
Reconfiguración Óptima de Sistemas Eléctricos de Distribución Radiales utilizando Algoritmo *Beta-Radial* combinado con Bloques Lineales

Richard Ruiz Díaz¹, Néstor Cáceres A.¹, Enrique Chaparro V.²

¹Parque Tecnológico Itaipu - Paraguay, ²Facultad Politécnica - Universidad Nacional del Este
Paraguay

RESUMEN

El suministro de energía eléctrica a la industria y demás centros de consumo de baja y media tensión se realiza mediante Sistemas Eléctricos de Distribución (SED) de topología radial. Una *topología radial* supone que todos los centros de carga están alimentados mediante un alimentador. El diseño radial de los SED simplifica la coordinación de los dispositivos de protección, para corredores de subtransmisión y para las maniobras de restauración del suministro de energía. El proceso de restauración entre alimentadores, durante una interrupción programada para mantenimiento o luego de una perturbación, se realiza a través de cambios en la configuración de la topología inicial y ese procedimiento se denomina *Reconfiguración*, el cual, se ejecuta a través de cambios de estados (apertura o cierre) de uno o varios interruptores. La *Reconfiguración* debe realizarse manteniendo la *radialidad* del SED y atendiendo a objetivos tales como: minimización del número de maniobras, mantenimiento de los perfiles de tensión dentro de límites aceptables, reducción de la pérdida total del flujo de potencia activa, entre otros. Se denomina *Reconfiguración Óptima*, al proceso que permite encontrar la *topología óptima global*, es decir, aquella topología cuya combinación de interruptores abiertos y cerrados optimiza *globalmente* uno o más objetivos, como los citados anteriormente.

Para garantizar la obtención de la *topología óptima global* se requiere la evaluación exhaustiva de todas las topologías del *Conjunto Radial*, este conjunto se compone de todas las posibles topologías radiales de un SED. Sin embargo, la obtención del *Conjunto Radial* es un problema combinatorio de orden exponencial, lo cual, supone que, al utilizar cualquier *algoritmo determinístico* para resolver el problema, el esfuerzo computacional necesario aumenta exponencialmente conforme crece el tamaño del SED. Por esta razón, cuando se trata de SED de mediano y gran porte, *los algoritmos determinísticos* no son habitualmente considerados para resolver el problema de *Reconfiguración Óptima*. En cambio, como alternativa, se utilizan *métodos heurísticos* y *metaheurísticos* para obtener alguna solución óptima, aunque ésta pueda obtener una configuración que supone una *optimización local* en lugar de a una *optimización global*. No obstante, en años recientes algunos autores han propuesto algoritmos determinísticos que son capaces de obtener el *Conjunto Radial* de SED radiales de mediano porte.

En el presente trabajo se propone un procedimiento de *Reconfiguración Óptima* que combina el algoritmo *Beta-Radial* con la técnica de *bloques lineales*. Ambos son métodos computacionales determinísticos basados en la Teoría de Grafos y son bastante eficientes para obtener el *Conjunto Radial* del SED. La solución propuesta fue aplicada a dos sistemas académicos de mediano porte, mostrando ser muy eficiente para encontrar todas las topologías radiales pertenecientes al *Conjunto Radial*, en un tiempo computacional considerablemente menor que el requerido por los dos algoritmos originales aplicados por separado.

PALABRAS CLAVES

Reconfiguración, Sistemas Radiales, Beta-Radialidad, Bloques Lineales, Algoritmos Determinísticos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1. INTRODUCCIÓN

La función de un SED es suministrar la energía eléctrica desde las subestaciones hasta los consumidores finales mediante *Alimentadores*. En este caso, cada alimentador de una subestación corresponde a una línea principal (tronco de alimentación), con su correspondiente interruptor, que alimenta varios centros de consumo (cargas), ya sea residenciales, comerciales o industriales. Los alimentadores, casi con exclusividad, se diseñan siguiendo una *topología radial*, lo que facilita la coordinación de las protecciones, para corredores de subtransmisión, y para las maniobras de restauración del suministro de energía [1]. Esto significa que todas las cargas deben estar energizadas, siendo cada carga alimentada sólo por una línea de distribución, lo que caracteriza a un sistema de topología radial. Sin embargo, todo SED cuenta con dispositivos capaces de conectar entre sí tramos desconectados y desconectar tramos que normalmente estarían conectados, en casos de ocurrencia de fallas (contingencias internas o externas) y desconexión programada para trabajos de mantenimiento.

La alteración de la topología en los SED se realiza mediante la abertura o cierre de dispositivos de interrupción del flujo de potencia, denominados *interruptores o llaves*. Este proceso se denomina *Reconfiguración*. Normalmente, estas *llaves* pueden operar abriendo el circuito, cuando la corriente supera un valor de referencia, y vuelven a cerrarse una vez eliminada la falla que originó su abertura. Estas *llaves* pueden ser manuales o *telecomandadas*. Cuando las *llaves* son manuales, éstas son operadas por cuadrillas de técnicos, y, por lo tanto, el tiempo requerido es considerable. Por otra parte, cuando la *llave es telecomandada* sólo se requiere enviar una señal desde el Centro de Control para cambiar el estado de la mencionada *llave*. Esta alteración topológica no puede ser arbitraria, sino que debe realizarse atendiendo a objetivos tales como: *radialidad*, perfiles de tensión aceptables, reducción de pérdidas, minimizar número de maniobras, entre otros. La *Reconfiguración Óptima* supone encontrar una determinada *topología* (combinación de *llaves* abiertas y cerradas) que optimiza globalmente uno o más objetivos. Actualmente, existen varios métodos para el problema de optimización de la *Reconfiguración*, y los más utilizados son los métodos metaheurísticos [2][3][4], requiriendo poco esfuerzo computacional, aunque no garantizan que el resultado obtenido sea el óptimo global.

Tradicionalmente, garantizar la obtención de la configuración óptima global requiere de la evaluación exhaustiva de todas las combinaciones posibles de *llaves* abiertas y cerradas. Esta forma de tratar el problema se conoce como *Búsqueda Exhaustiva*, y complejidad algorítmica es comparable al problema del Vendedor Viajero [5], siendo su implementación computacional bastante simple. Sin embargo, la aplicación de *Búsqueda Exhaustiva* no es viable para sistemas de distribución reales, de mediano y gran porte, debido a que la complejidad del algoritmo, calculada mediante la *Regla del Producto* [11], es de orden exponencial, razón por la que el esfuerzo computacional crece muy rápidamente cuando aumenta el tamaño (medido en función al número de *llaves*) del SED bajo análisis. Debido al esfuerzo de cómputo requerido, hasta la actualidad sólo se han obtenido óptimos globales para sistemas pequeños de (hasta 30 *llaves*) [6]. Los sistemas abordados son en general versiones reducidas de sistemas reales para propósito académico, puesto que conocer el óptimo teórico resulta de suma utilidad para evaluar el desempeño de los métodos heurísticos y metaheurísticos.

Como alternativa a la *Búsqueda Exhaustiva*, han sido propuestos algunos algoritmos que aprovechan la condición de *radialidad* de los SED para limitar la cantidad de topologías a ser evaluadas. Entre estas alternativas se encuentran el *Algoritmo de Búsqueda por Bloques Lineales* [13] y el *Algoritmo Beta-Radial*[14]. Ambos algoritmos utilizan técnicas propias de la *Teoría de Grafos* y sirven para determinar el *Conjunto Radial* de un sistema. El *Conjunto Radial* de un sistema se define como el conjunto de todas topologías radiales de ese sistema. Una vez que se dispone del *Conjunto Radial*, se aplica el *Flujo de Potencia* a cada una de las topologías del conjunto a fin de encontrar aquella que mejor atiende los objetivos de la optimización.

En el presente trabajo se propone un nuevo algoritmo que combina el concepto de *Bloques Lineales* con el *Algoritmo Beta-Radial*. En este nuevo *Algoritmo Combinado*, la técnica de los *Bloques Lineales* es utilizado para dividir el problema en varias particiones y, posteriormente, el *Algoritmo Beta-Radial* realiza la búsqueda dentro de cada partición. Para validar el *Algoritmo Combinado* propuesto, éste fue utilizado en la optimización de dos SED, de pequeño y medio porte, bien conocidos y los resultados fueron comparados con los obtenidos por el *Algoritmo Beta-Radial* original. Los resultados obtenidos demuestran la validez de la propuesta al reducir considerablemente el tiempo de cómputo requerido.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

2. RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIALES

La representación matemática que modela al problema de reconfiguración está descrito a través de la siguiente ecuación [2-3]:

$$\text{Minimizar}_{C_k} \sum_{j \in \Omega_A} L_j \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in \Omega_N} S_j = D_i \quad i \in \Omega_N \quad (2)$$

$$S_j \leq S_{j,max} \quad j \in \Omega_A \quad (3)$$

$$\Delta V_i \leq \Delta V_{max} \quad i \in \Omega_N \quad (4)$$

$$S_{sub} \leq S_{sub,max} \quad sub \in \Omega_P \quad (5)$$

$$\prod_{i \in \Omega_{Nc}} \delta_i = 1 \quad (6)$$

donde:

C_k	k -ésima configuración;	ΔV_i	desvío de voltaje entre la subestación y la i -ésima carga;
Ω_A	conjunto de los trechos de los alimentadores entre las cargas;	S_{sub}	flujo de potencia en el alimentador principal (sub) conectado a las subestaciones;
Ω_N	conjunto de cargas del SED radial;	δ_i	variable binaria que indica si la i -ésima carga está energizada ($\delta_i = 1$) o no ($\delta_i = 0$);
Ω_P	conjunto de alimentadores principales conectados a las subestaciones;	$S_{j,max}$	capacidad del flujo de potencia del j -ésimo trecho;
L_j	pérdidas activas en el j -ésimo trecho;	ΔV_{max}	desvío de voltaje entre la subestación y la i -ésima carga;
D_i	demanda de la i -ésima carga;	$S_{sub,max}$	capacidad de la subestación sub .
S_j	flujo de potencia en el j -ésimo trecho;		

La función objetivo (1) representa la Pérdida Total de potencia activa en todos los trechos del sistema. La restricción (2) establece el balance de potencia en las barras (nodos) de carga. Las restricciones (3) al (5) establecen límites en la capacidad de transmisión de cada trecho, y la restricción (6) impone la necesidad de que todos los nodos de carga sean atendidos. Además de estas restricciones, se exige que el sistema se mantenga con la topología radial.

Para determinar si una cierta topología es buena o mala en función de los objetivos buscados, se requieren conocer los valores eléctricos del sistema tales como la carga que fluye en cada tramo de conductor los valores de voltaje en cada nodo de carga. La determinación de estos valores se realiza mediante el análisis de Flujo de Potencia. En el presente trabajo se utiliza el método de Flujo de Potencia denominado *Método de Barredura* directa e inversa [7], muy adecuado para SED de topología radial. En dicho método, la red es representada como un grafo orientado acíclico, donde el inicio del grafo corresponde a la subestación. Cada trecho principal, que parte de la subestación (normalmente denominado alimentador), y las cargas, están todos interconectados entre sí y con la subestación, a través de trechos secundarios.

El enfoque tradicional para resolver el problema de Reconfiguración Óptima consiste en un Algoritmo de Búsqueda Exhaustiva, el cual consiste en evaluar sistemáticamente todas las topologías posibles y, cada vez que se encuentra una topología radial, se ejecuta el *Flujo de Potencia* considerando esa topología. No obstante, se puede dividir el problema en dos sub-problemas, a saber: a) Encontrar el *Conjunto Radial* del sistema y b) Identificar la topología más conveniente de entre las topologías pertenecientes al *Conjunto Radial* encontrado como se muestra en el Pseudocódigo 1. En este algoritmo, la función *Flujo_de_Potencia()* aplica el *Flujo de Potencia* al SED radial bajo estudio, configurado según una cierta topología, y devuelve un valor proporcional a la bondad de la topología evaluada para cumplir con los criterios de optimización establecidos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

```
INICIO
// Encontrar el Conjunto Radial
Establecer el Conjunto_Radial como inicialmente vacío
REPETIR para cada topología T del sistema
    SI T es Radial
        Agregar T a Conjunto_Radial
    FIN-SI
FIN-REPETIR
// Encontrar la mejor Topología
Mejor_Topología = Primera topología de Conjunto_Radial
Mejor_Valor = Flujo_de_Potencia(Mejor_Topología)
REPETIR para cada topología R perteneciente a Conjunto_Radial
    Nuevo_Valor = Flujo_de_Potencia( R )
    SI Nuevo_Valor > Mejor_Valor
        Mejor_Topología = R
    FIN-SI
FIN-REPETIR
FIN
```

Pseudocódigo 1 – Algoritmo Exhaustivo para resolver el problema de *Reconfiguración Óptima*

3. ALGORITMO BETA-RADIAL

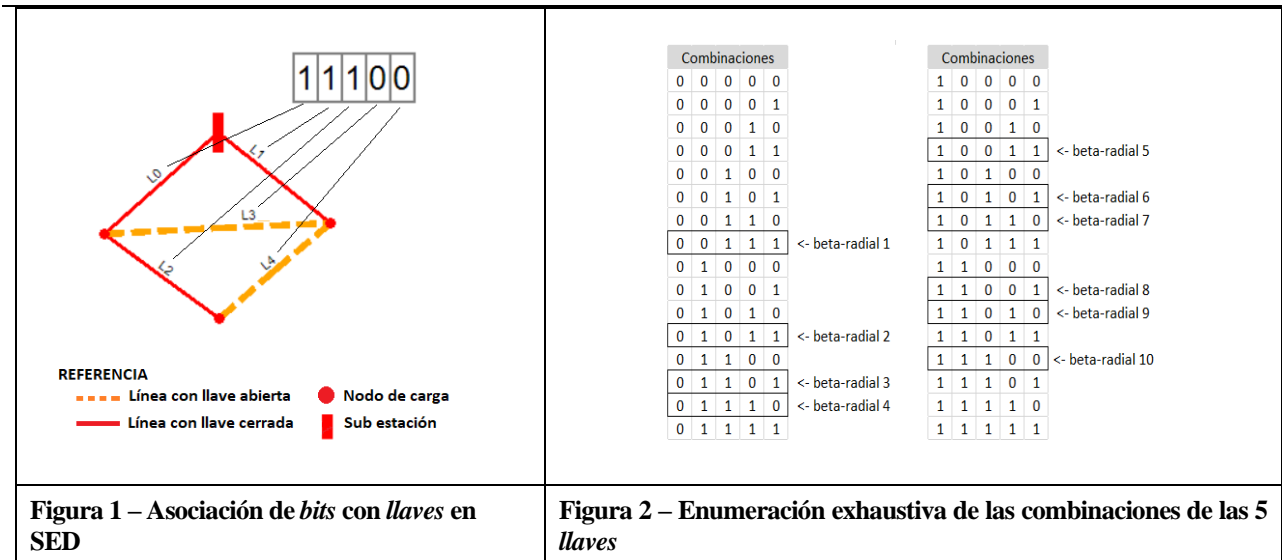
El término *Beta-Radial* se inspira en la forma de designar a la versión de una aplicación informática que está completa, pero que aún debe ser probada. Esta denominación, caracteriza la condición necesaria pero no suficiente para que una configuración sea radial, y que consiste en que la cantidad de *llaves* cerradas sea igual a una constante θ , que es propia de cada sistema [14]. Esta característica de los sistemas radiales es bien conocida, y en [6] se establece la forma de calcular θ en función de la cantidad total de *llaves* y la cantidad de tramos de línea sin *llaves*.

Para dar formalidad matemática a la condición de *Beta-radialidad* se pueden utilizar los conceptos de la Teoría de Grafos. La analogía entre los SED y los grafos resulta evidente. Barán & Wu [8], hacen notar que una configuración radial corresponde a un árbol abarcador o *Spanning Tree*. Junqueira [9], utiliza el concepto de Bloques de Carga, para explicitar la analogía entre Grafos y sistemas eléctricos, de manera que los Bloques de Carga corresponden a los nodos del Grafo, mientras que los trechos con interruptores cerrados representan las aristas del Grafo. Un Bloque de Carga es un conjunto de nodos conectados entre sí, por líneas de distribución, o *trechos*, sin *llaves*. De esta manera, todos los nodos conectados directamente se representan como un único nodo en el Grafo, resultando así que, entre los nodos sólo quedan trechos con *llaves*. Diestel [10], demuestra formalmente que un Grafo conexo con n vértices es un árbol si y sólo si el mismo tiene $(n - 1)$ aristas. De esto último, y correspondiéndose una configuración radial con un árbol, se concluye que un SED radial con N_{BC} Bloques de Carga debe tener necesariamente $(N_{BC} - 1)$ *llaves* cerradas.

Para facilitar el estudio del algoritmo *Beta-Radial*, resulta conveniente la utilización de un vector de valores binarios para representar una topología específica del SED. En este modelo, cada elemento del vector se asocia con una de las *llaves* del SED. Así, una *llave* cerrada se represente con el valor '1' mientras que una *llave* abierta se representa con el valor '0', tal como se muestra en la Figura 1. Como ya se mencionó, el algoritmo *Beta-Radial* se basa en el hecho concreto de que la cantidad de *llaves* cerradas es constante. En la Figura 2, se enumeran exhaustivamente las posibles combinaciones de *llaves* para el sencillo sistema de ejemplo, con 5 *llaves*, que se muestra en la Figura 1. Se puede apreciar que la enumeración exhaustiva tiene un comportamiento similar a un contador entero e incluye combinaciones claramente no radiales.

En la misma Figura 2, también se resaltan y enumeran las topologías Beta-Radiales que, para el ejemplo, tienen 3 *llaves* cerradas ($\theta = 3$).

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022



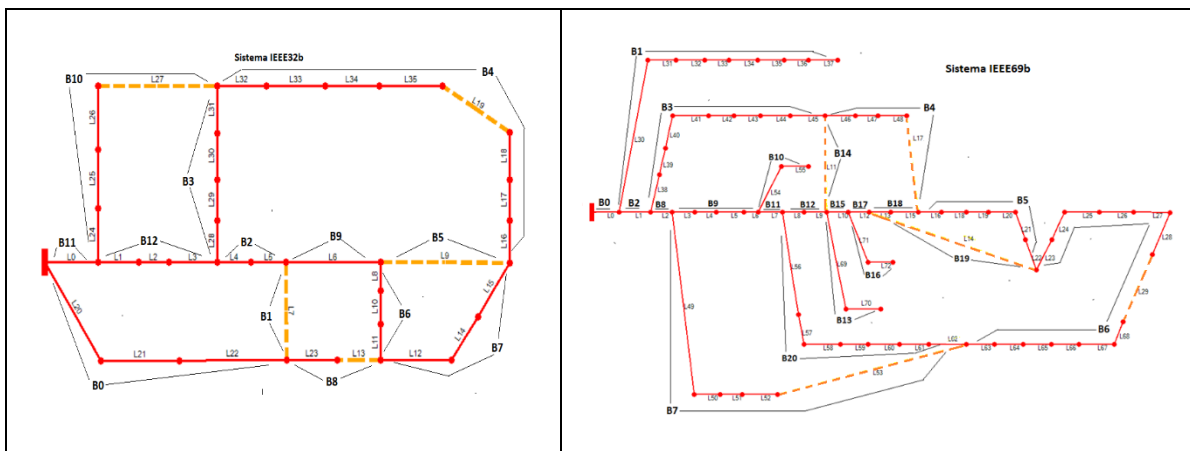
El algoritmo *Beta-Radial* ignora la gran mayoría de topologías no-radiales iniciando con una topología con θ llaves cerradas ubicadas a la derecha del vector (vector *beta-radial* 1, en el ejemplo) y posteriormente moviendo sistemáticamente los ‘1’ hacia la izquierda hasta una topología en la que todos los ‘1’ están ubicados a la izquierda del vector (vector *beta-radial* 10). De esta manera, el problema original se convierte en un problema combinatorio [15], en el que se busca encontrar la cantidad C_β de todas las permutaciones posibles de λ elementos tomados de θ , donde λ es el número total de llaves.

$$C_\beta = \lambda! / (\theta! \cdot (\lambda - \theta)!)$$
 (7)

En la expresión matemática (7) el símbolo “!” indica la operación de *Factorial* de un número. Como se verá más adelante, la posibilidad de conocer de antemano la cantidad de combinaciones *Beta-Radiales* es útil para dividir el problema y encontrar el *Conjunto Radial*.

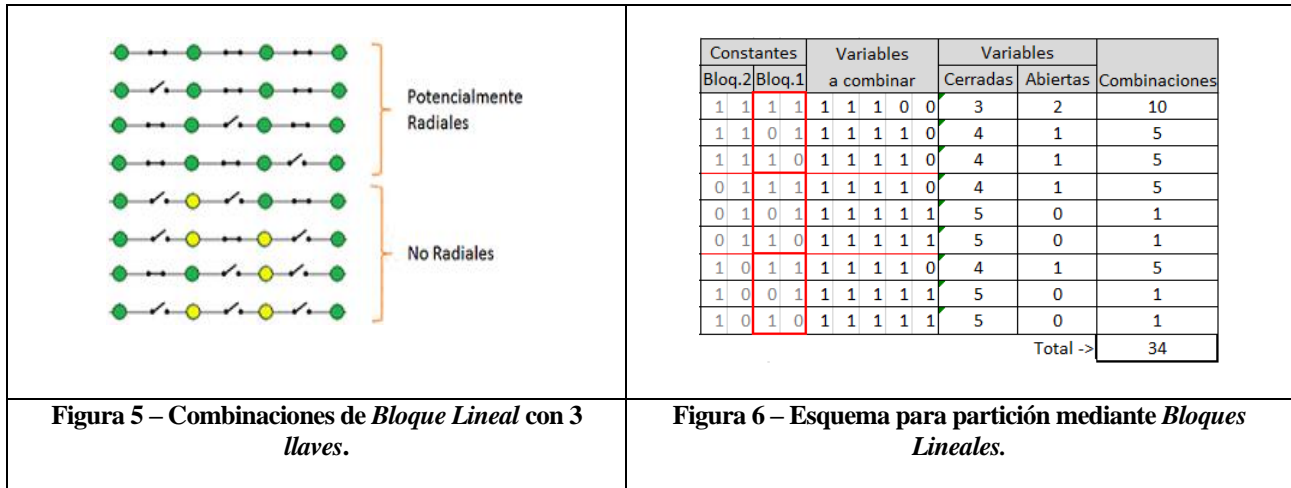
4. BLOQUES LINEALES

Un *Bloque Lineal (BL)* se define como un conjunto de una, o más llaves, ubicadas sobre un trecho de línea sin bifurcaciones, en un SED radial. La *Cardinalidad* del bloque está definida por la cantidad de llaves que lo componen. En las Figuras 3 y 4 se muestran los diagramas unifilares de 2 sistemas bien conocidos en los cuales se identifican y enumeran los *Bloques Lineales* que los componen.



**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022**

Considerando SED radiales, la cantidad de combinaciones posibles disminuye cuando se considera la necesaria condición de *radialidad*. Por ejemplo, el bloque B_0 , que contiene 3 llaves, en principio puede tener 8 combinaciones posibles, sin embargo, si se abren simultáneamente 2 o 3 llaves, los nodos entre esas llaves quedarían sin energía, rompiéndose la condición de *radialidad*. Como consecuencia, las combinaciones válidas se reducen a 4, tal como se ilustra en la Figura 5.



La reducción de combinaciones asociada a los *Bloques Lineales* se puede aprovechar como base para un algoritmo para encontrar el *Conjunto Radial*, tal como se hace en [13]. Sin embargo, en presente trabajo, el concepto de *Bloques Lineales* se utiliza para dividir el problema de Reconfiguración Óptima en varias “particiones” buscando reducir la complejidad combinatoria.

5. ALGORITMO COMBINADO

La estrategia para combinar el concepto de *Bloques Lineales* con la *Beta-Radialidad* consiste en partir el problema considerando los *Bloques Lineales* para, posteriormente, aplicar sucesivamente el algoritmo *Beta-Radial* a cada partición obtenida. El proceso de “partición” se consigue tomando uno o más bloques lineales, para luego determinar las combinaciones válidas de las llaves que componen los bloques y, finalmente, considerar como constantes estas llaves al aplicar el algoritmo *Beta-Radial*.

En la Figura 6, se describe el proceso de partición para un sistema con 9 llaves, 7 de las cuales deben estar cerradas y 2 abiertas. Los 4 bits de la izquierda corresponden a 2 bloques lineales, ambos compuestos por 2 llaves. Como cada bloque tiene 3 combinaciones válidas posibles, en forma combinada se tienen 9 combinaciones de llaves válidas. Cada una de estas 9 combinaciones define una partición y, en adelante, los bits involucrados en los bloques lineales se considerarán como constantes. De esta manera, de las 9 llaves originales, ahora sólo quedan 5 llaves “variables”. Para cada partición se determina cuántas de las llaves restantes deben estar cerradas y cuántas abiertas para, posteriormente, aplicar el algoritmo *Beta-Radial*.

En la Figura 6 se muestra la cantidad de combinaciones *Beta-Radiales* que serán analizadas, en cada partición, por el algoritmo *Beta-Radial*. Resulta interesante observar que el tamaño de cada partición (definido por la cantidad de combinaciones) difiere considerablemente. Como regla general, aquellas particiones que más valores binarios “uno” tengan en su parte constante son las que tendrán mayor tamaño. Obsérvese que el método de partición descrito puede ser aplicado recursivamente sobre las particiones más grandes hasta que todas las particiones tengan un tamaño máximo predeterminado. Por otra parte, en la Figura 6 se observa que la cantidad total de combinaciones es 34, sin embargo, la cantidad original de combinaciones, como resultado de aplicar la ecuación (7), es de 36. Por consiguiente, la complejidad combinatoria del problema se redujo en 2 unidades. Esta reducción de un poco más de 5% es bastante modesta, sin embargo, si se toman bloques lineales con mayor cardinalidad y si, además, se aplica el método de partición en forma recursiva, la reducción de complejidad combinatoria puede resultar significativa.

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022**

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la realización de los experimentos, se eligieron de la literatura científica 2 sistemas bien conocidos que se describen a continuación:

IEEE 32b. SED descrito en [8], con 32 barras y 36 llaves, de las cuales 31 son normalmente cerradas y 5 normalmente abiertas. El diagrama unifilar de este sistema se muestra en la Figura 3.

IEEE 69b. SED extraído de [12], con 69 barras y 73 llaves, de las cuales 68 son normalmente cerradas y 5 normalmente abiertas. El diagrama unifilar de este sistema se muestra en la Figura 4.

Se implementó un algoritmo para automatizar el proceso de partición por *Bloques Lineales* utilizando el lenguaje de programación C++. El Algoritmo Beta-Radial y el Flujo de Potencia también fueron implementados en C++. El proceso de partición se ejecutó reiteradamente sobre ambos sistemas hasta conseguir tamaños de partición menores a 100.000 en el caso del sistema **IEEE 32b** y de 1.000.000 en el sistema **IEEE 69b**. Se aplicaron tanto el algoritmo *Beta-Radial* original como el *Algoritmo Combinado*, mencionado en la sección 5, sobre ambos SED radiales, registrándose, en cada caso, los resultados y tiempos de ejecución.

En la Tabla I se muestran los valores eléctricos obtenidos al aplicar el Flujo de Potencia a la topología inicial tomada de la literatura y a la topología obtenida mediante el proceso de optimización. En este proceso, se buscó minimizar, en forma independiente pero simultánea, tres magnitudes eléctricas: Pérdidas Activas, Perdidas Reactivas y el Máximo Desvío de Tensión. En la misma tabla se muestra la lista de llaves abiertas correspondiente a la topología inicial y a las topologías optimizadas. Cabe observar que, como era de esperar, tanto el algoritmo *Beta-Radial* original como el *Algoritmo Combinado* obtuvieron exactamente el mismo *Conjunto Radial*. Por esta razón, ambos algoritmos obtuvieron los mismos valores optimizados. Estos resultados son también compatibles con los de otras publicaciones previas [13] [14].

Tabla I – Valores obtenidos al aplicar el Flujo de Potencia

Sistema	Tiempo (s.)	Magnitud	Valor			Llaves abiertas	
			Inicial	Optimizado	Reducción	Inicial	Optimizado
IEEE 32b	126,42	Pérdidas Activas (MW)	360,39	238,26	33,89%	L7 L9 L13 L19 L27	L5 L8 L15 L27 L35
		Perdidas Reactivas	240,69	171,77	28,64%		L7 L8 L15 L31 L35
		Desvío de Tensión (kV)	1,87	1,23	33,92%		L5 L8 L15 L31 L35
IEE 69b	536,23	Pérdidas Activas (MW)	34,38	15,36	55,31%	L11 L14 L17 L29 L53	L11 L14 L15 L62 L65
		Perdidas Reactivas	15,45	11,94	22,74%		L11 L14 L15 L53 L65
		Desvío de Tensión (kV)	0,56	0,36	36,13%		L4 L14 L15 L62 L65

Por otra parte, en la Tabla II se muestran los resultados de aplicar el algoritmo Beta-Radial original y el *Algoritmo Combinado* en la determinación del Conjunto Radial de los sistemas en estudio. Se puede observar que ambos algoritmos son iguales en su capacidad de encontrar el Conjunto Radial, pues ambos encontraron exactamente las mismas topologías radiales ya conocidas gracias a publicaciones previas [13] [14].

Tabla II – Valores obtenidos al determinar el Conjunto Radial

Sistema	Algoritmo	Radiales	Tiempo (s.)	Reducción
IEEE 32b	Original	50.751	1,625	26,95%
	Combinado	50.751	1,187	
IEEE69b	Original	407.924	126,21	27,93%
	Combinado	407.924	90,957	

Sin embargo, se observa una importante diferencia en el tiempo de computación empleado por cada algoritmo para encontrar todas las topologías del Conjunto Radial. Como se puede observar en la Tabla II, para los dos SED radiales bajo estudio, el tiempo requerido por el Algoritmo Combinado, propuesto en este trabajo, se reduce en más del 25% cuando se lo compara con el algoritmo *Beta-Radial* original.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

7. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales demuestran con bastante claridad la validez del Algoritmo Combinado propuesto en el presente trabajo, pues tiene la misma capacidad de optimización que el algoritmo *Beta-Radial* original, y encuentra el *Conjunto Radial* en un tiempo significativamente menor. Considerando que la mayor complejidad algorítmica se encuentra en el algoritmo para determinar el *Conjunto Radial*, el método propuesto tiene potencial para ser aplicado ventajosamente en sistemas de mayor porte. Una ventaja importante del algoritmo de reconfiguración propuesto es que al dividir el problema en varios subproblemas (particiones) plantea la posibilidad de un enfoque para *Computación Paralela*, asignando cada partición a un procesador diferente. Este enfoque paralelo está siendo encarado por los autores con mira a futuras publicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kagan, Nelson, Barioni de Oliveira, Carlos C., Robba, Ernesto J. “Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. Editora Edgard Blücher. Sao Paulo – SP, Brasil, 2008, pp. 6–19 ISBN: 85-212-0355-1.
- [2] Borges, C. L. T.; Manzoni, A.; Viveros, E., C.; Falcão, D., M.; Henriques, H., O. (2002) “Uma Ferramenta Computacional Amigável para Reconfiguração Automática de Redes de Distribuição Baseada em Algoritmos Genéticos”. XV SENDI. 2002.
- [3] Nara, K.; Shiose, A.; Kitagawa, M.; Ishihara, T. “Implementation of Genetic Algorithm for the Distribution Systems Loss Minimum Re-Configuration”. IEEE. 1992.
- [4] Oliveira, E. et al. "New algorithm for reconfiguration and operating procedures in electric distribution systems". Department of Electrical Engineering, Federal University at Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil.2013.
- [5] Wilf, H. “Algorithms and Complexity”. University of Pennsylvania Philadelphia, PA 19104-6395. Internet Edition, p. 104. Summer, 1994.
- [6] Schmidt, H et al. “Fast Reconfiguration of Distribution Systems Considering Loss Minimization”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005.
- [7] Srinivas, M. S, “Distribution Load Flow: A Brief Review”. IEEE 2000.
- [8] Baran, M.; Wu, F., “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing”. IEEE Transaction on Power Delivery. 1989.
- [9] Junqueira, W.; Lemos, F.; Pavaô, L. “Metodologia de Isolamento de seção em falta e recompensação de redes de distribuição. Anais de XX Congresso de Automática. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2014.
- [10] Diestel, R. Graph Theory, 2nd ed., Springer-Verlag. Berlin-New York. p.14. 2000. ISBN:0.387-98976-5.
- [11] Grimaldi, Ralph P. "Matemáticas discreta y combinatoria" Addison-Wesley Iberoamericana, p. 5. ISBN 0-201-64406-1, Delaware, USA 1997.
- [12] Hsiao-Dong, Chiang; Jean-Jumeau, René (1990). “Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, N° 3, July 1990.
- [13] Cáceres, N., Chaparro, E., Barán, B. "Reconfiguración Determinística de Sistemas Eléctricos de Distribución radiales basada en Bloques Lineales". Décimo Séptimo Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRE – XVII ERIAC, Ciudad del Este – Paraguay, 2017.
- [14] Cáceres, N., Chaparro, E., Barán, B. "Reconfiguración óptima global de redes de distribución a través de la Beta-Radialidad". ARANDUCON 2016. IEEE Sección Paraguay. Región 9. Asunción Paraguay. Octubre 2016.
- [15] Ribnikov, K. "Análisis combinatorio". Ed. MIR. p. 19. Moscú, Rusia. ISBN: 978-5-03-000610-9. 1988.