

Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando uma Metodologia Multipartida

Natalia P. Cardona

Jose N. Melchor

Ruben Romero

Departamento de Engenharia Elétrica
UNESP – Universidade Estadual Paulista
Ilha Solteira, Brasil

Email: npatcar@gmail.com, jnmelchorg@hotmail.com, ruben@dee.feis.unesp.br

Resumo—Este trabalho apresenta uma proposta baseada na metodologia multipartida para a resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radiais. O objetivo principal, é encontrar a topologia radial ótima para minimizar as perdas ativas dos sistemas de distribuição. O método multipartida se divide em duas fases: a primeira que consiste na geração de uma solução e a segunda na qual a solução é melhorada. Para a geração de soluções iniciais de boa qualidade é usado o algoritmo de Prim. Para melhorar essas soluções é feita uma busca local baseada na troca de ramos. As soluções obtidas pela metodologia multipartida são obtidas através da programação de algoritmos implementados em linguagem C++ e testados em sistemas de 14, 33 e 84. Os resultados obtidos mostram a eficiência da aplicação da metodologia, obtendo bons resultados com um tempo computacional baixo.

Palavras-chave—Multipartida. Algoritmo de Prim. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais.

I. INTRODUÇÃO

O problema de reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica (RSDEE) consiste em encontrar uma estrutura de operação radial com o propósito de melhorar as características operativas do sistema satisfazendo as restrições tanto de operação quanto de topologia da rede.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica possuem uma configuração malhada, embora na maioria dos casos sua operação seja radial. A topologia radial é adotada pois a coordenação da sua proteção não é tão complexa e permite a redução das correntes de curto-circuito, diminuindo o custo de equipamentos de proteção que para redes malhadas são muito mais caros.

A reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica consiste em modificar a topologia de um sistema através da abertura ou fechamento das chaves de interconexão em pontos estratégicos. Através da realização de ações de comutação, pode-se alterar a topologia da rede e obter a melhor configuração radial possível. Este procedimento é utilizado principalmente para o isolamento de faltas, o balanceamento de cargas entre alimentadores, para melhorar os níveis de tensão, para conservar a confiabilidade ou para a minimização das perdas ativas do sistema. A restrição de radialidade torna difícil uma modelagem matemática adequada para

o problema da reconfiguração através de relações algébricas simples. Este problema foi contornado recentemente em [1].

Nos últimos anos têm sido realizadas consideráveis investigações na área de reconfiguração de sistemas de distribuição visando principalmente a minimização das perdas ativas dos sistemas. Além de [1], encontram-se na literatura muitos trabalhos que propõem métodos para resolver o problema de RSDEE, muitos deles baseados em heurísticas e meta-heurísticas. [2] foram os pioneiros ao propor um algoritmo heurístico construtivo e um algoritmo de otimização clássica (Branch and Bound). [3] apresentaram um método heurístico de troca de ramos (branch-exchange) muito rápido que funciona para sistemas pequenos, mas não é capaz de encontrar o ótimo de problemas de grande porte. [4] propõem uma melhoria para o método de [3], introduzindo aproximações para o fluxo de carga, considerando tanto a redução de perdas quanto o balanceamento de cargas. [5] desenvolveram uma técnica heurística baseada em um padrão de fluxo ótimo para resolver o problema de RSDEE.

Mais recentemente foram propostos trabalhos que utilizam meta-heurísticas para resolver o problema de RSDEE. Dentre eles [6], que propõem algoritmos evolutivos. [7], desenvolvem um algoritmo genético com uma população reduzida onde quase todos indivíduos gerados pelo algoritmo representam topologias radiais. Em [8] propõem um algoritmo genético de Chu-Beasley com um operador de recombinação que garante a geração somente de topologias radiais.

A contribuição deste trabalho é a apresentação de uma nova metodologia de solução para o problema de RSDEE usando uma meta-heurística baseada na metodologia multipartida. Esta metodologia usa para cada novo ponto de partida um valor modificado de fluxo de potência pelas linhas e permite obter configurações diferentes usando o algoritmo de prim, estas configurações iniciais são melhoradas com uma busca local baseada na troca de ramos. Este método visa garantir e obter a diversificação através do reinício do procedimento de busca de uma nova solução depois que uma região já foi explorada. A metodologia controla de forma implícita as restrições de radialidade e gera apenas soluções radiais com a utilização do algoritmo de Prim. A função objetivo e as restrições de operação são calculadas e verificadas através da solução de

um problema de fluxo de carga radial.

II. MODELO PARA O PROBLEMA DE RSDEE

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é de natureza combinatória, contendo variáveis inteiras e contínuas, o qual pode ser modelado como um problema de programação não linear inteiro misto ou PNLIM [2]. O modelo matemático para o problema de RSDEE pode ser escrito da seguinte maneira segundo [1]:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$P_i^S - P_i^D - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_i^S - Q_i^D - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$(I_{r_{ij}}^2 + I_{m_{ij}}^2) \leq x_{ij} (\bar{I}_{ij}^2) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (5)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} x_{ij} = nb - 1 \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7)$$

A função objetivo é mostrada em (1) que representa as perdas de potência ativa do sistema. As equações (2) e (3) representam as equações de balanço de potência ativa e reativa respetivamente, em que P_{ij} e Q_{ij} são obtidas pelas leis de Kirchhoff, as quais assumem a seguinte forma:

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (9)$$

As componentes real e imaginária de fluxo de corrente no ramo ij de (5) são mostradas como segue:

$$I_{r_{ij}} = g_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) - b_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (10)$$

$$I_{m_{ij}} = g_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) + b_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (11)$$

A equação (4) representa a restrição dos limites de tensão em cada barra do sistema. A equação (6) é uma condição necessária para a radialidade do sistema considerando uma subestação no SDEE, e a equação (7) representa a natureza binária da variável x_{ij} . As restrições (2) e (3), em conjunto com (6), garantem que uma solução factível do problema seja radial.

III. META-HEURÍSTICAS E METODOLOGIA MULTIPARTIDA

As heurísticas são procedimentos de busca que procuram uma solução global, e que para obtê-la, precisam de uma diversificação ao longo do seu processo para sair de ótimos locais e explorar regiões que possam conter a solução global.

Geralmente a criação de métodos heurísticos é um processo que conjuga duas características: a intensificação no que se refere à exploração e aproveitamento do espaço de busca, e a diversificação vinculada ao esforço empregado na busca em regiões distantes do espaço. Para obter boas soluções em tempo computacional baixo, deve ser procurado o equilíbrio entre intensificação e diversificação [18].

É para este tipo de problemas que as técnicas de otimização combinatória, heurísticas e meta-heurísticas, surgem como uma alternativa interessante, em que misturando distintos conceitos, exploram e aproveitam adequadamente o espaço de busca, proporcionando soluções de alta qualidade com um tempo computacional razoável.

A. Metodologia Multipartida

Os métodos que provêm a origem do que agora é chamado de método multipartida, consistem fundamentalmente na aplicação repetida de métodos construtivos. Entre os trabalhos que utilizam esse tipo de procedimentos podem ser encontrados: a programação heurística [14], o problema do caixeiro-viajante [15], e o problema da mochila com restrições individuais e múltiplas [16] e [17].

Nos primeiros trabalhos sobre as metodologias multipartidas, estas eram consideradas como metodologias de exploração local, baseadas na criação de soluções obtidas aleatoriamente. Porém, os métodos de busca baseados em otimização local que aspiram encontrar ótimos globais requerem de um tipo de diversificação, e uma maneira de encontrar a diversificação desejada é reiniciar a busca a partir de uma nova solução uma vez que a região tem sido explorada, tornando-se em uma estratégia multipartida a qual pode ser utilizada em muitos métodos de busca diferentes. É assim que os procedimentos multipartidas nascem como uma estratégia de diversificação em que é aproveitada uma busca local robusta do espaço de soluções mediante o reinício do procedimento de busca de uma nova solução depois que uma região já foi explorada.

Entre os primeiros trabalhos com metodologias multipartida se encontra [9], onde foram feitas várias ligações à pesquisa multipartida por meio de uma estrutura em que se inclui a busca local para melhorar as soluções iniciais. Uma série de extensões desta estrutura foram dadas em [10] e [11], onde são adicionadas estratégias de aleatoriedade controlada, estratégias de aprendizagem, decomposição induzida e processos com memória adaptativa, enfatizando na iteração entre diversificação e intensificação para a criação de processos mais eficientes.

Atualmente, a combinação de procedimentos de busca construtiva e local tornou-se a forma habitual de aplicar os métodos multipartidas. Um dos procedimentos multipartidas mais conhecidos e mencionados na literatura que aplica essa

forma de executar o método, é a meta-heurística Greedy Adaptive Search Procedure (GRASP), introduzido por [12]. Em cada iteração do algoritmo é construída uma solução e depois é realizada uma busca local para encontrar o ótimo local.

Os métodos multipartidas se dividem em duas fases: a primeira que consiste na geração da solução e a segunda na qual a solução é melhorada, como ilustrado na Figura 1. A solução criada na primeira fase é tipicamente gerada por um algoritmo do tipo construtivo. A segunda fase pode ir desde uma estratégia simples até uma meta-heurística complexa, que pode ou não melhorar a solução.

```

Iniciar  $i = 1$ 
Enquanto (critério de parada não for satisfeito)
{
    Passo 1. (Geração)
        Construir solução  $x_i$ 
    Passo 2. (Busca)
        Aplicar método de busca para melhorar  $x_i$ 
        Fazer  $x'_i$  a solução obtida
        Se ( $x'_i$  melhora a incumbente)
            Atualizar a incumbente
     $i = i + 1$ 
}

```

Figura 1. Procedimento multipartida.

Em [13] se identificam algumas características, e entre elas, 3 elementos fundamentais que podem dar uma classificação aos métodos multipartida:

Memória: se refere aos elementos que são comuns para alguma solução prévia gerada, a qual fornece uma base para a aprendizagem baseada em incentivos, que orientem ações e guiem até boas soluções ou, por outro lado, que diminuam a probabilidade que apareçam ações que guiem até soluções de má qualidade. Isto faz com que ao invés de percorrer a processos aleatórios de reinício nos quais as decisões atuais não se beneficiam do conhecimento acumulado durante as buscas anteriores, sejam identificadas informações específicas que façam aproveitamento do histórico de buscas.

Aleatoriedade: é uma maneira muito simples de encontrar diversificação mas sem controle sobre a diversidade obtida, pois em alguns casos podem fornecer resultados muito parecidos. As soluções iniciais podem ser geradas desta forma, ou contrária a ela, de maneira mais sistemática. Mecanismos mais sistemáticos são capazes de controlar as semelhanças entre as soluções geradas como uma maneira de produzir resultados que mostram uma gama útil de diferenças estruturais.

Grau de reconstrução: é uma medida do número ou proporção de elementos que permanecem fixos de uma geração a outra. A maioria de aplicações constroem a solução de cada geração desde zero, mas algumas estratégias fixam alguns elementos durante o processo de construção que tem aparecido em soluções geradas previamente.

IV. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Neste item são apresentados os aspectos básicos da implementação do método multipartida para resolver o problema de RSDEE para minimização das perdas, tomando como exemplo o sistema de 14 barras da Figura 2.

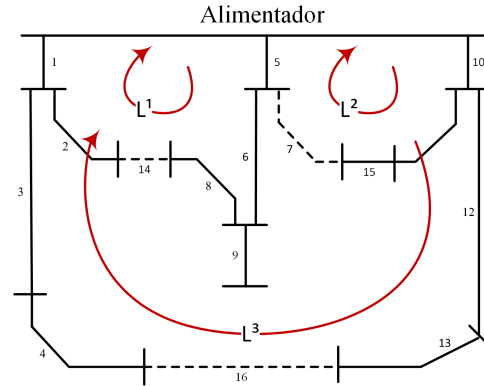


Figura 2. Algoritmo de Prim

A. Algoritmo de Prim

O algoritmo de Prim é um algoritmo que pertence à teoria de grafos para encontrar uma árvore geradora mínima (MST) para um grafo completo, sem direção e cujas arestas têm pesos, os quais são números reais conhecidos (positivos, negativos ou nulos). Em outras palavras, o algoritmo encontra um subconjunto de arestas que formam uma árvore com todos os vértices, onde o peso total das arestas na árvore é o mínimo possível.

O algoritmo de Prim é uma técnica de otimização exata para o problema de árvore geradora mínima, isto é, o algoritmo de Prim sempre encontra a solução ótima do problema de árvore geradora mínima. No caso de Prim, a árvore geradora começa a partir de um vértice qualquer, e seu incremento é feito por meio de arestas, sempre mantendo a árvore acíclica e conexa. A aresta a ser introduzida deve ser a de menor peso, assim uma a uma são incluídas aumentando a arborescência inicial até que todos os nós ou vértices são incluídos.

Neste trabalho é utilizado o algoritmo de Prim para a geração da solução inicial do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, onde os sistemas malhados correspondem aos grafos conexos mencionados anteriormente e a árvore geradora mínima corresponde a uma topologia radial com perdas mínimas. Apesar de o Prim ter sido proposto como uma árvore geradora mínima, para o problema de RSDEE é feita uma adaptação para que o algoritmo encontre um subconjunto de ramos, em que estes sejam escolhidos de acordo com seu máximo peso possível. Em outras palavras, o problema pode ser considerado como um problema de árvore geradora máxima.

Para os valores dos pesos de cada aresta ou ramo dos sistemas é utilizada a potência aparente, calculada resolvendo um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados. Em um sistema malhado a potência aparente calculada seria a potência ideal, porém, os sistemas de distribuição de

energia elétrica operam de forma radial, e, portanto, os ramos mais adequados para formar essa topologia radial seriam aqueles em que a potência aparente é maior. Considerando o exposto, o sistema sofrerá a menor perturbação possível, e o valor total das perdas que forneça o algoritmo será a mais aproximada ao ótimo global do sistema malhado.

Os passos para a geração da solução inicial obtida pelo algoritmo utilizado, consistem, primeiramente, em uma etapa preliminar onde são obtidas as potências aparentes de cada ramo com a resolução de um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados. O algoritmo inicia com todos os ramos abertos e com os pesos definidos como a potência aparente de cada ramo. Para iniciar o processo é escolhido o nó da subestação, o qual deve ser marcado. Depois, são seguidos os seguintes passos:

1. Identificar os ramos ligados aos nós marcados;
2. Verificar os nós terminais dos ramos identificados que não estejam marcados e que não gerem malha com os ramos já adicionados, e procurar pelo ramo com maior peso;
3. Incluir ao sistema o ramo com o maior peso e marcar seu nó terminal.

Voltar ao passo 1 e repetir até não tiver nenhum nó desmarcado.

Ao final do algoritmo, é calculada a função objetivo para a topologia radial gerada resolvendo o problema de fluxo de carga radial.

No algoritmo mostrado acima, é fechada em cada passo uma chave do sistema, considerando o peso do ramo correspondente à informação da potência aparente que circula pelas linhas do sistema. É de salientar que o algoritmo de Prim seria um algoritmo exato para o problema de RSDEE desde que os pesos das arestas sejam exatamente conhecidos, o qual depende de que os pesos nas suas arestas sejam os ideais para alcançar o ótimo global sempre que for implementado. Porém, no problema de RDSEE essa informação não se conhece, e o uso dos fluxos de potência aparente do sistema malhado como pesos, fornece apenas uma solução inicial de boa qualidade com um esforço computacional insignificante. Portanto, pode ser gerada uma solução de boa qualidade usando os valores de fluxo de potência aparente do sistema malhado como se fossem os “pesos ideais” dos ramos.

O algoritmo de Prim apresentado para gerar somente soluções radiais possibilita que sejam obtidas todas as árvores geradoras (sistemas) possíveis, assim, qualquer solução da região factível do problema de RSDEE com relação à restrição de radialidade pode ser obtida. Para gerar outras soluções de qualidade e, eventualmente, a solução ótima, pode-se realizar pequenas perturbações nos “pesos ideais” (valores de fluxo de potência aparente do sistema malhado) e processar novamente o algoritmo de Prim. Este procedimento consiste em fazer uma variação aleatória dos pesos dos ramos, ou seja, dos fluxos de potência aparente em cada ramo, gerando múltiplos sistemas radiais diferentes, e resolvendo tantos fluxos de carga radiais quanto soluções aleatórias obtidas até chegar à melhor solução possível.

Novos pesos podem ser encontrados usando a relação: $S' = S \pm \%S$, com uma porcentagem de variação aleatória definida entre 0% e 10%. A porcentagem entre 0% e 10% foi determinada depois de realizar vários testes com perturbações desde $\pm 5\%$ até $\pm 25\%$ e verificar que os melhores resultados para os sistemas foram encontrados com o valor percentual definido acima.

B. Cálculo da função objetivo e verificação das restrições

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário aplicar um algoritmo de fluxo de carga rápido para sistemas de distribuição radiais, o qual calcula as tensões em todas as barras e as correntes em todos os ramos. O valor das perdas ou função objetivo, para cada topologia radial gerada, pode ser calculada usando:

$$v = \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^2 \quad (12)$$

As restrições de balanço de potência (2) e (3) são satisfeitas pelo algoritmo de fluxo de carga radial e portanto não precisam ser analisadas. As restrições de tensão mínima nas barras e das de correntes nos ramos devem ser verificadas, porém, como todas as soluções são encontradas a partir de uma solução inicial de boa qualidade, as demais soluções geradas são, em sua maioria, factíveis e por tanto as poucas topologias radiais identificadas como infactíveis, são eliminadas do processo.

C. Representação de uma proposta de solução

A proposta válida da operação de ramos está baseada primeiramente na condição que a topologia ou configuração do sistema deve ser sempre uma topologia radial. O problema de RSDEE apresenta variáveis do tipo binário no que se refere à operação ou não operação dos ramos do sistema, portanto, uma proposta simples consiste nos ramos que devem estar operando (chaves de interconexões fechadas) ou que devem estar fora de operação (chaves de interconexões abertas).

Para analisar a proposta obtida dos ramos que vão fazer parte do sistema radial, é necessário primeiro considerar que existem configurações radiais que devem ser descartadas porque violam restrições operacionais, as quais só podem ser conhecidas depois de resolver o fluxo de carga radial para calcular as perdas e verificar as restrições operacionais do problema. Como foi descrito anteriormente, o algoritmo de Prim fornece a informação da topologia radial obtida que pode ser vista como um arranjo vetorial em que são fixados um conjunto de $nb - 1$ variáveis cujo valor corresponde a $x_{ij} = 1$ e que representam uma topologia radial, e as restantes que tomam o valor de $x_{ij} = 0$, as quais representam os ramos fora de operação.

Considerando a informação fornecida pelo algoritmo de Prim, uma proposta de codificação pode ser feita através de um vector C em que as variáveis que tomam o valor de 0, ou seja, aquelas que correspondem às chaves abertas, estão contidas no vector de codificação. Desta maneira é cumprida sempre a restrição de radialidade (6), garantindo que as propostas de solução sejam sempre factíveis topologicamente. Assim, para

o sistema de 14 barras mostrada na Figura 2, a topologia é codificada como apresentado na Figura 3:

C	14	15	16
---	----	----	----

Figura 3. Codificação.

O vetor C sempre será do tamanho correspondente ao número de ramos ou chaves de interconexões abertas no sistema. Desta forma, o vetor de codificação será compacto e estará fornecendo simultaneamente a informação do número total de chaves abertas, o ramo correspondente a cada chave aberta e também o número de laços existentes no sistema.

D. Melhoria local

A melhoria local é a segunda fase do método multipartida. Esta fase tem como objetivo tentar melhorar a solução encontrada na fase construtiva para obter uma melhor função objetivo. A proposta consiste em fazer uma busca local através da troca de ramos.

Nesta etapa consideram-se os ramos que ficaram desligados do sistema na primeira fase (geração da solução inicial radial) e os laços aos quais pertencem. Desta forma, propõe-se fechar o ramo que se encontra aberto, enquanto um dos ramos adjacentes ou vizinhos dentro do laço correspondente é desligado, conservando a configuração radial. Isto é feito para cada vizinho adjacente.

Por exemplo, no sistema da Figura 2, podem-se identificar 3 laços independentes: L_1 formado pelos ramos 1, 2, 14, 8, 6 e 5; L_2 formado por 5, 7, 15, 11 e 10; e L_3 formado por: 1, 3, 4, 16, 13, 12 e 10. A proposta de vizinhanza consiste então em fechar o ramo de ligação de um laço, por exemplo o ramo 14 do laço L_1 , e abrir um ramo deste laço (2 ou 8) para conservar a topologia radial.

A técnica para a melhoria local está constituída pelos seguintes passos:

1. Introduzir no sistema o ramo desligado na fase construtiva e identificar o laço formado por este ramo;
2. Retirar os ramos (um ramo por vez) que estão diretamente conectados ao ramo que foi introduzido no sistema no passo 1 (adjacentes ou vizinhos do lado esquerdo e direito);
3. Calcular as perdas de cada nova configuração e comparar com o valor da função objetivo inicial, chamada de solução corrente. Caso exista uma melhor função objetivo, atualizar a solução corrente, atualizar a configuração do sistema, e ir ao passo 4. Caso contrário, passar ao seguinte laço e voltar ao passo 1;
4. Introduzir o ramo retirado no passo anterior (com melhor função objetivo), abrir os ramos adjacentes de ambos lados (um por vez) e voltar ao passo 3.

Repetir os passos até que todos os laços do sistema tenham sido analisados. Para calcular as perdas ativas do sistema (função objetivo) foi utilizado um fluxo de carga radial. A melhoria local termina quando não for encontrada uma melhor solução.

De forma geral, e considerando os procedimentos e algoritmos descritos anteriormente, um fluxograma para a metodologia multipartida é mostrado na Figura 4.

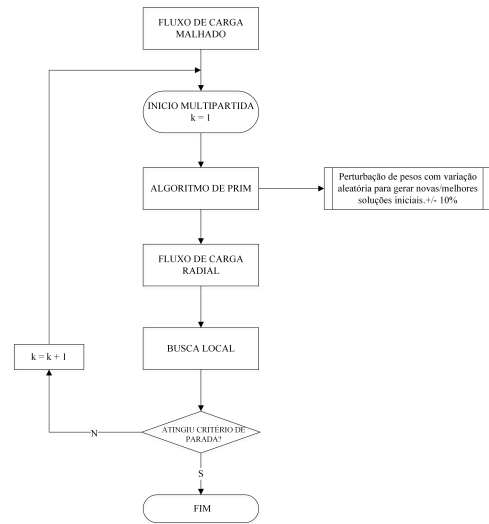


Figura 4. Metodologia Multipartida.

Foram definidos dois critérios de parada. O primeiro consiste em atingir 25 iterações. O segundo, quando a melhor solução não melhore após 5 iterações consecutivas. Em qualquer caso, o algoritmo para, e a melhor solução é entregue pela metodologia multipartida.

V. RESULTADOS

A metodologia e os algoritmos desenvolvidos foram escritos em linguagem de programação C++ e todos os testes foram feitos utilizando um processador Intel Core 5 de 2,50 GHz e 4,27 GB de memória RAM. Os sistemas utilizados para validar as metodologias são: o sistema de 14 barras apresentado em [3], sistema de 33 barras apresentado em [4], e o sistema de 84 barras apresentado em [6]. A metodologia considera que todos os ramos possuem chaves de interconexões. Assume-se como limite mínimo de tensão no sistema 0,93 pu.

O valor inicial das perdas ativas para cada sistema, aquelas obtidas com a configuração dada pelo algoritmo de Prim, o melhor valor de perdas obtidas com a perturbação dos pesos e o valor de perdas final depois da aplicação da metodologia multipartida, são apresentadas na Tabela I. A perturbação dos pesos (valores de potência aparente) faz parte do processo construtivo (primeira etapa da metodologia multipartida), e foi feita de maneira aleatória, com porcentagens entre 0% e 10% para encontrar valores de perdas de melhor qualidade a partir da solução inicial gerada pelo algoritmo de Prim, verificando a eficiência do algoritmo construtivo.

Tabela I
VALOR DE PERDAS PARA CADA SISTEMA TESTADO [kW]

	14 barras	33 barras	84 barras
Inicial	511,430	202,677	531,998
Prim	466,127	140,706	471,730
Perturbação	466,127	139,551	470,863
Multipartida	466,127	139,551	469,880

A melhoria dos resultados obtidos com o algoritmo de Prim para os sistemas de 14, 33 e 84 barras, em relação às perdas iniciais correspondem a 8,858%, 30,576% e 11,329%

respetivamente. Para o sistema de 14 barras, o resultado do Prim, da perturbação dos pesos e da metodologia multipartida em geral, é igual.

Em relação às perdas calculadas com a perturbação aleatoria dos pesos para os outros dois sistemas, as porcentagens de melhora são 31,146% e 11,492%, respetivamente. Por último, o percentual de perdas da metodologia em geral, em relação ao valor inicial para os sistemas de 33 e 84 barras é de 31,146% e 11,676%.

Na Tabela II é apresentado o tempo computacional demandado pelo algoritmo de Prim, que considera a construção da árvore de peso máximo (configuração radial), mais o tempo demandado pelo cálculo do fluxo de carga radial. O tempo computacional demandado pela perturbação dos pesos durante 200 iterações, onde cada iteração compreende a geração de uma solução radial mais o cálculo das perdas, e o tempo demandado pela metodologia multipartida, onde uma iteração compreende desde a geração da solução inicial até a busca local.

Tabela II
TEMPOS COMPUTACIONALES DEMANDADOS [S/ITERAÇÃO]

	14 barras	33 barras	84 barras
Prim	<0,001	<0,001	0,004
Perturbação	<0,001	<0,001	0,005
Multipartida	<0,001	<0,001	0,015

Uma das consequências desejáveis da RSDEE é que o perfil de tensões nas barras melhore. Na Tabela III são apresentadas as tensões mínimas para cada sistema, tanto da configuração inicial quanto as configurações encontradas pelo algoritmo de Prim e a metodologia multipartida geral.

Tabela III
TENSÕES MÍNIMA PARA CADA SISTEMA [P.U.]

	14 barras	33 barras	84 barras
Inicial	0,9693	0,9131	0,9285
Prim	0,9716	0,9414	0,9517
Multipartida	0,9716	0,9378	0,9532

Contudo, as chaves abertas na configuração inicial e as chaves abertas nas configurações obtidas com o algoritmo de Prim e com a meta-heurística multipartida completa, são mostradas na Tabela IV. As configurações obtidas para os sistemas de 33 e 84 barras coincidem com as configurações obtidas em [1].

Tabela IV
CHAVES ABERTAS DE CADA SISTEMAS RADIAL

	14 barras	33 barras	84 barras
Inicial	14, 15, 16	33, 34, 35, 36, 37	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96
Prim	7, 8, 16	7, 10, 14, 28, 32	7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92
Multipartida	7, 8, 16	7, 9, 14, 32, 37	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92

VI. CONCLUSÕES

A proposta de usar o algoritmo Prim com “pesos modificados” se tornou muito eficiente para gerar topologias radiais

diversificadas e, portanto, fornecendo uma estratégia eficiente para a fase inicial da metodologia multipartida.

Com os resultados obtidos, verifica-se que a metodologia multipartida é uma metodologia eficiente para a resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica visando a minimização das perdas ativas, apresentando um bom desempenho e encontrando excelentes resultados para sistemas tanto de pequeno como de grande porte.

REFERÊNCIAS

- [1] Lavorato, M. and Franco, J.F. and Rider, M.J. and Romero, R., “Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems,” *IEEE Trans. Power Syst.* vol.27, no.1, pp.172-180, 2012.
- [2] Merlin, A. and Back, H., “Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system,” in *Proc. of the Fifth Power System Conference (PSCC)*, Cambridge, vol., no., pp.1-18, 1975.
- [3] Civanlar, Seyhan and Grainger, JJ and Yin, H and Lee, SSH., “Distribution feeder reconfiguration for loss reduction,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.3, no.3, pp., 1988.
- [4] Baran, M.E. and Wu, F.F., “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.4, no.2, pp.1401-1407, 1989.
- [5] Shirmohammadi, D. and Hong, H.W., “Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.4, no.2, pp.1492-1498, 1989.
- [6] Ji-Pyng Chiou and Chung-Fu Chang and Ching-Tzong Su, “Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.* vol.20, no.2, pp.668-674, 2005.
- [7] Mendoza, J. and Lopez, R. and Morales, D. and Lopez, E. and Dessante, P. and Moraga, R., “Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application,” *IEEE Trans. Power Syst.* vol.21, no.2, pp.948-954, 2006.
- [8] Carreño, E.M. and Moreira, N. and Romero, R., “Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm,” in *Power Engineering Society General Meeting*, 2007. IEEE, vol., no., pp.1-6, Jun. 2007.
- [9] Glover, Fred, “Heuristics for integer programming using surrogate constraints,” in *Decision Sciences*, vol.8, no.1, pp.156-166, 1977.
- [10] Glover, Fred, “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence,” in *Computers & operations research*, Elsevier, vol.13, no.5, pp.533-549, 1986.
- [11] Glover, Fred, “Multi-start and strategic oscillation methods—principles to exploit adaptive memory,” *Computing Tools for Modeling, Optimization and Simulation*, Springer, 2000, ch., pp.1-23.
- [12] Feo, Thomas A and Resende, Mauricio GC., “Greedy randomized adaptive search procedures,” in *Journal of global optimization*, vol.6, no.2, pp.109-133, 1995.
- [13] Martí, Rafael, “Multi-start methods,” *Handbook of metaheuristics*, Springer, 2003, ch., pp.355-368.
- [14] Muth, John F and Thompson, Gerald Luther, “Industrial scheduling,” Prentice-Hall, 1963, ch., pp.
- [15] Held, Michael and Karp, Richard M., “The traveling-salesman problem and minimum spanning trees,” in *Operations Research*, 1970. INFORMS, vol.18, no.6, pp.1138-1162, 1970.
- [16] Senju, Shizuo and Toyoda, Yoshiaki, “An approach to linear programming with 0-1 variables,” in *Management Science*, 1968. JSTOR, vol., no., pp.B196-B207, 1968.
- [17] Kochenberger, Gary A and McCarl, Bruce A and Paul Wyman, F., “A heuristic for general integer programming,” in *Decision Sciences*, 1974. Wiley Online Library, vol.5, no.1, pp.36-44, 1974.
- [18] Herrera, Francisco, “Introducción a los algoritmos metaheurísticos,” *Ciencias de la Computación e IA*, 2006.
- [19] Mantovani, José RS. and Casari, Fernando and Romero, Rubén A., “Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão,” in *Controle & Automação*, vol., no., pp.150-159, 2000.