias; Facultad Politécnica de la UNE, Ciudad del Este, Paraguay. E-mail: enriquerchv@fpune.edu.py, cver@itaipu.gov.py.

B. Barán, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay. E-mail: bbaran@pol.una.py.

problema para la planificación de operación del sistema, y luego, encarándolo como un problema de planificación de expansión del sistema. Además del DDV, la RSD propuesta también mejora la eficiencia de SED trifásicos, disminuyendo las pérdidas; por lo tanto, se presenta una optimización multi-objetivo.

Teniendo en cuenta que este trabajo busca crear una herramienta de operación de SED, la reducción de pérdidas de potencia fue elegida como la segunda función objetivo, considerando que este es un problema relevante para los operadores de sistemas de distribución [10]. El mayor porcentaje de pérdida de potencia activa, en un sistema eléctrico, proviene del sector de distribución de energía eléctrica. En América Latina y el Caribe, aproximadamente el 17% de la energía producida se pierde en la transmisión y distribución. Es decir, en la región de América Latina y el Caribe se tiene una de las tasas más elevadas de pérdidas eléctricas de todo el mundo [11].

La RSD consiste en la mudanza del estado de interruptores normalmente cerrados, a un estado de operación abierto, y viceversa, produciendo una nueva topología del sistema. El problema de reconfiguración de SED de topología radial se puede clasificar como un problema de optimización combinatoria, cuyo objetivo es encontrar una estructura de operación radial que optimice las funciones objetivos al mismo tiempo que se satisfacen las restricciones operativas [12].

Desde el primer trabajo de investigación de RSD publicado por Merlin y Back [13], la RSD ha sido perfeccionada y aplicada a distintas funciones objetivo a lo largo de los años, como se puede apreciar en [14], donde se presenta una investigación del estado del arte de distintas técnicas de reconfiguración de sistemas de distribución.

La literatura científica sigue proponiendo trabajos que ofrecen diferentes métodos para la RSD, como en [15], donde se propone un algoritmo luciérnaga (*firefly algorithm*) para la RSD, o en [16], donde se realiza la RSD implementando una nueva versión del método de optimización por enjambre de partículas conjuntamente con el *software* OpenDSS.

El desarrollo de la técnica de RSD propuesta en este trabajo requiere utilizar algún algoritmo multi-objetivo para optimizar las referidas funciones objetivo. Debido a la aplicación exitosa del algoritmo NSGA-II en diferentes problemas multi-objetivo de la ingeniería [17], se utilizará dicho algoritmo para el desarrollo de una metodología de RSD.

Antes de desarrollar el algoritmo de RSD, se resume el algoritmo de flujo de potencia trifásico a ser utilizado en el cálculo de los parámetros eléctricos necesarios para llevar a cabo la RSD, también se describen los componentes eléctricos de SED. Además, se tiene en consideración que los SED generalmente son diseñados para el funcionamiento en forma radial, de modo a facilitar la coordinación de las protecciones [18]. El requisito de radialidad del sistema es un factor que incrementa la dificultad en la solución del problema de reconfiguración.

Con la ejecución del algoritmo de RSD propuesto, el operador del sistema obtendrá diferentes configuraciones que permiten planificar la operación del sistema a corto y mediano plazo. Por otro lado, si consideramos que las cargas están en

constante aumento, se puede afirmar que las configuraciones óptimas en el presente, difícilmente seguirán siendo óptimas a largo plazo.

Por lo tanto, además de utilizar la RSD en la planificación de operación de sistemas, se propone como segunda contribución del trabajo, utilizar el algoritmo de RSD para la planificación de la expansión de SED de topología radial mediante el análisis de las diferencias económicas entre proyectos de expansión de SED, de modo a definir cuál de los proyectos resulta más beneficioso en un determinado periodo de tiempo. Como criterio de evaluación se utilizará el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), un método sencillo y efectivo para la evaluación de proyectos de inversión considerando que el VAN de un proyecto es el criterio económico básico que normalmente utilizan entidades financieras para aceptar o rechazar una propuesta de inversión determinada [19].

II. FLUJO DE POTENCIA TRIFÁSICO

El principal inconveniente en el estudio de flujo de potencia es que a lo largo de los años, la gran mayoría de los trabajos de investigación se han limitado al modelado y análisis de sistemas trifásicos equilibrados, requiriendo solamente la representación de una única fase para el cálculo del flujo de potencia. Aunque esto funciona bien para sistemas de transmisión, puede resultar inadecuado para sistemas de distribución debido a la presencia de cargas desbalanceadas, a la radialidad de la red y al hecho de que la resistencia de las líneas puede ser comparable en magnitud con la reactancia de las líneas [20].

En estudios de flujo de potencia para sistemas de distribución, se puede destacar el algoritmo del método de barrido iterativo de suma de corrientes (*backward/forward sweep*) presentado en [21], el cual aprovecha la naturaleza radial de los sistemas de distribución y no sufre inconvenientes con las características particulares de estos sistemas, tales como, líneas sin transposición, cargas de distinta naturaleza, múltiples conexiones y alto valor de R/X de las líneas de distribución. Además, el algoritmo (*backward/forward sweep*) tiene excelente rendimiento computacional para sistemas radiales y es de fácil implementación para sistemas con 4 conductores (tres fases y un neutro). Dicho algoritmo es implementado en este trabajo. Detalles del algoritmo se encuentran en [22].

Para la implementación del flujo de potencia trifásico, se debe realizar el modelado de cada componente del sistema, en el cual se tienen dos grupos diferentes de componentes: (I) Serie (componentes o equipamientos conectados entre dos barras), y (II) *Shunt* (componentes conectados a una única barra y a tierra). A continuación se desarrollan los modelos para cada uno de estos componentes.

A. Componentes Serie

Las componentes serie de los sistemas de distribución son transformadores, líneas de distribución, interruptores y reguladores de voltaje. Las ecuaciones (1), (2) y (3) definen los voltajes y corrientes de entrada (*nodo n*) y salida (*nodo m*) [22].

$$[V_{abc}]_n = [a] \cdot [V_{abc}]_m + [b] \cdot [I_{abc}]_m \quad (1)$$

$$[I_{abc}]_n = [c] \cdot [V_{abc}]_m + [d] \cdot [I_{abc}]_m \quad (2)$$

$$[V_{abc}]_m = [A] \cdot [V_{abc}]_n - [B] \cdot [I_{abc}]_m \quad (3)$$

Las matrices $[a]$, $[b]$, $[c]$, $[d]$, $[A]$ y $[B]$ son matrices características de cada componente serie, conectado entre los nodos (n) y (m). Para los diferentes tipos de componentes serie del sistema, se deben calcular las matrices mencionadas, como se explica en [22].

B. Componentes Shunt

Las componentes *Shunt* son modeladas conforme sea su tipo de conexión: estrella (Y) o delta (Δ). Estas componentes se dividen en dos categorías: cargas puntuales y cargas distribuidas. A continuación se describen los distintos tipos de componentes *Shunt*.

1) *Carga puntual*: Es la carga conectada a una barra específica del sistema, este tipo de carga puede tener distintas características. A continuación se detallan los tipos de cargas puntuales según lo especificado en [22].

Cargas de potencia constante: Es el tipo de carga más común en el sistema de distribución, y representa un consumo de potencia activa y reactiva constante mientras el voltaje varía. La corriente para cargas de potencia constante se calcula mediante la ecuación (4).

$$I_i = \left(\frac{S_i}{V_i} \right)^* = \frac{|S_i|}{|V_i|} \angle (\delta_i - \theta_i) \quad (4)$$

Cargas de impedancia constante: En este tipo de carga el valor de la impedancia Z_i de la ecuación (5) se mantiene constante; sin embargo, el consumo de corriente es variable debido a que las variaciones del voltaje afectan de manera directa el consumo de corriente.

$$Z_i = \frac{|V_i|^2}{S_i^*} = \frac{|V_i|^2}{|S_i|} \angle \theta_i \quad (5)$$

La corriente en función de la impedancia constante es:

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} = \frac{|V_i|}{|Z_i|} \angle (\delta_i - \theta_i) \quad (6)$$

Cargas de corriente constante: En este tipo de carga el consumo de corriente se calcula mediante la ecuación (4) y luego se mantiene constante, mientras el ángulo de la tensión δ_i varía, como se puede ver en la ecuación (7), resultando en un cambio de ángulo de la corriente.

$$I_i = |I_i| \angle (\delta_i - \theta_i) \quad (7)$$

Cargas combinadas: Las cargas combinadas son cualquier tipo de combinación de las cargas descritas anteriormente, y son modeladas asignando el respectivo porcentaje a cada uno de los modelos. La corriente total de la carga es la suma de las corrientes luego de aplicar el porcentaje a la corriente obtenida de cada modelo.

Modelo de banco de capacitores: Los bancos de capacitores son modelados como un caso especial de carga con impedancia constante. La susceptancia constante de cada unidad de capacitor se calcula mediante la ecuación (8), mientras que las corrientes que pasan por cada banco de capacitores son calculadas por la ecuación (9).

$$B_i = \frac{Q_i}{|V_i|^2} \quad (8)$$

$$I_i = jB_i \cdot V_i \quad (9)$$

Modelo de generación distribuida: Conforme [23], existen dos formas diferentes de modelar generadores distribuidos, que son los modelos de unidades generadoras tipo PQ y modelos tipo PV. No obstante, este trabajo se limitará al modelado de unidades generadoras tipo PQ considerando los estudios realizados en [24], que dicen que los cogeneradores síncronos no son controlados para mantener la tensión constante, pero sí para mantener la potencia y el factor de potencia constantes. Por lo tanto, los generadores pueden considerarse como dispositivos tipo PQ dentro del sistema. Para obtener el modelado basta con cambiar el signo de la ecuación (4).

2) *Cargas distribuidas*: Son cargas distribuidas uniformemente a lo largo de las líneas de distribución como se muestra en la Fig. 1.

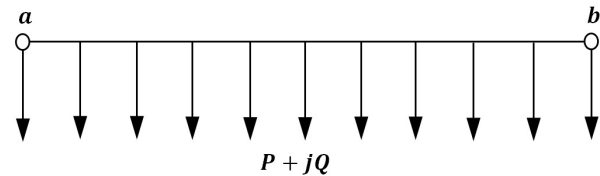


Fig. 1. Carga distribuida uniformemente a lo largo de una línea.

Para modelar este tipo de carga se debe dividir la cantidad total de carga distribuida a lo largo de la línea por la mitad, y ubicar cada mitad en los terminales de la línea en cuestión, una mitad en el punto a y la otra en el punto b . De esta manera las cargas distribuidas pueden ser tratadas como cargas puntuales [25].

III. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El problema de reconfiguración fue planteado como un problema de optimización multi-objetivo, en donde se busca simultáneamente minimizar dos funciones objetivos, (I) el índice de desequilibrio trifásico de voltaje (f_1) y (II) la pérdida total de potencia activa (f_2).

A. Funciones Objetivo

1) *Desequilibrio de Voltaje (DDV)*: Entre las alternativas existentes para el cálculo de DDV [26]-[27], fue adoptado el índice VUF. Dicho índice se calcula mediante la relación del voltaje de secuencia negativa y el voltaje de secuencia positiva, como se muestra en la ecuación (10).

$$f_1 = VUF_{max} = Max \left\{ 100 \cdot \frac{V_2}{V_1} \right\} \quad (10)$$

donde V_2 = Voltaje de secuencia negativa, V_1 = Voltaje de secuencia positiva, y VUF_{max} = Es el índice de la barra con mayor desequilibrio trifásico de voltaje del sistema.

Según [28], la mayoría de las normas establecen el valor límite de 2% para el DDV en sistemas de distribución.

2) *Pérdidas de Potencia Activa*: Se calcula para cada una de las fases y para cada ramificación de los sistemas de distribución a ser estudiados, como se muestra en la ecuación (11).

$$f_2 = P_{total} = \sum_{i=1}^{nr} R_i \cdot |I_i|^2 \quad (11)$$

donde P_{total} = Es la pérdida de potencia activa total del sistema, nr = Número de ramificaciones del sistema, R_i = Resistencia de la ramificación i e I_i = Corriente de la ramificación i .

B. Restricciones

Restricción de voltaje (para voltaje nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV, según [27]):

$$0,93 \text{ p.u.} \leq V_i \text{ (p.u.)} \leq 1,05 \text{ p.u.}, \quad i \in (1, 2, \dots, n_b) \quad (12)$$

donde V_i = Valor del voltaje de la barra i y n_b = número de barras del sistema.

Restricción de corriente:

$$I_j \leq I_{j,max}, \quad j \in (1, 2, \dots, n_r) \quad (13)$$

donde I_j = Valor de la corriente de la rama j , $I_{j,max}$ = Máxima corriente admisible de la rama j y n_r = Número de ramas del sistema.

Restricción de topología del sistema: La red debe ser de topología radial, o sea, no pueden existir mallas en el sistema. Además, todas las barras del sistema deben estar energizadas. Así mismo, cada barra debe estar energizada solamente desde una subestación alimentadora.

C. Corrección de Configuraciones No-Factibles

Se propone adaptar la técnica del *Árbol Abarcador Mínimo* para la corrección de configuraciones que no cumplan con la restricción de topología del sistema. El algoritmo de *Prim* usando *Pairing Heaps* es el método elegido debido a que es el algoritmo más eficiente para la solución del problema del *Árbol Abarcador Mínimo* según [29]. La técnica del *Árbol Abarcador Mínimo* se basa en una teoría de *Grafos* que determina el esquema de la ruta que pasa a través de un conjunto de vértices, estableciendo las conexiones más cortas entre vértices vecinos [30].

D. Análisis de Costo-Beneficio

Para la evaluación de múltiples proyectos de expansión se debe calcular el VAN de cada proyecto, mediante la ecuación (14), y luego se selecciona el que tenga mejor resultado.

$$VAN = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{(1+i)^n} - A_0 \quad (14)$$

donde A_n = Flujo de efectivo al final del período n , i = Tasa de descuento, N = Vida útil del proyecto y A_0 = Inversión inicial.

La tasa de descuento se considera igual a 12%, teniendo en consideración lo manifestado en [19], que menciona que

entidades financieras utilizan un rango de 10 a 12% para evaluar la financiación de proyectos.

Para determinar el flujo de efectivo de cada periodo (1 año), se calculará la diferencia del costo de la energía perdida entre diferentes configuraciones del sistema funcionando en diferentes escenarios planteados, y se estimará que la demanda diaria varía de la misma manera que el perfil de consumo de energía que se muestra en la Fig. 2, y que todos los días del año tienen el mismo perfil de consumo. La variación de la demanda diaria fue obtenida de [31].

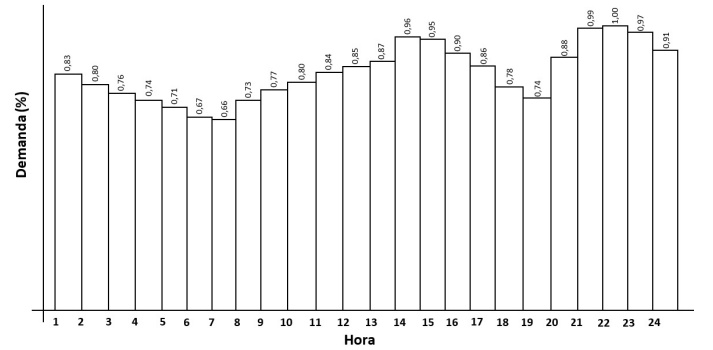


Fig. 2. Curva de perfil de demanda en porcentaje.

Realizando el estudio de flujo de potencia para las 24 horas del día de cada configuración, se podrá conocer la diferencia de energía perdida entre las dos configuraciones del sistema mediante la ecuación (15), esto equivale al flujo de efectivo al final del período.

$$A_n = \left| 365 \cdot \sum_{i=1}^{24} (P_a - P_b) \right| \cdot Costo \quad (15)$$

donde P_a y P_b = Pérdida de potencia activa de la configuración a y b respectivamente, en la hora i (MW) y $Costo$ = Precio de energía (US\$/MWh).

El precio de la energía se considera igual a 59,8 (US\$/MWh), valor obtenido de [32].

IV. MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO

Para la reconfiguración de SED se utiliza el algoritmo NSGA-II [33], optimizando simultáneamente las funciones objetivos descritas en las expresiones (10) y (11). El NSGA-II corresponde a un algoritmo evolutivo (como un Algoritmo Genético) adaptado para optimización multi-objetivo basado en las reglas de optimalidad y dominancia de Pareto [17]. Con esta metodología de optimización se obtiene una familia de soluciones óptimas al final de la ejecución del algoritmo.

El proceso de aplicación del algoritmo NSGA-II en la RSD se resume en el diagrama de flujo de la Fig. 3 y se detalla a continuación.

Codificación del problema: Se plantea una codificación binaria, donde los cromosomas (vectores que definen la solución propuesta) tendrán longitud fija igual a la cantidad de interruptores de maniobras del sistema, los valores binarios indican el estado de cada interruptor, el número “1” significa que el interruptor está cerrado y el número “0” significa que el interruptor está abierto.

Población inicial: Se propone una población (conjunto de configuraciones del sistema) inicial totalmente aleatoria de tamaño fijo, luego se realiza la verificación de la factibilidad de todos los individuos (configuraciones del sistema) y se corrige los individuos que resulten no-factibles.

Evaluación de aptitud (Fitness): Para cada individuo se debe ejecutar el programa de flujo de potencia trifásico para determinar el *Fitness* [17] de cada individuo.

Selección: La selección será hecha mediante el método de *Torneo Estocástico Binario*; este procedimiento se efectúa a través de la comparación de dos individuos elegidos aleatoriamente de la población y estableciendo un ganador del torneo.

Cruzamiento: El método de Cruzamiento implementado será el Cruzamiento de un solo punto de corte.

Mutación: Se propone elegir aleatoriamente un individuo por generación luego del Cruzamiento. Este operador realizará la apertura aleatoria de un interruptor de maniobra y luego efectuará el cierre aleatorio de otro interruptor.

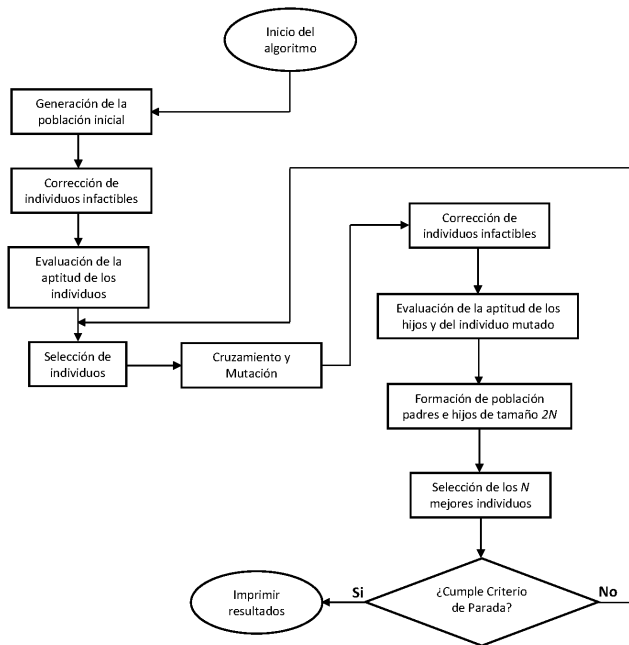


Fig. 3. Diagrama de Flujo del NSGA-II para reconfiguración de SED radial.

V. CASO DE ESTUDIO

Para los estudios presentados a continuación se utilizó el sistema de gran porte publicado en [34]. El sistema en cuestión se muestra en la Fig. 4, donde se puede apreciar el diagrama unifilar y los equipamientos. Este sistema cuenta con características similares a los sistemas reales, por lo que se podrá evaluar el tiempo que llevaría el método en alcanzar una respuesta razonable, considerando los dos objetivos de optimización ya presentados.

A. Planificación de Operación de SED

El algoritmo de RSD fue desarrollado en Matlab e implementado en una PC de 2.4 GHz con 8 GB de RAM. Dicho algoritmo ha sido aplicado al sistema de gran porte de la Fig.

4 y se han obtenido los resultados que constituyen el Frente Pareto Óptimo (ver TABLA I). El tiempo de computación fue de 14h 40min 16s, utilizando una población de 30 individuos y criterio de parada igual a 100 iteraciones.

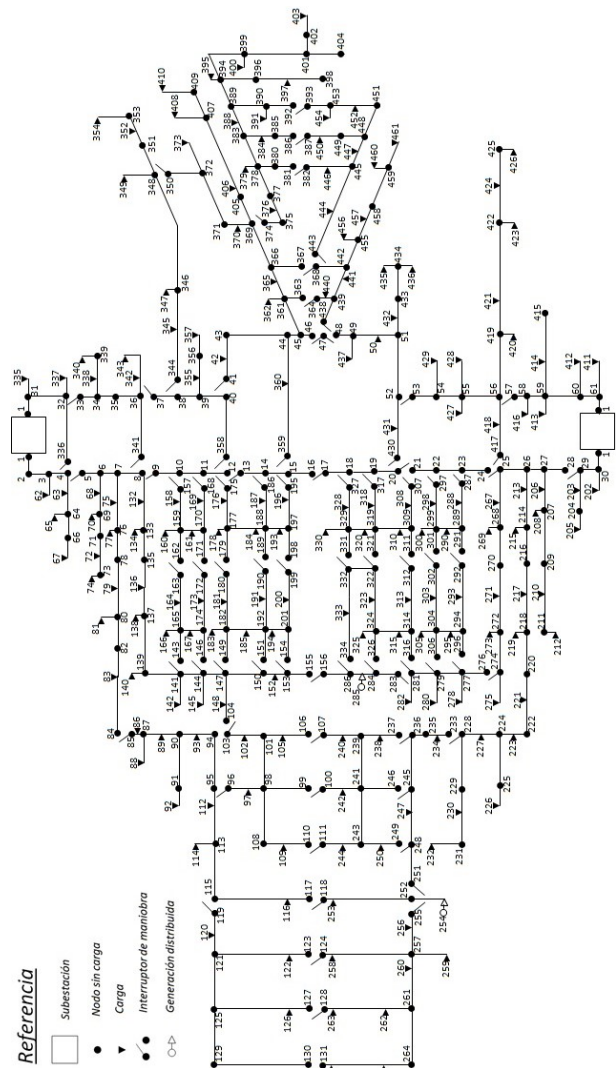


Fig. 4. Diagrama unifilar del sistema de distribución.

En la TABLA I se indican tres soluciones del Frente Pareto Óptimo. Se puede ver que el sistema está prácticamente con una distribución de cargas ideal, con índices de desequilibrio mucho menores que el límite de 2%. Con estos resultados se puede apreciar como el algoritmo propuesto puede ser utilizado en la planificación de operación de SED, dando como resultado una familia de soluciones óptimas.

TABLA I
RESULTADOS PARA EL SISTEMA DE GRAN PORTE

Configuración	A-1	A-2	A-3
P(W)	54.472	52.349	50.631
VUF(%)	0,097	0,098	0,102

En sistemas funcionando bajo gran desequilibrio, se pueden tener soluciones por encima o muy próximas al límite. En

estos casos el operador podrá optar por opciones de menor desequilibrio pero con mayores pérdidas.

B. Planificación de Expansión de SED

Para probar el algoritmo de RSD desde el punto de vista de la planificación de la expansión del sistema, se planificará el crecimiento de demanda del sistema. Esto incluirá el estudio para la conexión de nuevas líneas de distribución que alimentarán nuevas cargas trifásicas puntuales, incluyendo una nueva línea monofásica con cargas distribuidas. Los conductores de estas nuevas líneas se asumirán de diámetro igual a 10,51 mm. En la TABLA II se presentan más datos de la expansión del sistema.

TABLA II
DATOS DE LA EXTENSIÓN DEL SISTEMA

Trecho		Long. (km)	Tipo de Carga	Carga en el nodo B (kVA)		
A	B			R	S	T
403	462	0,14	-	-	-	-
462	463	0,14	-	-	-	-
463	464	0,14	-	-	-	-
464	465	0,14	-	-	-	-
465	466	0,14	PQ - Y	62+6,7i	12-9,7i	12-9,7i
466	467	0,14	-	-	-	-
467	468	0,14	-	-	-	-
468	469	0,14	PQ - Y	62+6,7i	12-9,7i	12-9,7i
469	470	0,14	-	-	-	-
470	471	0,14	PQ - Y	62+6,7i	12-9,7i	12-9,7i
471	472	0,14	-	-	-	-
472	473	0,14	PQ - Y	62+6,7i	12-9,7i	12-9,7i
473	474	0,14	PQ - Y	62+4,7i	12-9,7i	12-9,7i
474	475	0,14	-	-	-	-
475	476	0,14	-	-	-	-
476	477	0,14	-	-	-	-
477	478	0,14	-	-	-	-
478	479	0,14	PQ - Y	62+6,7i	12-9,7i	12-9,7i
479	480	0,14	PQ - Y	62+6,7i	12-9,7i	12-9,7i
480	481	0,14	-	-	-	-
481	482	0,14	-	-	-	-
482	483	0,14	PQ - Y	62+4,7i	12-9,7i	12-9,7i
483	484	0,14	PQ - Y	62+6,7i	12-9,7i	12-9,7i
484	485	0,14	PQ - Y	62+4,7i	12-9,7i	12-9,7i
478	486	1,00	PQ - Y	540,0+86,0i	-	-

Para que el sistema con las nuevas cargas continúe operando sin descuidar las restricciones eléctricas del sistema, fue realizada una simulación considerando el aumento de las dimensiones originales de los conductores del sistema (conductores de diámetro 10,51 mm pasan a 18,31 mm y conductores de 7,41 mm pasan a 10,51 mm). En la TABLA III se muestran los resultados para el sistema con las nuevas cargas.

TABLA III

RESULTADOS PARA EL SISTEMA DE GRAN PORTE CON NUEVAS CARGAS Y LÍNEA MONOFÁSICA

Configuración	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
P(W)	90.925	90.028	87.717	86.904	86.800	84.472	83.656
VUF(%)	2,074	2,075	2,098	2,099	2,108	2,133	2,134

En la Fig. 5 se observa el *Frente Pareto Óptimo*, calculado con el algoritmo propuesto, para el sistema con las nuevas cargas. Se puede notar que la conexión de las nuevas cargas ha generado un gran DDV en el sistema, a tal punto que todas las configuraciones óptimas están por encima del límite de desequilibrio de 2%.

Bajo las circunstancias de desequilibrio arriba expresadas, el personal de planificación de sistemas eléctricos debe tomar acciones adicionales con el fin de corregir el DDV del sistema. Por lo tanto, se proponen dos opciones para aumentar la flexibilidad del sistema, añadiendo un interruptor de maniobra al sistema. Un sistema más flexible ayudará al algoritmo de RSD a generar más opciones de configuración que puedan resultar en mejores alternativas de operación del sistema.

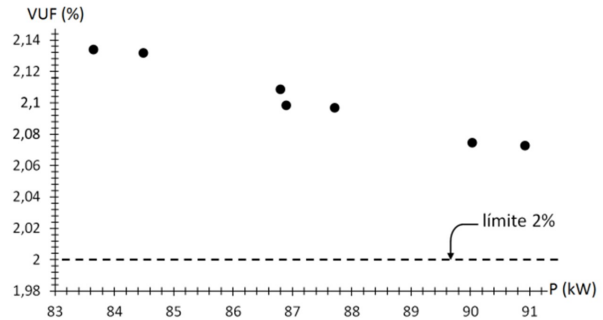


Fig. 5. Frente Pareto Óptimo del sistema de gran porte con nuevas cargas.

1) *Opción I:* En la primera opción se plantea una extensión de línea de 100 metros desde la barra 485 hasta la barra 425 (ver Fig. 6), agregando un interruptor de maniobra en ese trecho.

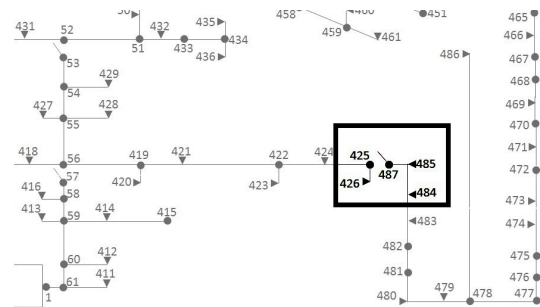


Fig. 6. Extensión de línea desde la barra 485 hasta la barra 425.

En la TABLA IV se muestran los resultados para la Opción I. Se puede observar que el aumento de flexibilidad del sistema logra reestablecer el DDV del sistema a valores inferiores al 2%, y también reducir las pérdidas de potencia activa. Queda así demostrado que la Opción I es una opción válida para solucionar los inconvenientes de DDV del sistema.

TABLA IV
RESULTADOS PARA LA Opción I

Configuración	C-1	C-2	C-3	C-4
P(W)	50.807	50.627	50.626	50.622
VUF(%)	0,919	0,924	0,925	0,926

2) *Opción II:* La segunda opción propone el aumento de flexibilidad del sistema mediante una extensión de línea de distribución de 500 metros desde la barra 483 hasta la barra 415 (como se muestra en la Fig. 7) y también se plantea la instalación de un interruptor de maniobra en ese trecho. En la

TABLA V se muestran los resultados para la Opción II. La Opción II también logra reestablecer el DDV del sistema a valores inferiores al 2% de desequilibrio.

TABLA V
RESULTADOS PARA LA Opción II

Configuración	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
P(W)	47.366	46.104	45.593	45.554	45.496
VUF(%)	0,783	0,787	0,791	0,792	0,795

Realizando la comparación de las respuestas de ambas opciones, se puede resaltar el mejor desempeño de la Opción II para las dos funciones objetivo. Sin embargo, la implementación de la Opción II requiere un costo de inversión inicial mayor, debido a la necesidad de construir 400 m adicionales de línea de distribución en comparación con la Opción I. En casos como este, el personal de planificación necesita realizar un análisis de costo-beneficio para la toma de decisión.

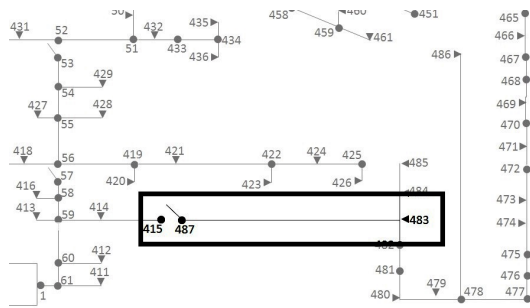


Fig. 7. Extensión de línea desde la barra 483 hasta la barra 415.

3) *Análisis costo-beneficio*: Para realizar el análisis costo-beneficio se selecciona una configuración de cada opción planificada, además de una configuración en condiciones previas a la implementación de las opciones. Por lo tanto, se seleccionarán las configuraciones B-7 (condición inicial), C-4 (Opción I) y D-5 (Opción II) que son las configuraciones que presentan menores pérdidas de energía para cada escenario.

Aplicando la ecuación (15) para el primer escenario se obtiene un flujo de efectivo de 11.528,41 [US\$], que corresponde a la diferencia de energía perdida entre las configuraciones B-7 y C-4. La misma ecuación se utiliza para el segundo escenario, en donde se obtiene un flujo de 13.386,77 [US\$] equivalente a la diferencia entre las configuraciones B-7 y D-5.

Los valores de inversión inicial son valores referenciales obtenidos de [35]. Se considera un horizonte de planificación de 5 (cinco) años para calcular el VAN de las opciones como se muestra en las ecuaciones (16) y (17).

$$VAN_I = \sum_{n=1}^5 \frac{11.528,41}{(1+0,12)^n} - 26.897,93 = 14.659,4 [US\$] \quad (16)$$

$$VAN_{II} = \sum_{n=1}^5 \frac{13.386,77}{(1+0,12)^n} - 54.789,2 = -6.532,9 [US\$] \quad (17)$$

Al término de 5 (cinco) años, la Opción I generará una rentabilidad de 14.659,4 [US\$], mientras que la Opción II

generará una pérdida de 6.532,9 [US\$]. Como el VAN de la Opción I (VAN_I) es mayor, se optaría por la primera opción a pesar que la Opción II encuentra mejores soluciones considerando solamente las 2 (dos) funciones objetivo (f_1) y (f_2) definidas en (10) y (11).

VI. CONCLUSIÓN

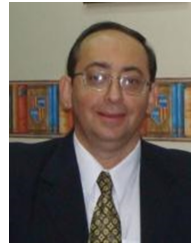
En este trabajo, se presentó una metodología de reconfiguración de sistemas de distribución trifásicos para mejorar su correspondiente desempeño operacional. Además, se propuso como segunda contribución del trabajo, la utilización del algoritmo de RSD en estudios de planificación de expansión de SED trifásicos.

De esta manera, el método propuesto resulta en una herramienta eficaz para los operadores del sector eléctrico, útil en la planificación de operación y expansión de SED de topología radial, permitiendo una visualización anticipada de las maniobras que se pretenden realizar y sus consecuencias en el equilibrio de voltaje teniendo en cuenta incluso las pérdidas eléctricas. Así mismo, con la utilización del algoritmo evolutivo propuesto se puede obtener una familia de soluciones óptimas de reconfiguración (soluciones de compromiso), en una única ejecución del algoritmo, lo que facilita la elección informada de la solución de compromiso más apropiada.

REFERENCIAS

- [1] R. Yan and T. K. Saha, *Investigation of Voltage Imbalance Due to Distribution Network Unbalanced Line Configurations and Load Levels*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1829-1838, May 2013.
- [2] A. von Jouanne and B. Banerjee, *Assessment of voltage unbalance*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 4, pp. 782-790, Oct 2001.
- [3] S. Sahu, R. N. Dash, C. K. Panigrahi and B. Subudhi, *Unbalanced voltage effects and its analysis on an induction motor*, 2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), Bangalore, pp. 263-268, 2017.
- [4] N. I. Zolkifri, C. K. Gan, A. Khamis, K. A. Baharin and M. Y. Lada, *Impacts of residential solar photovoltaic systems on voltage unbalance and network losses*, TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference, Penang, pp. 2150-2155, 2017.
- [5] H. López, J. Rodríguez-Reséndiz, X. Guo, N. Vázquez and R. V. Carrillo-Serrano, *Transformerless Common-Mode Current-Source Inverter Grid-Connected for PV Applications*, IEEE Access, vol. 6, pp. 62944-62953, 2018.
- [6] Estévez-Bén, Adyr and Tapia, Héctor and Carrillo-Serrano, Roberto and Rodríguez, Juvenal and Nava, Nimrod, *A New Predictive Control Strategy for Multilevel Current-Source Inverter Grid-Connected*, Electronics, 8, 902, 2019.
- [7] A. Asrari, S. Lotfifard and M. S. Payam, *Pareto Dominance-Based Multi-objective Optimization Method for Distribution Network Reconfiguration*, in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 3, pp. 1401-1410, May 2016.
- [8] F. Shahnia, P. J. Wolfs and A. Ghosh, *Voltage Unbalance Reduction in Low Voltage Feeders by Dynamic Switching of Residential Customers Among Three Phases*, in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 3, pp. 1318-1327, May 2014.
- [9] C. Oramas-Piero, E. Vega-Fuentes and F. Déniz, *Genetic algorithm based control for unbalanced low voltage networks*, 2018 AEIT International Annual Conference, Bari, pp. 1-4, 2018.
- [10] B. Pawar, S. Kaur and G. B. Kumbhar, *An integrated approach for power loss reduction in primary distribution system*, 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, pp. 1-6, 2016.
- [11] R. Jimenez, T. Serebrisky and J. Mercado, *POWER LOST: Sizing Electricity Losses in Transmission and Distribution Systems in Latin America and the Caribbean*, Inter-American Development Bank, 2014.

- [12] R. Srinivasa Rao, S. V. L. Narasimham, M. Ramalinga Raju and A. Srinivasa Rao, *Optimal Network Reconfiguration of Large-Scale Distribution System Using Harmony Search Algorithm*, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 3, pp. 1080-1088, Aug. 2011.
- [13] A. Merlin and H. Back, *Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System*, Power System Computation Conference (PSCC), 1975.
- [14] I. Srivastava and S. S. Bhat, *Soft Computing Techniques Applied to Distribution Network Reconfiguration: A Survey of the State-of-the-Art*, 2016 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), Tehri, pp. 702-706, 2016.
- [15] L. Isac Silva, E. Antonio Belati and I. Chaves Silva Junior, *Heuristic Algorithm for Electrical Distribution Systems Reconfiguration Based on Firefly Movement Equation*, in IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 2, pp. 752-758, Feb. 2016.
- [16] R. de Araujo Pegado and Y. P. Molina Rodriguez, *Distribution Network Reconfiguration with the OpenDSS using Improved Binary Particle Swarm Optimization*, in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 6, pp. 1677-1683, Jun. 2018.
- [17] C. von Lücken, B. Barán and C. Brizuela, *A survey on multi-objective evolutionary algorithms for many-objective problems*, Computational Optimization and Applications, vol. 58, no. 3, pp. 707-756, Jul. 2014.
- [18] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, *Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1492-1498, Apr. 1989.
- [19] P. Belli, J. Anderson, H. Barnum, J. Dixon and J.-P. Tan, *Handbook on Economic Analysis of Investment Operations*, Operational Core Services Network, 1998.
- [20] K. Mahmoud and M. Abdel-Akher, *Efficient three-phase power-flow method for unbalanced radial distribution systems*, Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Valletta, pp. 125-130, 2010.
- [21] W.H. Kersting and D.L. Mendive, *An application of ladder network theory to the solution of three-phase radial load-flow problems*, IEEE PES winter meeting, New York, Jan. 1976.
- [22] W.H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, London, New York, 2012.
- [23] Y. Zhu and K. Tomsovic, *Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 3, pp. 822-827, Jul. 2002.
- [24] T.-H. Chen, M.-S. Chen, T. Inoue, P. Kotas and E. A. Chebli, *Three-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1671-1681, Oct. 1991.
- [25] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, *A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis*, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 671-679, May. 1995.
- [26] Electricity Product Characteristics and Electromagnetic Compatibility, Application guide to the European Standard EN 50160 on voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems - Union of the Electricity Industry, EURELECTRIC, Jul. 1995.
- [27] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*.
- [28] Joint Working Group Cigré C4.07 / Cired (formerly Cigré WG 36.07), *Power Quality Indices and Objectives, Final WG Report*, 2004.
- [29] S. S. Skiena, *The Algorithm Design Manual*, second ed., Springer-Verlag London, 2008.
- [30] B. Ma, A. Hero, J. Gorman and O. Michel, *Image registration with minimum spanning tree algorithm*, Proceedings 2000 International Conference on Image Processing (Cat. No.00CH37101), Vancouver, BC, pp. 481-484 vol.1, 2000.
- [31] Administración Nacional De Electricidad - ANDE. División de Estudios y Gestión de Inversiones - Departamento de Estudios Estadísticos. *Compilación Estadística 1991 - 2011*.
- [32] Administración Nacional De Electricidad - ANDE. *Resumen Estadístico 2011 - 2015*.
- [33] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, Apr. 2002.
- [34] F. A. Leal, *Metodologia para reconfiguração de redes de distribuição trifásicas assimétricas e não balanceadas com geração distribuída*, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul Faculdade de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.
- [35] <https://www.contrataciones.gov.py/>



Benjamín Barán was born in Asunción – Paraguay in 1957. He received a degree in Electronic Engineering (1983) from National University of Asunción - Paraguay, a M.Sc. in Electrical and Computer Engineering (1987) at Northeastern University - U.S.A. and a Ph.D. degree in Computer Science (1993) at the Federal University of Rio de Janeiro - Brazil. He is member of IEEE from 1996 (Senior member from 2016). With 3 decades of teaching and research experience at several universities, he received the Paraguayan Science Award in 1996 and the Pan-American Prize of Scientific Computing in 2012, among a dozen of international awards recognizing his contribution of more than two hundred papers. He was President of the Latin American Center on Informatics Studies - CLEI (2004 - 2008) and Research Coordinator at the National Computing Center (CNC) of the National University of Asunción (1994 – 2007). Dr. Barán is President of CBA S.A. His research interests focused on Cloud Computing, Evolutionary Computation, Multi-Objective Optimization, Optical Networks and recently, on Quantum Computers.



Enrique Chaparro received the Electromechanical Engineering degree in 1999, from the Engineering Faculty of National University of Asunción, and the Master and Doctor of Science degree from the Federal University of Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, in 2001 and 2007, respectively. His current research interests include Artificial Intelligence application on large scale electric power system, mathematical representation of electric equipments for optimization and stability studies, and analytical methods for voltage collapse prediction.



Ivo Benitez Cattani received an Electrical Engineering degree in 2006 and a Master of Science degree in Electrical Engineering in 2017, from Facultad Politécnica de la Universidad Nacional del Este, Paraguay. His current research interests include the state-of-the-art of Electric Power Distribution, Transmission and Generation Optimization and Planning Techniques that can be utilized by decision makers.