

Algoritmo BVNS Aplicado no Problema de Restauração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica, considerando Programa de Resposta da Demanda

A. M. COSSI^{1*} e G. F. AFONSO²

Recebido em 11 de fevereiro de 2022 / Aceito em 14 de novembro de 2023

RESUMO. Neste trabalho é proposto um modelo baseado na técnica de solução BVNS (*Basic Variable Neighborhood Search*) para solucionar o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando no modelo a participação de clientes que fazem parte de um programa de resposta à demanda e que podem contribuir no processo de restauração permitindo que uma quantidade de suas cargas seja desligada pela concessionária. O modelo matemático consiste em minimizar o custo de energia não distribuída no sistema devido às seções não restauradas, somado aos custos de remuneração dos clientes que fazem parte do programa de resposta à demanda, sujeito às restrições técnicas, físicas e operacionais de redes de distribuição. Trata-se de um problema de programação não-linear inteira mista em que as propostas de soluções são obtidas através do algoritmo BVNS. A estrutura de vizinhança do algoritmo BVNS é baseada na técnica Representação Nó-profundidade. Nesse processo de restauração, realizado pelo algoritmo BVNS, para cada solução avaliada, caso alguma restrição seja violada, um Algoritmo Genético é processado para realizar cortes de cargas nas seções com clientes que fazem parte do programa de resposta à demanda. Para testar a eficiência do modelo proposto, apresentam-se resultados de testes em um sistema de distribuição de 53 seções.

Palavras-chave: restauração de redes, busca básica em vizinhança variável, programa de resposta à demanda.

1 INTRODUÇÃO

O problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica (PRSDDE) consiste em restabelecer o sistema energizando regiões da rede que ficaram sem energia elétrica devido a interrupções permanentes (faltas permanentes) na rede [14]. Devido a essas interrupções, para manter a qualidade do fornecimento de energia para os consumidores e conseqüentemente não

*Autor correspondente: A. M. Cossi – E-mail: antonio.cossi@unesp.br

¹Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Alameda Rio de Janeiro, 266, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil – E-mail: antonio.cossi@unesp.br <https://orcid.org/0000-0003-1005-6246>

²Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Alameda Rio de Janeiro, 266, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil – E-mail: guilhermeflorindoafonso@gmail.com

descumprir as metas referentes aos índices de qualidade estabelecidos pelos órgãos reguladores, as concessionárias de energia vêm investindo no estudo de modelos e técnicas para o desenvolvimento de ferramentas capazes de minimizar custos desnecessários e melhorar os índices de qualidade dos serviços prestados aos consumidores. Este fato justifica os investimentos no desenvolvimento de modelos para resolver o PRSDEE de forma eficiente, já que o descumprimento das metas de qualidade acarretaria em multas para a concessionária de energia [14].

Neste trabalho, o PRSDEE consiste em restabelecer o sistema através de uma topologia de rede que restaure o maior número possível de seções após a interrupção no fornecimento de energia elétrica. O objetivo é minimizar o custo da energia não distribuída no sistema devido às seções que não foram restabelecidas após o processo de restauração, somado aos custos de remuneração de clientes que fazem parte de um programa de resposta à demanda (PRD) [2, 5]. Neste caso, os clientes que fazem parte do PRD contribuem com o processo restaurativo disponibilizando um montante de suas cargas que podem ser desligadas pela concessionária, aumentando assim as chances de que uma quantidade maior de seções de cargas seja restaurada. A escolha e avaliação das seções com clientes que fazem parte do PRD e que terão cargas desligadas é feita através da execução de um modelo de corte de carga que utiliza como técnica de solução um Algoritmo Genético (AG) [6, 13]. Optou-se por utilizar o AG para promover o corte de carga devido as características do problema de otimização, o qual utiliza um sistema de codificação binária. O AG se adapta muito bem na resolução de problemas desse tipo e consegue encontrar soluções satisfatórias, de forma otimizada.

O modelo proposto para o PRSDEE consiste em resolver um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), em que cada proposta de solução topológica da rede é obtida através do algoritmo BVNS (*Basic Variable Neighborhood Search*) [7]. A estrutura de vizinhança do BVNS é baseada na técnica RNP (Representação Nó-Profundidade) através da quantidade de podas na rede [10], alterando assim sua estrutura topológica. Além disso, o procedimento de busca local utilizado pelo algoritmo para promover a mudança na estrutura de vizinhança consiste em aplicar podas nas seções afetadas pelas faltas de energia utilizando um dos operadores da RNP. O funcionamento da técnica RNP, bem como de seus operadores pode ser estudado em [10]. Para resolver o PRSDEE utilizando o algoritmo BVNS, para cada solução do conjunto de vizinhança do algoritmo, caso alguma restrição seja violada, executa-se o AG para efetuar o corte de carga nas seções com clientes inscritos no PRD. O modelo desenvolvido para o PRSDEE e para o corte de carga foi implementado utilizando a linguagem de programação C++ e sistema operacional Windows.

O algoritmo BVNS é uma extensão do algoritmo VNS (*Variable Neighborhood Search*), que integra as características do algoritmo VND (*Variable Neighborhood Descent*), o qual permite encontrar soluções ótimas de qualidade, e do algoritmo RVNS (*Reduced Variable Neighborhood Search*) que permite encontrar novas regiões promissoras a partir de um ótimo local, sendo estas outras duas extensões, também, do algoritmo VNS. Assim, o algoritmo BVNS é mais eficiente combinando a busca local com mudanças sistemáticas de estruturas de vizinhança em torno do ótimo local [7].

O PRD adotado neste trabalho é baseado em incentivos [2, 5], através de contratos entre cliente e concessionária, de forma que esses clientes contribuam com reduções necessárias de cargas em períodos críticos. Neste caso, os participantes do PRD são remunerados financeiramente de acordo com a quantidade de carga reduzida (desligada) e em relação ao período do dia em que a redução ocorreu, independentemente do tempo em que ficou desligada. Trata-se de um programa de controle direto da carga em que a concessionária possui permissão de desligar equipamentos do cliente remotamente, reduzindo assim o seu consumo para um nível pré-determinado em situações de necessidade para a rede, como por exemplo, em casos de faltas permanentes no sistema.

Na literatura encontram-se diversos trabalhos que utilizam diferentes técnicas de solução para resolver o PRSDEE. Dentre as propostas existentes, podemos destacar os trabalhos que utilizam os métodos heurísticos [9, 12] e metaheurísticos [1, 14], para a solução do problema. Dentre os trabalhos citados, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por [8, 14] que utilizam a metaheurística Tabu Search (TS) para resolver o PRSDEE. Em [14] a estrutura de vizinhança do algoritmo TS é baseada na técnica RNP. Ressalta-se que não foi encontrado na literatura, até o presente momento, trabalhos que tratam simultaneamente do PRSDEE associado ao PRD.

A contribuição deste trabalho, além do desenvolvimento de um modelo eficiente para resolver o PRSDEE, é avaliar a presença de um PRD que contribua com o processo restaurativo aumentando as chances de que mais seções de cargas sejam restauradas, bem como a aplicação da metaheurística BVNS associada à técnica RNP para resolver este tipo de problema, que é uma novidade na resolução do PRSDEE.

Para testar o modelo proposto para o PRSDEE, apresentam-se resultados de um sistema de distribuição de média tensão contendo 50 seções de cargas, alimentadas por 3 subestações. Cada seção de carga é composta por um conjunto de consumidores. Os dados do sistema foram extraídos de [8]. Além disso, para mostrar a eficiência do modelo proposto, faz-se uma comparação com os resultados apresentados em [8].

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 apresenta-se em detalhes a formulação matemática e o algoritmo BVNS desenvolvido para resolver o PRSDEE; na Seção 3 descreve-se o modelo de corte de carga que utiliza como técnica de solução um AG; na Seção 4 apresentam-se os resultados e comentários dos testes; e na Seção 5 as conclusões finais do trabalho.

2 MODELO DO PRSDEE

No modelo desenvolvido para resolver o PRSDEE utilizando o algoritmo BVNS, para cada vizinho avaliado pelo algoritmo, caso a solução não seja factível devido a violação de alguma restrição, executa-se o AG para efetuar o corte de carga nas seções com clientes que fazem parte do PRD. A melhor solução será aquela que conseguir religar o máximo de seções afetadas pela falta de energia, com ou sem a realização do corte de carga de clientes que fazem parte do PRD.

A seguir, descreve-se o modelo matemático do PRSDEE, bem como o algoritmo BVNS para resolver o PRSDEE.

2.1 Modelo Matemático

O PRSDEE é formulado como um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), descrito pelas equações e inequações a seguir.

$$\text{Min } F_{CR} = C_{END} + C_{PRD} \tag{2.1}$$

$$C_{END} = \sum_{k \in \Omega_{CD}} R_{CD} \cdot P_{CD_k} \cdot Y_{CD_k} \tag{2.2}$$

$$C_{PRD} = \sum_{k \in \Omega_{PRD}} R_{PRD_k} \cdot P_{PRD_k} \tag{2.3}$$

$$R_{PRD_k} = R_{CC} \cdot \left(\frac{DIC}{DEC} \right)_k \tag{2.4}$$

$$S_s^{max} \geq \sum_{k \in \Omega_N} S_{C_k}^s + \sum_{k \in \Omega_{NCD}} S_{CD_k}^s + \sum_{k \in \Omega_{NI}} S_{P_{km}}^s, \quad \forall s \in \Omega_{Nsec} \tag{2.5}$$

$$f_{km} \leq f_{km}^{max}, \quad \forall km \in \Omega_{NI} \tag{2.6}$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max}, \quad \forall k \in \Omega_{Nsec} \tag{2.7}$$

$$\sum_{km \in \Omega_{NI}} \omega_{km} = NS - 1 \tag{2.8}$$

$$Y_{CD_k}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x = 0 \\ 1, & \text{se } x = 1 \end{cases} \tag{2.9}$$

A Equação (2.1) é a função objetivo do PRSDEE, a qual procura minimizar o custo total F_{CR} de restauração. O custo total F_{CR} é a soma do custo total C_{END} da energia não distribuída, devido às seções que não foram restabelecidas, com o custo total C_{PRD} de remuneração de clientes que fazem parte do PRD, devido à quantidade de cargas desligadas desses clientes. A Equação (2.2), que calcula o custo total C_{END} da energia não distribuída, representa o somatório da demanda P_{CD} , em kVA, de cada seção k da rede afetada pela falta, exceto a própria seção em que ocorreu a falta, multiplicada pela taxa R_{CD} , em \$/kW, de remuneração individual devido às cargas que permaneceram desligadas após o processo de restauração. A Equação (2.3), que calcula o custo total C_{PRD} de remuneração de clientes que fazem parte do PRD, representa o somatório da demanda P_{PRD} , em kW, dos clientes de cada seção k da rede que fazem parte do PRD, multiplicada pela taxa R_{PRD} , em \$/kW, de remuneração da compensação individual de clientes com cargas cortadas. A taxa R_{PRD} , que é calculada pela Equação (2.4), considera o custo da taxa R_{CC} do kW interrompido devido ao desligamento, multiplicado pelo fator DIC/DEC que remunera os clientes de acordo com a qualidade do serviço prestado pela concessionária.

As inequações (2.5) a (2.7) e as equações (2.8) e (2.9), representam as restrições do problema. Assim, a Inequação (2.5) refere-se à restrição que estabelece que a capacidade de potência S_s^{max} disponível em cada subestação S deve ser suficiente para atender, durante o estado restaurativo, as demandas S_C de cada seção k do sistema, exceto as seções afetadas pela falta permanente e a seção do defeito, mais as demandas S_{CD} de cada seção k restaurada, mais as perdas elétricas

S_P em cada ramal do sistema, ambas as demandas em kVA. A Inequação (2.6) analisa se o fluxo de corrente f em cada ramo km do sistema é menor que o limite máximo de fluxo de corrente f^{max} permitido para cada ramo. A Inequação (2.7) verifica se a tensão V de cada seção k do sistema, no estado restaurativo, está dentro dos limites de tensão mínimo V^{min} e máximo V^{max} preestabelecidos pelas agências reguladoras. A Equação (2.8) avalia se o sistema constitui uma topologia radial após o estado restaurativo. Ressalta-se que o sistema de vizinhança do algoritmo BVNS, utilizando a técnica RNP, já garante que o sistema se mantenha radial após o estado restaurativo. Por fim, a Equação (2.9) representa o estado $CD(x)$ em que se encontra a seção k da rede afetada pela falta após a restauração (ligada ou desligada do sistema), sendo $CD(x)=0$ para seção ligada e $CD(x)=1$ para seção desligada.

em que: Y_{CD} é a variável que indica se a seção foi restabelecida ou não (1 para seção não restabelecida e 0 para seção restabelecida); Y_{PRD} é a variável que indica se a seção sofreu corte de carga ou não devido ao programa de resposta à demanda (1 para seção com corte de carga e 0 para seção sem corte de carga); Ω_{CD} é o conjunto de seções desligadas após a falta permanente; DIC é a duração de interrupção individual por unidade consumidora, expressa em horas; DEC é a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas; Ω_{PRD} é o conjunto de seções com clientes que fazem parte do PRD; Ω_{Nsec} é o conjunto de todas as seções do sistema, exceto as seções afetadas pela falta e as próprias seções onde ocorreram as faltas; Ω_{Nsub} é o conjunto de subestações do sistema; Ω_{NI} é o conjunto de ramais do sistema; NS indica a dimensão do conjunto de seções do sistema; ω_{km} é a variável binária que indica o estado do ramo km (1 para ramo ativo e 0 para ramo inativo).

2.2 Algoritmo BVNS

Para a solução do PRSDEE é proposto um algoritmo BVNS [7], com um procedimento de busca local para promover mudanças na estrutura de vizinhança, baseada na técnica RNP. A estrutura de vizinhança procura promover alterações topológicas necessárias na rede para restabelecer o máximo possível de consumidores que ficariam sem energia no caso de interrupções permanentes na rede. Para tal, a RNP utiliza podas no sistema através de dois operadores [10]: PAO (*Preserve Ancestor Operator*) e CAO (*Change Ancestor Operator*). Nesse trabalho, os operadores PAO e CAO são utilizados para gerar as estruturas de vizinhança do BVNS e o operador PAO é utilizado no procedimento de busca local na estrutura de vizinhança.

A seguir, apresentam-se em detalhes as particularidades do algoritmo BVNS desenvolvido para resolver o PRSDEE.

2.2.1 Configuração inicial

A configuração inicial é gerada através de uma heurística simples que consiste em religar seções desenergizadas (exceto a seção da falta) através de seções vizinhas energizadas, sendo essa escolha de forma aleatória. Neste caso, todas as seções desenergizadas (exceto a seção da falta) são

religadas por outra seção energizada, mesmo que a configuração topológica obtida não constitua uma solução factível.

2.2.2 Estrutura de vizinhança e sistema de codificação

A estrutura de vizinhança do algoritmo BVNS é baseada na quantidade de podas feita pelos operadores da RNP, PAO e CAO, entre alimentadores que possuem seções afetadas pela falta e seus vizinhos, e assim sucessivamente, da seguinte forma:

- Vizinhança N_1 : realiza 1 poda no sistema entre alimentadores;
- Vizinhança N_2 : realiza 2 podas no sistema entre alimentadores;
- Vizinhança N_3 : realiza 3 podas no sistema entre alimentadores;
- Vizinhança N_k : realiza k podas no sistema entre alimentadores;

Para essa estrutura de vizinhança são feitas as seguintes considerações:

1. Escolha do operador: as chances de escolha do operador PAO é de 70% e do operador CAO de 30%. As chances de podas utilizando o operador CAO é menor do que do operador PAO para evitar muitas alterações bruscas na topologia da rede e os valores foram adotados baseados nas simulações;
2. Número máximo de podas (k_{max}): é definido pela quantidade máxima de possibilidades de ramais de ligação (chaves NA) entre os alimentadores que contêm as seções afetadas pela falta e os seus vizinhos. O valor de k_{max} pode ser diferente para cada falta.

As Figuras 1 e 2 ilustram a aplicação dos operadores PAO e CAO, respectivamente, em um sistema contendo 2 subestações e 5 alimentadores. Neste sistema, considere uma falta na seção 1, afetando as seções 2 e 6, ambas inicialmente pertencentes a um dos alimentadores da subestação 10. Neste caso, a seção 1 foi isolada e as seções 2 e 6 remanejadas para outro alimentador da subestação 12.

Na Figura 1, com a aplicação do operador PAO, abriu-se a chave ch_9 e fechou-se a chave ch_{12} , alterando assim a topologia do sistema. O operador PAO realiza alterações simples na rede, abrindo e fechando chaves adjacentes. Na Figura 2, com a aplicação do operador CAO, abriu-se a chave ch_{14} e fechou-se a chave ch_{12} . O operador CAO realiza alterações mais bruscas na rede, abrindo e fechando chaves não adjacentes.

A estratégia do algoritmo BVNS e a escolha aleatória do vizinho x evita o processo de ciclagem e permite encontrar ótimos locais distantes da solução incumbente.

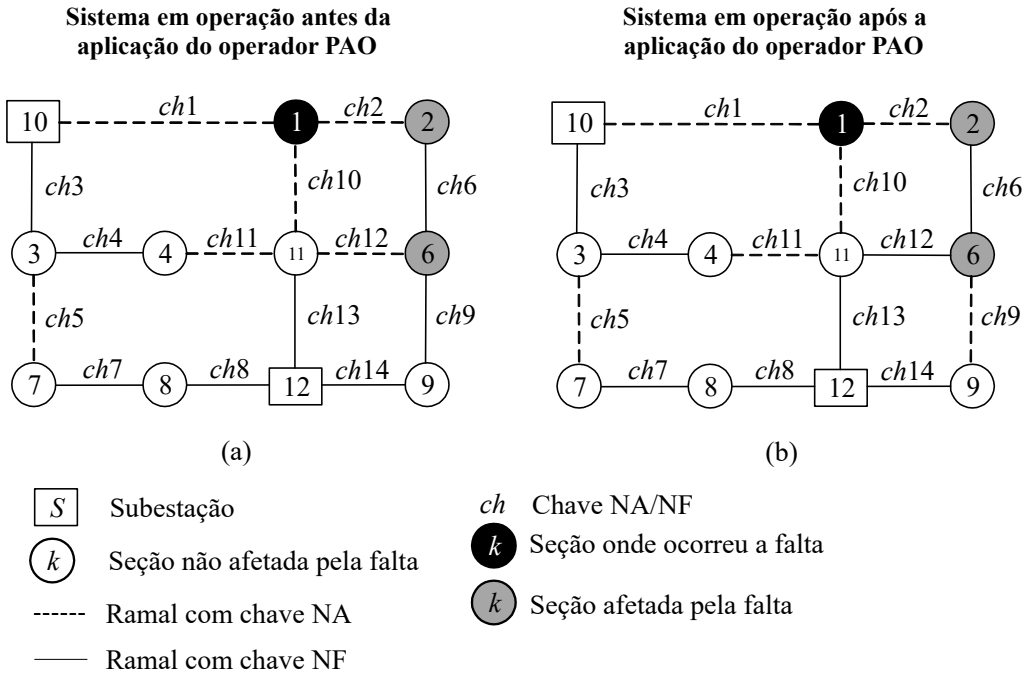


Figura 1: Exemplo de aplicação do operador PAO.

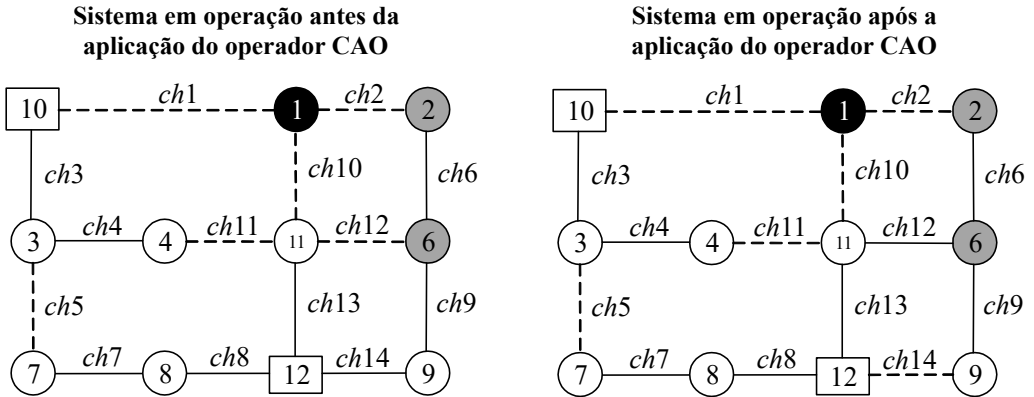


Figura 2: Exemplo de aplicação do operador CAO.

2.2.3 Procedimento de busca local

O procedimento de busca local, realizado para mudança na estrutura de vizinhança, é feito através da aplicação somente do operador PAO. Neste caso, as podas realizadas por esse operador, para alterar as estruturas topológicas da rede, ocorrem somente nas seções afetadas pela falta através da abertura e fechamento de chaves de manobras adjacentes, sendo essa escolha de forma aleatória. Assim, um vizinho na busca local seria uma nova topologia diferente da topolo-

gia corrente no que se refere ao estado das chaves de manobras ligadas a uma das seções afetada pela falta.

Para exemplificar o procedimento de busca local, vamos analisar os vizinhos da seção 6 (seção afetada pela falta na seção 1) da Figura 3, a qual mostra a possibilidade de três vizinhos que podem ser escolhidos de forma aleatória através do operador PAO, da seguinte maneira:

- Vizinho 1: abertura da chave ch_9 e fechamento da chave ch_{12} ;
- Vizinho 2: abertura da chave ch_9 e fechamento da chave ch_{17} ;
- Vizinho 3: abertura da chave ch_9 (seções 2 e 6 ficariam desligadas).

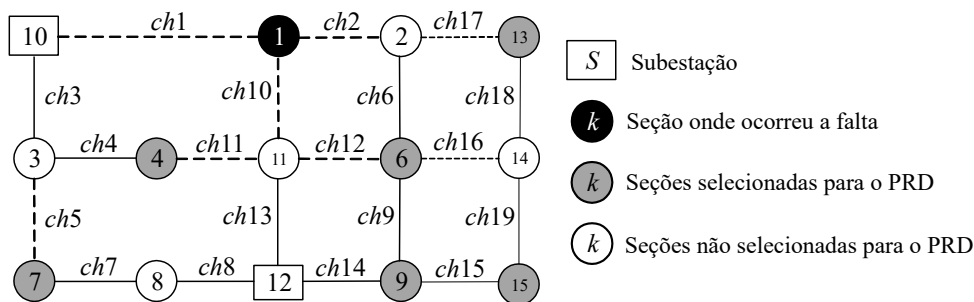


Figura 3: Exemplo do procedimento de busca local.

2.2.4 Avaliação das soluções

Cada proposta de solução é avaliada através da função objetivo, representada pela Equação (2.1). A função dada pela Equação (2.1) é composta pelo custo total da energia não distribuída, Equação (2.2), devido às seções que não foram restabelecidas após aplicação do algoritmo BVNS, somado ao custo total da compensação aos clientes que fazem parte do PRD, Equação (2.3), devido ao corte de carga após a aplicação do AG.

O algoritmo BVNS procura encontrar a melhor solução avaliando apenas o custo da energia não distribuída, conforme Equação (2.2). No entanto, para cada solução do BVNS que contenha seções que não foram restabelecidas devido restrições violadas, o PRD é acionado para efetuar corte de cargas através do AG e tentar religar o máximo possível de seções. Neste caso, teremos uma solução que apresenta o custo da energia não distribuída, obtido pela Equação (2.2), somado ao custo devido ao acionamento do PRD, obtido pela Equação (2.3). Para calcular os parâmetros da rede elétrica e avaliar as restrições, é utilizado um fluxo de carga para redes radiais de média tensão [11].

Ressalta-se que todas as soluções encontradas pelo modelo de otimização são armazenadas no conjunto de soluções e ordenadas por qualidade. Assim, o operador do sistema poderá escolher a solução mais conveniente para resolver o PRSDEE dos pontos de vista técnico e econômico.

2.2.5 Critério de parada

O critério de parada adotado para o algoritmo BVNS é o número máximo de iterações, determinado de acordo com o tamanho do PRSDEE.

2.2.6 Funcionamento do algoritmo BVNS

No PRSDEE, o algoritmo BVNS funciona da seguinte forma: 1) deve-se escolher o conjunto de estruturas de vizinhança $N_k(x)$. Para o problema do PRSDEE a estrutura de vizinhança é definida pela quantidade k de podas, feitas através dos operadores PAO e CAO. Além disso, a quantidade máxima (k_{max}) de estruturas de vizinhança é definida pela quantidade de possibilidades de ligações (chaves NA) entre os alimentadores que contêm seções afetadas pela falta e seus vizinhos; 2) o processo se inicia com uma solução $x \in X$ na primeira vizinhança $N_1(x)$. No PRSDEE a solução inicial x é gerada utilizando o método heurístico descrito na Subseção 2.2.1, que consiste em ligar as seções desenergizadas (exceto a seção da falta) através de seções energizadas; 3) em seguida, gera-se de forma aleatória um vizinho x' de x em $N_1(x)$. O vizinho x' é gerado utilizando o operador PAO ou CAO, sendo essa escolha de forma aleatória, conforme descrito na Subseção 2.2.2; 4) a partir de x' é iniciado um processo de busca local para encontrar um ótimo local x'' . O processo de busca local é feito através do operador PAO, conforme descrito na Subseção 2.2.3; 5) na sequência, avalia-se a solução x'' tida como ótima local, conforme descrito na Subseção 2.2.4. Nesse contexto podem acontecer três casos: (1) se x'' for igual a x , significa que x já era o ótimo local da vizinhança e, portanto, deve-se mudar para outro nível de vizinhança ($N_2(x)$ neste caso); (2) se x'' é de pior qualidade que x , então foi encontrado um ótimo local de pior qualidade que a incumbente x e também deve-se mudar de vizinhança; (3) se x'' é de melhor qualidade que x , significa que foi encontrada uma solução melhor que a incumbente e, portanto, deve-se atualizar a incumbente e reiniciar a busca permanecendo na vizinhança $N_1(x)$. Em qualquer iteração do processo, sempre que a busca local encontra uma nova incumbente, volta-se para a vizinhança $N_1(x)$ e sempre que a busca local encontra uma solução de igual ou pior qualidade que a incumbente, então passa-se para uma vizinhança maior; 6) o processo se repete em cada iteração até atingir a última estrutura de vizinhança k_{max} . Caso a última vizinhança for alcançada sem que seja encontrada uma solução melhor que a incumbente, a busca é iniciada na primeira vizinhança $N_1(x)$ da iteração seguinte até atingir o critério de parada, descrito na Subseção 2.2.5.

De maneira geral, o algoritmo BVNS aplicado no PRSDEE pode ser escrito da seguinte maneira:

1. Definição do conjunto de estruturas de vizinhança $N_k(x)$;
2. Definição da quantidade máxima (k_{max}) de estruturas de vizinhança;
3. Encontrar solução inicial x ;
4. Enquanto não é satisfeito o critério de parada,

(a) Fazer $k \leftarrow 1$;

- (b) Enquanto ($k \leq kmax$):
- i. Gerar aleatoriamente $x' \in N_k(x)$;
 - ii. Aplicar o método de busca local, com x' como solução inicial, para encontrar x'' ,
 - iii. Se ($f(x'') < f(x)$),
 - A. Então $x \leftarrow x''$ e $k \leftarrow 1$;
 - B. Senão $k \leftarrow k + 1$;
 - iv. Fim se;
- (c) Fim enquanto;
5. Fim enquanto;

3 MODELO DE CORTE DE CARGA

O corte de carga é utilizado para possibilitar que o sistema consiga restaurar um número ainda maior de seções com cargas, caso alguma das restrições do problema não seja atendida. Neste caso, a concessionária de energia efetua o corte de carga nas seções com clientes que fazem parte do PRD, contribuindo assim com o processo de restauração. Para promover o corte de carga, é utilizado um modelo baseado na técnica de solução Algoritmo Genético (AG) [6]. O objetivo é selecionar quais seções que fazem parte do PRD participarão do corte seletivo de carga e promover tal corte de acordo com o montante disponível para ser desligado. Neste caso, os clientes conectados na seção onde houver corte de carga serão remunerados de acordo com o seu montante de carga desligado e pela qualidade do serviço prestado pela concessionária, conforme a relação *DIC/DEC*. A seguir descreve-se o modelo matemático do corte de carga e a técnica de solução AG utilizada para promover o corte de carga.

3.1 Modelo Matemático

O modelo matemático consiste em minimizar uma função custo, Equação (3.1), referente ao corte de carga, sujeita às restrições (2.5) a (2.9), apresentadas na Subseção 2.1. As equações (3.2) a (3.4) calculam os custos por violação de cada uma dessas restrições: queda de tensão, do máximo fluxo de corrente nos alimentadores e da capacidade das subestações em suprir a demanda. Na Equação (3.5) tem-se o cálculo da demanda total do alimentador sob análise, utilizado na Equação (3.4).

$$\text{Min } F_{CC} = C_{PRD} + C_{PV} + C_{Pf} + C_{PS} \quad (3.1)$$

$$C_{PV} = \sum_{k \in \Omega_{Nsec}} R_{PV} \cdot |V_k - V_k^{min}| \quad (3.2)$$

$$C_{Pf} = \sum_{i \in \Omega_l} R_{Pf} \cdot |f_{km} - f_{km}^{max}| \quad (3.3)$$

$$C_{PS} = \sum_{s \in \Omega_{Nsub}} R_{PS} \cdot |S_s^{tot} - S_s^{max}| \quad (3.4)$$

$$S_s^{tot} = \sum_{k \in \Omega_{Nsec}} S_{Ck}^s + \sum_{k \in \Omega_{CD}} S_{CDk}^s + \sum_{k,m \in \Omega_{NI}} S_{Pkm}^s \quad (3.5)$$

em que: C_{PV} , C_{Pf} e C_{PS} são os custos de penalização por violação das restrições de tensão, do máximo fluxo de corrente nos ramais da rede e da capacidade máxima das subestações, respectivamente; R_{PV} , R_{Pf} e R_{PS} são as taxas de remunerações devido a violação das restrições de tensão em cada seção da rede, do máximo fluxo de corrente nos ramais da rede e da capacidade das subestações, respectivamente; S_s^{tot} é o somatório das demandas S_C das seções do alimentador sob análise, exceto as seções atingidas pela falta e a seção onde a falta ocorreu, mais o somatório das demandas S_{CD} das seções afetadas pela falta e que foram restauradas, mais as perdas S_P nos ramais do respectivo alimentador. Ressalta-se que S_s^{tot} pode ser maior que a capacidade de demanda máxima que cada subestação suporta S_s^{max} , violando assim tal restrição.

3.2 Técnica de solução

Para encontrar as soluções do modelo de corte de carga é utilizada a técnica de solução conhecida como Algoritmo Genético (AG). Os AG's são algoritmos matemáticos inspirados nos mecanismos de evolução natural e recombinação genética. Essa técnica fornece um mecanismo de busca adaptativa que se baseia no princípio *Darwiniano* de reprodução e sobrevivência dos mais aptos, que se traduz em um conjunto predeterminado e bem definido de regras e processos com operações finitas, destinados à busca estocástica da solução de um problema, com um número finito de etapas [6, 13]. A seguir detalha-se o AG aplicado no modelo de corte de carga.

3.2.1 Configuração inicial e sistema de codificação

No modelo de corte de carga, cada cromossomo da população do AG é formado pelas seções de carga do sistema elétrico que fazem parte do PRD. Assim, o tamanho dos cromossomos depende da quantidade de seções que irão participar do PRD, e, portanto, serão diferentes para cada sistema elétrico analisado. Ressalta-se que cada seção de carga do sistema elétrico é considerada como um conjunto de consumidores e qualquer consumidor pode aderir ao PRD. Portanto, as seções que fazem parte do PRD (quantidade e localização) foram escolhidas de forma aleatória.

A população inicial do AG é gerada de forma aleatória, em que a codificação de cada cromossomo é binária, ou seja, possui 0 (zero) para seções que não sofrerão corte de carga e 1 (um) para seções que sofrerão corte de carga, sendo essa escolha de forma aleatória. Considerando como exemplo o sistema elétrico da Figura 3, a Figura 4 ilustra um cromossomo codificado para este sistema com as respectivas seções k que fazem parte do PRD.

No exemplo da Figura 4 temos 6 seções que fazem parte do PRD, porém apenas 3 seções sofrerão cortes de carga (seções representadas pelo binário 1), escolhidas de forma aleatória. Ressalta-se que para cada seção que sofrerá corte de carga, a quantidade de carga a ser cortada é fixa.

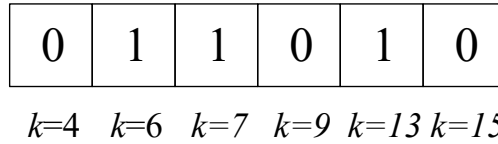


Figura 4: Sistema de codificação do AG.

Na tentativa de abranger todo o espaço de busca de soluções, considerou-se no AG um tamanho de população 3 vezes maior que o tamanho dos cromossomos. No exemplo do sistema elétrico da Figura 3, considerando que 6 seções fazem parte do PRD, conforme mostra a Figura 4, temos uma população de tamanho 18, ou seja, com 18 cromossomos.

3.2.2 Avaliação das soluções

A avaliação de cada solução (cromossomo) é feita através da função objetivo, dada pela Equação (3.1), que consiste em minimizar os custos de remuneração dos clientes que fazem parte do PRD mais os custos de penalização das restrições. Caso alguma restrição seja violada, a função é penalizada, aumentando assim seu valor. A melhor solução será aquela que apresentar o menor custo total, obedecendo as restrições do problema. No modelo de corte de carga, para calcular os parâmetros de rede e avaliar as restrições, também é utilizado o fluxo de carga para redes radiais de média tensão apresentado em [11].

3.2.3 Processo de seleção

O processo de seleção consiste em selecionar os pares de cromossomos da população corrente que irão se recombinar. No AG, desenvolvido para promover o corte de carga nas seções do sistema, adotou-se no processo de seleção a técnica do torneio, da seguinte forma:

1. São realizados n jogos, sendo n o tamanho da população;
2. Em cada jogo são selecionadas aleatoriamente k configurações diferentes da população corrente, sendo k igual a 2;
3. Em seguida gera-se um número aleatório p entre 0 e 1:
 - (a) Se $p \leq 0,7$, escolhe-se o melhor dos dois cromossomos que irá compor o par de cromossomos que irão se recombinar;
 - (b) Se $p > 0,7$, escolhe-se o pior dos dois cromossomos que irá compor o par que irá se recombinar.
4. Repete-se o processo para formar os pares de cromossomos até atingir a quantidade de n jogos.

3.2.4 Processo de recombinação

A recombinação consiste na troca de características dos pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. Ela é considerada o operador genético predominante, por isso é aplicada com probabilidade dada pela taxa de recombinação tr , que deve ser maior que a taxa de mutação. No AG, desenvolvido para promover o corte de carga nas seções do sistema, a recombinação é de um único ponto. Neste caso, escolhe-se de forma aleatória uma seção do cromossomo como ponto de recombinação, e a partir desse ponto troca-se as parcelas dos cromossomos. A Figura 5 ilustra o processo de recombinação entre pares de cromossomos gerados a partir do sistema elétrico da Figura 3. O processo de recombinação funciona da seguinte forma:

1. Define-se o valor da taxa de recombinação tr ;
2. Para cada par de cromossomos pais, gera-se um número aleatório p entre 0 e 1:
 - (a) Se $p \leq tr$, ocorre a recombinação entre os cromossomos pais, gerando novos descendentes, da seguinte forma:
 - i. Escolhe-se aleatoriamente uma seção k de carga do cromossomo, e a partir dessa seção troca-se as parcelas entre os cromossomos, conforme ilustra a Figura 5.
 - (b) Se $p > tr$, a recombinação entre os cromossomos pais não ocorre. Neste caso os cromossomos pais serão mantidos na população sem sofrerem alterações.
3. Repete-se o processo para todos os pares de cromossomos, formando assim uma nova população intermediária que será submetida ao processo de mutação.

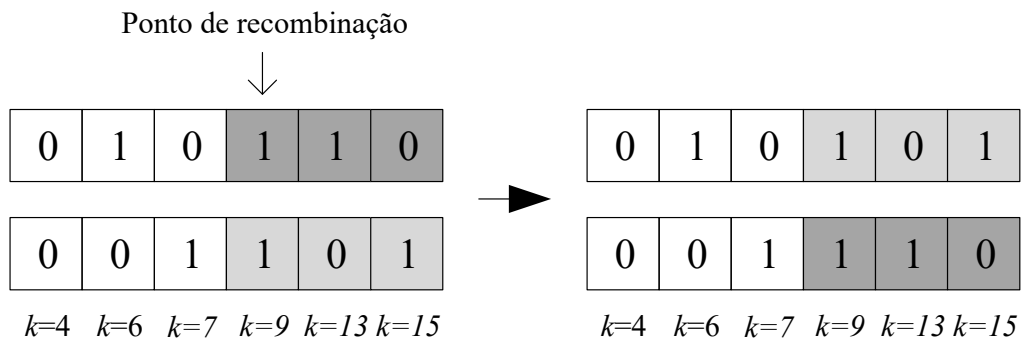


Figura 5: Exemplo do processo de recombinação.

3.2.5 Processo de mutação

O processo de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida. A mutação é aplicada a cada cromossomo da população com uma probabilidade dada pela taxa de mutação tm . No AG, desenvolvido para promover o corte de carga nas seções do sistema, a mutação consiste em alterar o código binário em uma das seções do cromossomo, sendo esta seção escolhida de forma aleatória. A Figura 6 ilustra o processo de mutação em um cromossomo gerado a partir do sistema elétrico da Figura 3. O processo de mutação ocorre da seguinte forma:

1. Define-se o valor da taxa de mutação tm ;
2. Para cada cromossomo da população corrente, gera-se um número aleatório p entre 0 e 1:
 - (a) Se $p \leq tm$, ocorre a mutação no cromossomo sob análise, da seguinte forma:
 - i. Escolhe-se aleatoriamente uma seção k de carga do cromossomo e altera-se o valor binário dessa seção, conforme ilustra a Figura 6.
 - (b) Se $p > tm$, a mutação não ocorre no cromossomo sob análise. Neste caso, o cromossomo é mantido na população sem sofrer alteração.
3. Repete-se o processo para todos os cromossomos da população, formando assim uma nova população que será submetida ao processo de avaliação, conforme descrito na Subseção 3.2.2.

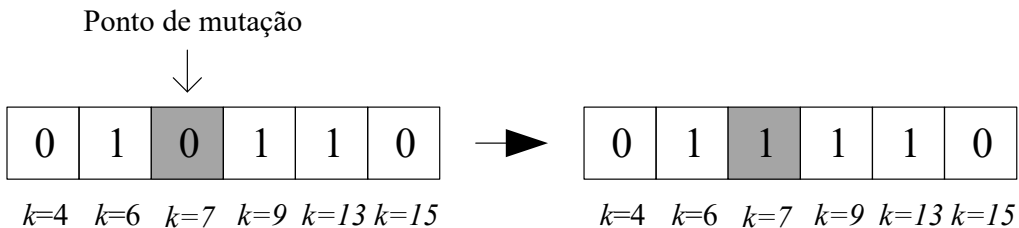


Figura 6: Exemplo do processo de mutação.

3.2.6 Critério de parada

O critério de parada do processo iterativo é baseado no número de iterações. Neste caso, após atingir o número máximo de iterações, o processo é considerado convergido.

4 RESULTADOS

São apresentados resultados de testes para um sistema de 53 seções, sendo 3 subestações e 50 seções de cargas [8]. A Figura 7 ilustra o sistema teste. Os testes foram feitos utilizando um computador Intel Core i7 (3,10 GHz) com 8 GB de memória RAM.

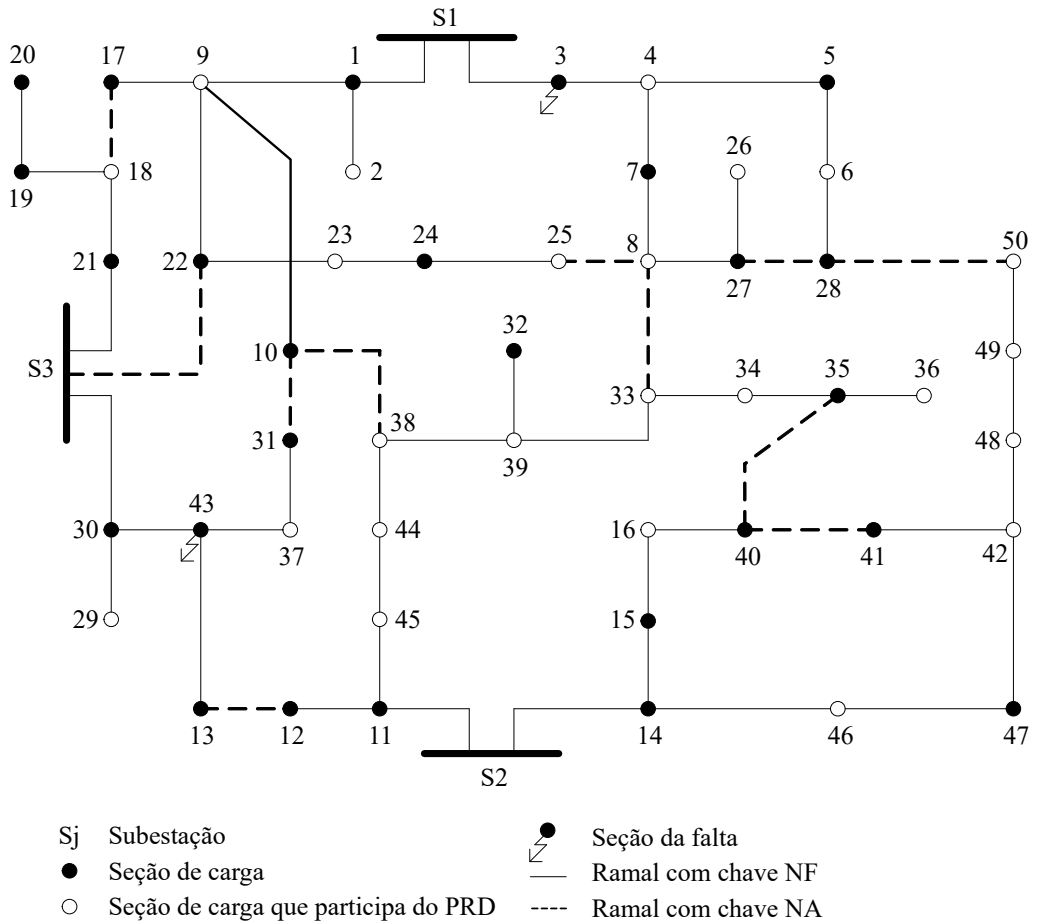


Figura 7: Sistema teste.

Nos testes, considera-se que clientes que prestam serviços essenciais à comunidade, como por exemplo hospitais, delegacias, dentre outros, não participam do PRD. Além disso, a quantidade de seções participantes do PRD, bem como suas localizações no sistema, foram escolhidas de forma aleatória, pois considera-se que qualquer cliente, exceto clientes que prestam serviços essenciais à comunidade, pode aderir ao PRD proposto pela concessionária de energia.

A Tabela 1 ilustra os dados de custos e parâmetros utilizados nas simulações. Para o custo fixo da taxa R_{CD} e R_{CC} , foi escolhido o valor da tarifa convencional do kW (fora ponta) de uso do sistema de distribuição de média tensão da empresa Elektro Distribuidora de Energia, disponível em [4]. Ressalta-se que o valor adotado no trabalho foi baseado na cotação do dólar para o período. Os custos referentes às violações das restrições foram ajustados durante as simulações. A Tabela 2 apresenta os dados do PRD, ou seja, as demandas que podem ser cortadas nas seções da rede, bem como a relação DIC/DEC de cada seção.

O valor da relação DIC/DEC de cada seção foi obtido através da variação dos valores do DIC e DEC obtidos da empresa Elektro Distribuidora de Energia para o município de Ilha Solteira (ano de 2021), disponível em [3]. A Tabela 3 ilustra as seções da falta, bem como as seções afetadas pela falta.

Tabela 1: Dados de simulações.

Custos	
R_{CD}	1.57 \$/kVA
R_{PRD}	1.57 \$/kW
R_{PV}	324.00 \$/violação
R_{Pf}	445.00 \$/violação
R_{PS}	445.00 \$/violação
Parâmetros de tensão	
V_k^{min}	0.93 pu
V_k^{max}	1.05 pu
Parâmetros do AG	
Taxa de recombinação	0.5
Taxa de mutação	0.05
Tamanho da população	72
Número de gerações	350

Tabela 2: Dados do PRD.

Seção	$P(kW)$	DIC/DEC	Seção	$P(kW)$	DIC/DEC
2	633.7	1.8	34	372.2	1.3
4	376.7	2.3	36	104.3	1.9
6	270.4	1.6	37	416.6	2.5
8	520.5	2.7	38	211.1	1.7
9	322.3	2.3	39	193.4	1.8
16	610.6	2.1	42	322.1	2.2
18	355.4	0.8	44	430.4	2.1
23	287.0	1.7	45	167.0	2.1
25	214.7	2.3	46	760.4	1.8
26	305.5	0.8	48	111.5	1.7
29	421.9	1.7	49	98.8	1.8
33	920.1	2.1	50	281.6	2.3

São apresentadas 3 propostas de soluções. Na solução 1, o modelo resolve o PRSDEE sem a participação do PRD, ou seja, considera apenas o algoritmo BVNS para resolver o PRSDEE. Nas soluções 2 e 3, o modelo resolve o PRSDEE considerando a presença do PRD. Neste caso, além

Tabela 3: Dados das seções sob falta.

Seção da falta	Seções afetadas
3	4-5-6-7-8-26-27-28
43	13-31-37

do algoritmo BVNS, o modelo considera também o algoritmo de corte de carga para resolver o PRSDEE. Para as propostas de soluções encontradas, temos que a Tabela 4 ilustra as seções restauradas e não restauradas, a Tabela 5 ilustra as alterações topológicas do sistema após a restauração, a Tabela 6 ilustra as seções que sofreram cortes de carga e a Tabela 7 mostra os respectivos custos de restauração.

Tabela 4: Seções restauradas e não restauradas.

Solução	Sec. não restauradas	Sec. restauradas
1	4-5-6-26-27	7-8-28
2	5-26-27	4-6-7-8-28
3	26-27	4-5-6-7-8-28

Tabela 5: Alterações topológicas na rede.

Solução	Ramais com chaves NA alteradas	Ramais com chaves NF alteradas
1	17-18; 103-22; 10-31; 8-25; 12-13; 28-50	101-3; 3-4; 4-7; 6-28; 8-27; 9-17; 9-22; 13-43; 30-43; 37-43
2	17-18; 103-22; 10-31; 8-25; 12-13; 40-41; 28-50	101-3; 3-4; 4-5; 5-6; 8-27; 9-17; 9-22; 13-43; 30-43; 37-43
3	17-18; S3-22; 10-31; 8-25; 12-13; 40-41; 28-50; 40-35	S1-3; 3-4; 4-5; 8-27; 9-17; 9-22; 13-43; 30-43; 37-43; 41-42; 34-35

Tabela 6: Seções que sofreram corte de carga.

Solução	Seção
1	-
2	6-8-48
3	6-8-36-46-48-49

Tabela 7: Custos das soluções.

Solução	Custo (\$)		Tempo de simulação (s)
1	C_{END}	7,186.23	0.22
	C_{PRD}	-	
	F_{CR}	7,186.23	
2	C_{END}	5,010.20	0.41
	C_{PRD}	3,193.91	
	F_{CR}	8,204.12	
3	C_{END}	3,264.02	0.47
	C_{PRD}	5,933.14	
	F_{CR}	9,197.16	

4.1 Comentários dos testes

Para os testes realizados, são apresentadas três soluções. A solução 1 representa a melhor solução sem o custo adicional de corte de carga devido ao PRD. Neste caso, para que o sistema possa operar dentro dos limites operacionais de redes elétricas estabelecidos por norma, além das seções 3 e 43 onde ocorreram a falta, as seções 4, 5, 6, 26 e 27 não foram restabelecidas no processo de restauração, obtendo assim um custo de energia não distribuída no valor de 7,186.23 (\$), conforme ilustra a Tabela 7. Para este caso, o tempo de simulação foi de 0.22 segundos.

A solução 2 representa a solução de menor custo considerando o custo adicional de corte de carga devido ao PRD. Nesta solução, para que o sistema opere dentro dos limites operacionais estabelecidos por norma, além das seções 3 e 43 onde ocorreram a falta, as seções 5, 26 e 27 não foram restabelecidas, obtendo assim um custo de energia não distribuída no valor de 5,010.20 (\$), conforme ilustra a Tabela 7. O tempo de simulação para este caso foi de 0.41 segundos. Devido ao PRD, além das seções restauradas na solução 1, a solução 2 conseguiu restabelecer também as seções 4 e 6 a um custo total de corte de carga no valor de 3,193.91 (\$), conforme Tabela 7. De acordo com a Tabela 7, o custo total de restauração para a solução 2 foi de 8,204.12 (\$).

A solução 3 representa a solução de maior custo considerando o custo adicional de corte de carga devido ao PRD. Nesta solução, para que o sistema opere dentro dos limites operacionais estabelecidos por norma, além das seções 3 e 43 onde ocorreram a falta, as seções 26 e 27 não foram restabelecidas, obtendo assim um custo de energia não distribuída no valor de 3,264.02 (\$), conforme ilustra a Tabela 7. O tempo de simulação para este caso foi de 0.47 segundos. Devido ao PRD, além das seções restauradas na solução 2, a solução 3 conseguiu restabelecer também a seção 5 a um custo total de corte de carga no valor de 5,933.14 (\$), conforme Tabela 7. De acordo com a Tabela 7, o custo total de restauração para a solução 3 foi de 9,197.16 (\$).

O AG, utilizado para promover o corte de carga, procura encontrar soluções otimizadas com o menor custo possível, ou seja, efetuando a menor quantidade possível de cortes de carga no sistema. Assim, de acordo com a solução 2, para restabelecer a seção 4 e 6 foram efetuados

cortes de cargas nas seções 6, 8 e 48. Na solução 3, para restabelecer as seções 4, 5 e 6, foram feitos cortes de cargas nas seções 6, 8, 36, 46, 48 e 49.

Comparando-se as soluções 2 e 3, verifica-se que a solução 3 conseguiu restabelecer uma seção de carga a mais que a solução 2, que é a seção 5. Para tal, além dos cortes de cargas efetuados nas seções da solução 2, foram efetuados cortes de cargas nas seções 36, 46 e 49, porém com um custo maior, mas respeitando as restrições técnicas e operacionais de redes elétricas.

O valor de remuneração do PRD constitui em um ressarcimento aos clientes das seções participantes do PRD que tiveram cargas cortadas, e deverá ser distribuído a esses clientes de acordo com o montante de carga disponibilizado no PRD. Contudo, os clientes das seções que apresentam os maiores valores da relação DIC/DEC serão melhor remunerados devido ao fato de possuírem um serviço de pior qualidade prestado pela concessionária de energia, quando comparado com clientes de outras seções da rede.

O trabalho apresentado em [8], utiliza como técnica de solução um algoritmo TS. Neste trabalho, os testes e análise dos resultados foram feitos considerando uma falta permanente na seção 3 do sistema da Figura 5. A solução encontrada conseguiu restaurar as seções 8, 27 e 28, com um tempo computacional de 3.1 segundos. Comparando esta solução com a solução 1 deste trabalho, tem-se que na solução 1, para a falta na seção 3, a quantidade de seções restabelecidas foi a mesma que a encontrada pelo algoritmo TS, porém com um tempo computacional menor. Assim, percebe-se o algoritmo BVNS é capaz de encontrar soluções de qualidade a um baixo tempo computacional. O fato do algoritmo BVNS não ter encontrado uma solução que restaure um conjunto maior de seções de carga em relação ao algoritmo TS, pode estar relacionado às características do sistema elétrico, as quais podem limitar a busca por soluções melhores. Pois, devido a estratégia do algoritmo BVNS quando comparado com a estratégia do algoritmo TS, já que a estrutura do algoritmo BVNS combina a busca local com mudanças sistemáticas de estruturas de vizinhança em torno do ótimo local, evitando assim processos de ciclagem e se afastando de ótimos locais, acredita-se que para sistemas maiores e mais complexos o algoritmo BVNS seja mais eficiente na busca por soluções.

Entretanto, nas soluções 2 e 3, a quantidade de cargas restabelecidas foi maior que da solução 1 e da solução apresentada em [8], porém com um custo e tempo computacional maior. Este fato se justifica pelo acionamento do AG utilizado para promover o corte de carga nas seções participantes do PRD, levando a obter soluções que apresentem um conjunto maior de cargas restauradas, o que demonstra a importância do PRD na resolução do PRSDEE.

Por fim, destaca-se que em se tratando de PRSDEE, o ideal é encontrar soluções que restabeleça o maior número possível de seções de cargas, com os menores custos e tempos computacionais possíveis, respeitando as restrições técnicas e operacionais da rede elétrica. No entanto, dependendo do montante de verba disponível pela concessionária de energia elétrica para promover o PRSDEE, o operador do sistema poderá adotar a solução mais conveniente do conjunto de soluções, dos pontos de vista técnico e econômico.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo de restauração de redes de distribuição considerando a presença de um Programa de Resposta à Demanda (PRD), cujo objetivo desse PRD foi de contribuir para que uma quantidade maior de seções de cargas fossem restabelecidas durante o processo de restauração.

Para resolver o problema de restauração utilizou-se a técnica de otimização conhecida como algoritmo BVNS (*Basic Variable Neighborhood Search*). O algoritmo BVNS, utilizando como estrutura de vizinhança a aplicação da técnica RNP, mostrou ser eficiente ao efetuar buscas locais com mudanças de estruturas de vizinhança em torno do ótimo local, e restabelecer o sistema de forma otimizada com um baixo tempo de simulação.

De acordo com os resultados, nas soluções 2 e 3, devido ao PRD, os custos totais de restauração foram maiores que o custo da solução 1, a qual considera apenas o custo da energia não distribuída no sistema devido às seções de cargas que não foram restabelecidas. Este fato sugere que pode não compensar para a concessionária a aplicação do PRD, do ponto de vista econômico. No entanto, a aplicação do PRD melhora a qualidade do serviço prestado pela concessionária aos clientes, otimizando a energia não distribuída no sistema e evitando assim que multas sejam aplicadas pelo órgão regulador por não cumprirem as metas estabelecidas em relação aos índices de qualidade.

Ressalta-se que, em adição a este modelo de restauração, outras ações de avaliação do processo de restauração podem ser analisadas, como por exemplo o custo e a sequência de chaveamentos na rede. No entanto, o objetivo deste trabalho foi de avaliar a influência do PRD no modelo de restauração, bem como o algoritmo BVNS associado à técnica RNP na busca por soluções de boa qualidade.

Além disso, o modelo de corte de carga utilizando o AG no processo de restauração, garante que tal corte ocorra tanto para restrições violadas de queda de tensão quanto para fluxo de corrente nos ramais dos alimentadores do sistema, na tentativa de restaurar um conjunto maior de seções de cargas.

Conclui-se que o modelo de restauração proposto é útil, confiável e de fácil aplicação, podendo ser utilizado pelas concessionárias de energia elétrica na obtenção de resultados satisfatórios para a restauração do sistema elétrico, associando o remanejamento adequado de cargas para outras seções da rede, e com a aplicação de um PRD que contribua para que um conjunto maior de seções de cargas seja restabelecido.

Agradecimentos

Agradecemos ao Departamento de Matemática pelo apoio no desenvolvimento desse trabalho.

ABSTRACT. In this work, a model based on the BVNS (Basic Variable Neighborhood Search) solution technique is proposed to solve the problem of restoring electrical energy

distribution systems, considering in the model the participation of customers who are part of a demand response program and that can contribute to the restoration process allowing a number of its loads to be disconnected by the utility. The mathematical model consists of minimizing the cost of energy not distributed in the system due to unrestored sections, added to the remuneration costs of customers who are part of the demand response program, subject to the technical, physical and operational restrictions of distribution networks. This is a mixed integer nonlinear programming problem in which solution proposals are obtained through the BVNS algorithm. The neighborhood structure of the BVNS algorithm is based on the Node-Depth Representation technique. In this restoration process, carried out by the BVNS algorithm, for each solution evaluated, if any restriction is violated, a Genetic Algorithm is processed to perform load cuts in the sections with customers who are part of the demand response program. To test the efficiency of the proposed model, test results on a 53-section distribution system are presented.

Keywords: network restoration, basic variable neighborhood search, demand response program.

REFERÊNCIAS

- [1] A.Y. Abdelaziz, F.M. Mohamed, S.F. Mekhamer & M.A. L.Badr. Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm. *Electric Power System Research*, **80** (2010), 943–953.
- [2] M.H. Albadi & A. El-Saadany. A summary of demand response in electricity markets. volume 78 (2008), p. 1989–1996.
- [3] ANEEL. Indicadores de Continuidade por Município. <http://antigo.aneel.gov.br/limites-dos-indicadores-de-continuidade-por-municipio>.
- [4] Elektro. Tabela de Tarifas - Grupo A2. http://www.neoenergiaelektro.com.br/Media/Default/pdf/ELEKTRO_TARIFAS_ENERGIA_ELETRICA_GRUPO_A_27%20AGOSTO_2021_REH_N%C2%BA_2.927.pdf.
- [5] S.S.S. Farahani, H. Tourang, B. Yousefpour & M. Kabirian. Using exponential modeling for dlc demand response programs in electricity markets. volume 4 (2012), p. 749–753.
- [6] F. Glover & G.A. Kochenberger. “Handbook of metaheuristics”. New York: Springer (2003).
- [7] P. Hansen & N. Mladenovic. Variable neighborhood search: principles and applications. *European Journal of Operational Research*, **80** (2001), 943–953.
- [8] B.R.P. Júnior, A.M. Cossi & J.R.S. Mantovani. Proposta de uma metodologia baseada em busca tabu para restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica. In “Congresso Brasileiro de Automática”. SBA (2012), p. 1204–1211.
- [9] A.L. Morelato & A.J. Monticelli. Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4** (1989), 2235–2241.
- [10] A. Santos, A. Delbem & N. Bretas. Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **25** (2010), 1254–1265.

- [11] D. Shirmohammadi, H.W. Hong & A. Semlyen. A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, **3** (1988), 753–762.
- [12] S. SToune, H. Fudo, T. Genji, Y. Fukuyama & Y. Nakanishi. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **17** (2002), 173–181.
- [13] J.V.R. V. Miranda & L.M. Proença. Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, **9** (1994), 1927–1933.
- [14] R. Vargas, W.P.M. Neto, L.G.W. Silva & J.R.S. Mantovani. Automatic Restoration of Active Distribution Networks Based on Tabu Search Specialized Algorithm. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, (2015), 411–416.

How to cite

A.M. Cossi & G.F. Afonso. Algoritmo BVNS Aplicado no Problema de Restauração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica, considerando Programa de Resposta da Demanda. *Trends in Computational and Applied Mathematics*, **25**(2024), e01690. doi: 10.5540/tcam.2024.025.e01690.

