

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUILHERME PILOTO CASTANHEIRA

**Alocação Otimizada de Chaves de Manobras em Redes de Distribuição de
Energia Elétrica na Presença de Geração Distribuída de Fontes Renováveis**

**Ilha Solteira
2022**

GUILHERME PILOTO CASTANHEIRA

Alocação Otimizada de Chaves de Manobras em Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geração Distribuída de Fontes Renováveis

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em engenharia elétrica.

Nome do orientador

José Roberto Sanches Mantovani

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C346a Castanheira, Guilherme Piloto.
Alocação otimizada de chaves de manobras em redes de distribuição de energia elétrica na presença de geração distribuída de fontes renováveis / Guilherme Piloto Castanheira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
61 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani
Inclui bibliografia

1. Alocação de chaves. 2. Algoritmo de busca em vizinhança variável. 3. Fluxo de potência. 4. Geração distribuída. 5. Sistemas de potência.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos seis dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e dois, o discente **Guilherme Piloto Castanheira**, matriculado sob o nº 171052722, tendo como banca examinadora seu orientador, o Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani, Dr. Diogo Rupolo e o Doutorando Lucas do Carmo Yanaguti, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Alocação Otimizada de Chaves de Manobras em Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geração Distribuída de Fontes Renováveis**", obtendo a nota 90,0 (DEZ) e conceito

Aprovado.

Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani
-orientador-

Guilherme Piloto Castanheira
-discente-

Dr. Diogo Rupolo

-Membro da Banca-

Doutorando Lucas do Carmo Yanaguti

-Membro da Banca-

DEDICATÓRIA

Dedico à Deus, por toda força e coragem durante toda a trajetória. A minha família e amigos pelo apoio incondicional e compreensão ao longo desse tempo. Aos professores, colegas do LaPSEE, orientador e toda a universidade pelos ensinamentos que me fizeram chegar até aqui.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

Sistemas de distribuição de energia necessitam de um planejamento adequado de seus índices de continuidade para garantir uma operação eficiente aos seus consumidores. No presente trabalho, apresenta-se uma solução baseada em uma meta-heurística dedicada para solução do problema de alocação de chaves de manobras em redes de distribuição aérea de energia com geração distribuída de fontes renováveis em operação. O problema é modelado através de uma função objetivo que visa minimizar o custo da energia não suprida, devido às faltas permanentes que podem ocorrer nos sistemas de distribuição, através da alocação de chaves de manobras. Considera-se um sistema com mais de um alimentador e um número de barras preestabelecidos com geradores renováveis, considerando custos de instalação e manutenção dos equipamentos de manobras instalados na rede elétrica em um horizonte de planejamento de cinco anos. Para a solução deste problema propõe-se a meta-heurística que utiliza a filosofia de busca de vizinhança variável (*VNS – Variable Neighbourhood Search*), o algoritmo GVNS (*General Variable Neighbourhood Search*), para determinar de forma otimizada o local das chaves de manobras nos ramais da rede elétrica de média tensão, partindo de uma solução inicial aleatória, com um número inicial de chaves, sendo o número final estabelecido pelo algoritmo, com base nos critérios de vizinhanças projetados. Para cada proposta de alocação de chaves na rede é executado um programa de cálculo de fluxo de potência através de um método numérico da literatura, considerando que os geradores distribuídos possam operar de forma ilhada. Apresentam-se resultados de testes realizados com a implementação computacional do algoritmo GVNS para um sistema de distribuição da literatura de 135 barras e 8 alimentadores.

Palavras-chave: algoritmo de busca em vizinhança variável, alocação de chaves, confiabilidade, fluxo de potência, geração distribuída, sistemas de potência.

ABSTRACT

Power distribution systems need an adequate planning of their reliability indices to comfiability to ensure an efficient operation to their consumers. In the present study a solution based on focused meta-heuristics is presented for the problem of switch allocation overhead power distribution networks with distributed generation of renewable sources operation. The problem is modeled through an objective function that aims to minimize the cost of unsupplied energy due to permanent faults that may occur in distribution systems, through the allocation of switches. Considers a system with more than one feeder and a pre-established number of buses with renewable generators, considering installation and maintenance costs of the switch installed in the electrical grid in a five-year planning horizon. To solve this problem, the meta-heuristic uses the Variable Neighborhood Search (VNS) philosophy, the GVNS (General Variable Neighborhood Search) algorithm, for optimally determines the location of the switches in the branches of the medium voltage electrical grid. Starting from a random initial solution, with an initial number of switches, being the final number established by the algorithm, based on the designed neighborhood criteria. For each switch allocation proposal in the grid, a power flow calculation program is executed using a numerical method of the literature, considering that distributed generators can operate in islanding mode. Results of tests performed with the computational implementation of the GVNS algorithm for the test system with 135 buses and 8 feeders are presented.

Keywords: distributed generation, power flow, power systems, reliability, variable neighborhood search, switch allocation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Separação da rede em camadas.....	19
Figura 2 - Ilustração do passo backward sweep	20
Figura 3 - Ilustração do passo forward sweep.....	21
Figura 4 - Fluxograma para o problema de potência.....	22
Figura 5 - Topologia da rede em operação normal.....	27
Figura 6 - Topologia da rede no cenário 1	28
Figura 7 - Topologia da rede no cenário 2	29
Figura 8 - Topologia da rede no cenário 3	30
Figura 9 - Processo de busca do algoritmo VND	36
Figura 10 - Processo de busca do algoritmo RVNS	37
Figura 11 - Processo de busca do algoritmo GVNS – (a) Estruturas de busca local. (b) Estruturas de diversificação.....	38
Figura 12 - Primeira vizinhança VND	41
Figura 13 - Segunda vizinhança VND.....	41
Figura 14 - Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido	42
Figura 15 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 135 barras	43
Figura 16 - Ramos com chaves alocadas para a melhor solução.....	48
Figura 17 - Convergência do algoritmo GVNS para as 05 melhores soluções encontradas .	49
Figura 18 - Convergência do algoritmo para melhores e piores soluções encontradas	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algoritmo VND	36
Tabela 2 - Algoritmo RVNS.....	37
Tabela 3 - Algoritmo GVNS	39
Tabela 4 - Cenários de operação das GDs no sistema teste.....	44
Tabela 5 - Resultados encontrados pelo algoritmo GVNS	46
Tabela 6 - Análise estatística dos resultados	47
Tabela 7 - Dados do sistema teste utilizado	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa tensão
BVNS	<i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
CENS	Custo da energia não suprida
ENS	Energia não suprida
GD	Geração distribuída
GVNS	<i>General Variable Neighborhood Search</i>
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões
MT	Média tensão
PNLIM	Programação Não Linear Inteiro Misto
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
p.u	Por Unidade
RVNS	<i>Reduced Variable Neighborhood Search</i>
VND	<i>Variable Neighborhood Descent</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	FOMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
2.1	FLUXO DE POTÊNCIA.....	18
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	23
2.3	ENERGIA NÃO SUPRIDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NA PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	25
2.4	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO OBJETIVO	31
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	ALGORITMOS VNS	34
3.2	O ALGORITMO VND	35
3.3	O ALGORITMO RVNS.....	36
3.4	O ALGORITMO GVNS.....	38
3.5	O ALGORITMO GVNS DEDICADO AO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CHAVES DE MANOBRAS.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	RESULTADOS FORNECIDOS PELO ALGORITMO GVNS PROPOSTO.....	45
4.2	ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DAS SOLUÇÕES.....	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6	CONCLUSÃO	52
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
	APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA TESTE 135 BARRAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A indústria de eletricidade envolve a geração, transmissão e distribuição, assumindo o papel de fornecer energia elétrica a todos os consumidores. Os sistemas de distribuição de energia elétrica são responsáveis por alimentar os consumidores em média e baixa tensão a partir de uma subestação. A rede primária de distribuição em média tensão apresenta, normalmente, topologia radial alimentando unidades consumidoras de média tensão e transformadores. A rede secundária de distribuição, em baixa tensão, onde a energia é fornecida em média tensão aos transformadores MT/BT, sendo que esta rede elétrica é malhada (KAGAN *et al.*, 2000).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica estão constantemente sujeitos às mudanças baseadas em estimativas temporais que podem impactar em ampliação, aumento de carga, reconfiguração da topologia da rede ou ligação de novos equipamentos para atender os consumidores de diferentes classes de consumo. A energia fornecida pela empresa distribuidora deve cumprir as normas e critérios das agências regulamentadoras e órgãos regulatórios que estabelecem limites, índices de confiabilidade, segurança e proteção dos sistemas elétricos para que a energia fornecida seja de qualidade tanto com relação à forma de onda quanto aos índices de continuidade. O fornecimento de energia aos consumidores da rede elétrica deve atender os níveis de continuidade preestabelecidos pela agência reguladora, mesmo estando sujeitos a fenômenos climáticos e problemas operacionais e de manutenção que podem causar a interrupção do serviço de fornecimento da distribuidora (KAGAN *et al.*, 2000; WESZ, 2005).

A interrupção do serviço de fornecimento de energia pode violar os índices de continuidade do sistema elétrico, entendendo como interrupção do serviço a perda completa do fornecimento de energia a um grupo de consumidores conectados à rede, podendo ser classificada de acordo com sua duração, sendo momentânea ou permanente. Grande parte das faltas permanentes de energia ocorrem devido às faltas na rede primária de distribuição, afetando tanto consumidores de MT quanto de BT. Portanto, garantir que a rede primária apresente um bom índice de confiabilidade, também implica em deixar de fornecer a demanda solicitada ao

menor número de consumidores na incidência de uma falta permanente (LOPÉZ, *et al.*, 2016; LEVITIN; MAZAL-TOV; ELMAKIS, 1994).

A demanda de energia não suprida está relacionada com o grau de confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia. Dessa forma, minimizar a energia não suprida na incidência de faltas permanentes nas redes de distribuição, garante o conforto e satisfação do consumidor por contratar um serviço de fornecimento de energia com baixa taxa de interrupção (TENG; LIU, 2003).

Uma ação de planejamento da confiabilidade de curto prazo da rede que contribui significativamente na minimização da energia não suprida, está relacionada com as chaves de manobras, onde o local em que elas estão alocadas no sistema de distribuição garante o restabelecimento de energia ao maior número de consumidores na ocorrência de uma falha na seção a jusante ou componentes da rede. Também, com a geração distribuída, consumidores podem ser abastecidos na sua operação ilhada, ou a manter os níveis de tensão dentro dos limites regulatórios preestabelecidos. Contudo os consumidores da seção onde ocorreu a falha ficarão desenergizados até que os devidos reparos sejam executados na rede (TENG; LIU, 2002).

Chaves de manobras são, geralmente, alocadas nos ramos do sistema de distribuição, e que juntamente com outros equipamentos de seccionamento definem as seções do sistema de distribuição que permanecem energizadas durante a operação normal da rede. Os Geradores Distribuídos (GD's) são instalados nas barras do sistema de distribuição, e dependendo de suas características físicas e operacionais podem constituírem-se em as fontes de microgeração e operarem formando micro redes. Entretanto, na presença de falta, a energia fornecida pela subestação é interrompida e as chaves são abertas para isolar o local onde a falta ocorreu, caso a falta de energia ocorra na seção onde está instalado um ponto de GD, o mesmo não poderá distribuir energia para o sistema de média tensão, apenas para os consumidores de baixa tensão da barra que está instalado, podendo perder parte da sua energia gerada caso a geração seja maior que a demanda durante o tempo que a rede permanecer no estado restaurativo. Com a abertura das chaves e a seção isolada, é possível reestabelecer a energia para alguns consumidores por meio do religamento de seções a jusantes a seção da falta, remanejamento de

cargas para os alimentadores vizinhos ou da operação ilhada de uma seção por conta da presença da GD na seção, quando possível (ATWA *et al.*, 2010; HEIDARI *et al.*, 2017; JAYWEERA *et al.*, 2007).

A transferência de cargas de um alimentador para uma seção e/ou outros alimentadores, altera a topologia e a quantidade de carga ligada no alimentador do sistema em operação normal, fazendo necessário manter os níveis das magnitudes de tensão do sistema para sua operação em estado restaurativo e também deve obedecer ao limite máximo de carga suportado pelo alimentador, sendo assim, torna-se imprescindível a realização do cálculo de fluxo de potência para a nova topologia do sistema considerando a presença dos GD's, uma vez que podem ajudar a manter o perfil de tensão dentro dos limites estabelecidos. A transferência de seções de um alimentador para outro é feita através de chaves de interconexões instaladas entre alimentadores, que na operação normal do sistema permanecem abertas para atender a restrição de radialidade do sistema com a não formação de malhas na rede (FALAGHI *et al.*, 2009).

A proposta do trabalho é alocar, de maneira otimizada, as chaves de manobras em ramos dos sistemas de distribuição de energia com a presença de GDs onde na incidência de faltas permanentes, o custo da energia não suprida seja o menor possível através de manobras realizadas para reconfigurar a rede primária de distribuição, considerando a possibilidade de operação do sistema em ilha das seções sem suprimento de energia, mantendo sempre as magnitudes de tensão estabelecidas pelos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o estado restaurativo. As pesquisas de metodologia e formulação da função objetivo foram elaboradas com base no artigo de Teng e Liu (2003), no artigo de Montoya-Bueno, Munoz e Contreras (2015), no artigo de Shirmohamadi, Hong, Semlyen e Luo (1988), no artigo de Hansen e Mladenovic (1999) e na tese de doutorado de Conceição (2018).

Os ramos onde as chaves de manobra são instalados é determinado através de metaheurística, da classe de algoritmos de busca em vizinhança variável (Variable Neighborhood Search - VNS), o GVNS (General Variable Neighborhood Search), que analisa o espaço de busca de ramos candidatos à instalação de chaves a procura de ótimos locais, cuja a solução otimizada fornecida pelo algoritmo

representa um mínimo local no espaço de busca, representando o menor custo de energia não suprida em função dos custos de investimento e manutenção das chaves.

Na formulação do problema, considera-se na função objetivo uma componente do custo da energia não suprida e a outra componente o custo de investimento na compra, instalação e manutenção anual dos equipamentos de manobras em um período de tempo em anos, considerando cenários anuais para variação do custo por quilowatt hora (kW/h) da energia não suprida e irradiação solar para a geração distribuída fotovoltaica presente na rede de distribuição. Apresentam-se resultados e discussões dos resultados obtidos através da simulação computacional da metodologia proposta para um sistema teste.

2 FOMULAÇÃO DO PROBLEMA

O planejamento da confiabilidade de sistemas de distribuição primários de energia elétrica é estabelecido através de estudos e análises sobre as condições operacionais, topológicas e índices de confiabilidade que o sistema está sujeito. As chaves de manobras e chaves fusíveis são dispositivos que garantem a reconfiguração da rede elétrica, que pode ser realizada para melhorar o perfil de tensão do sistema, reduzir perdas técnicas nos ramos, realizar tarefas de manutenções na rede e isolar seções na incidência de faltas. A reconfiguração é definida como o remanejamento de cargas entre alimentadores, através da troca de estados de chaves, mudando a topologia do sistema por tempo determinado, mantendo a radialidade no caso de reconfiguração dos sistemas primários de distribuição normalmente em operação, atualmente.

Com a crescente instalação de geração distribuída nos sistemas de distribuição e condições geográficas favoráveis para a geração fotovoltaica, é comum que sistemas de distribuição tenham GD instalada. Dessa forma, a alocação ou realocação de chaves em redes onde existe instalada GD despachável é um problema de otimização combinatória que busca, com base num conjunto de ramos candidatos a alocação de chaves no alimentador, determinar a configuração e número de chaves instaladas levando em consideração as barras onde os geradores estão alocados de modo que as interrupções do serviço de fornecimento de energia sejam mínimas na incidência de faltas permanentes e a rede de distribuição opere de forma otimizada. Outros parâmetros que devem ser considerados neste problema estão relacionados com as potências das cargas ligadas nas seções, barras candidatas à alocação de GDs e chaves de manobras, potência nominal e tipo de GDs despacháveis a serem instalados, índices de faltas permanentes anuais, tipos de consumidores, capacidade de fornecimento de energia das subestações e de transferências de cargas entre os alimentadores vizinhos ao alimentador sob estudo. Dessa forma obtém-se um modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM) restrito para o problema.

O modelo matemático para alocação de chaves para restauração e efetuar tarefas de manutenção no sistema é obtido utilizando o conceito de energia não suprida (ENS) e os índices históricos de faltas permanentes e temporárias no

sistema. Consideram-se duas funções objetivo, os custos de fixos de manutenção e instalação de chaves de manobras, e custos relacionados com a ENS. Pelo fato dos GDs já estarem instaladas em barras do sistema de distribuição e serem de propriedade da empresa distribuidora de energia, os custos relacionados à instalação da micro-geração são desconsiderados na função objetivo, mas a forma em que operam no sistema devem ser considerados para o cálculo da ENS. Genericamente, este problema pode ser formulado como:

Minimizar: $F1\{\text{Custos Fixos de Instalação e Manutenção de Chaves de Manobra}\}$
 $F2\{\text{Custo da Energia Não Suprida}\}$

S.a.

- Restrições de Fluxo de Potência (equações estáticas de fluxo de potência);
- Magnitude Mínima de Tensão de Operação nas Barras do Sistema;
- Capacidade de Fluxo nos Alimentadores;
- Capacidade das Subestações;
- Radialidade do sistema de distribuição;
- GD despachável de propriedade da empresa distribuidora;
- GD despachável alocado em barras definidas;
- Capacidades nominais disponíveis dos GDs;
- Limites físicos e operacionais dos GDs.

Este é um modelo de otimização combinatório com função objetivo não linear, não diferenciável, envolvendo variáveis reais e inteiras e um conjunto de restrições lineares e não lineares relacionadas com as equações de fluxo de potência na rede de distribuição (SHIRMOHAMMADI e CHEN, 1995). No modelo de função objetivo, consideram-se dados históricos de confiabilidade, relacionados com as interrupções que ocorrem em alimentadores aéreos de distribuição, GD despacháveis, a quantidade e a localização das chaves que deve possuir cada alimentador, para que em situações de contingências a restauração possa ser realizada de forma otimizada.

No modelo deve-se prever que chaves destinadas à restauração da rede de distribuição de energia elétrica e GD devem ser capazes de isolar as seções defeituosas e restaurar o sistema de forma que venha a minimizar os custos de

interrupções e também o número de clientes não supridos devido à falta de restrições relativas à capacidade de fornecimento de energia de subestações, alimentadores e qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica devem ser consideradas, através de uma função adaptação que penaliza as restrições infactíveis.

2.1 FLUXO DE POTÊNCIA

O fluxo de potência, ou fluxo de carga, é um estudo que é executado em sistemas elétricos de potência em regime permanente, e que se trata de um modelo matemático composto por equações estáticas algébricas, cuja solução determina os estados da rede elétrica (valores aproximados de tensão) que permitem determinar as perdas e a potência aparente em cada barra ou ramo do sistema analisado. Através de modelos de circuitos elétricos obtém-se um conjunto de equações que permitem o desenvolvimento de algoritmos para o problema de fluxo de potência e que, por sua vez, são implementados computacionalmente para obter o estado operacional da rede.

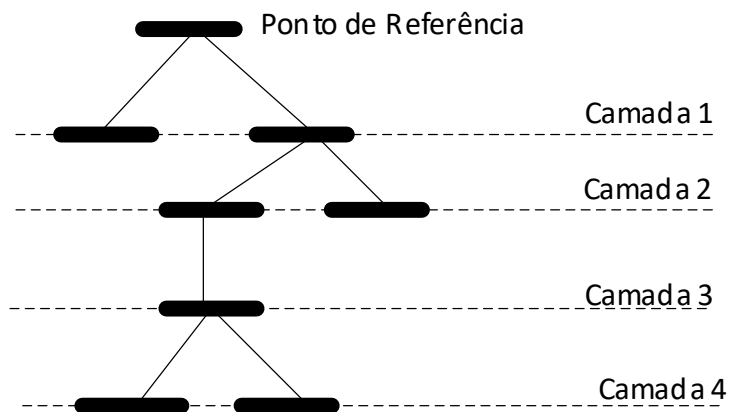
Na literatura, os modelos mais comuns para a solução do fluxo de potência são o método numérico de Newton-Raphson e o método numérico de Gauss-Seidel, onde os objetos de estudo são a matriz de admitância ou a matriz de impedância. As soluções de grandes sistemas de potência demandam um processamento extenso de cálculos numéricos, implicando no uso de grandezas com notação por unidade (p.u) e componentes simétricas, além do tipo de modelo de carga de cada barra, tornando o processo de cálculo complexo e consumindo maior tempo de processamento computacional em função da precisão dos resultados.

No presente trabalho, devido ao alto custo e tempo computacional demandado pelos métodos de solução clássicos do fluxo de potência, utiliza-se o modelo proposto por Shirmohamadi, Hong, Semlyen e Luo (1988). A proposta desta solução para o fluxo de potência é utilizar um método robusto quando comparado com as soluções clássicas, destinado à solução de problemas que demandam o cálculo do fluxo de potência demasiadas vezes, como é o caso da meta-heurística utilizada na solução do problema de alocação de chaves de manobras redes de

distribuição com presença de geração distribuída de fontes renováveis de energia, em que o algoritmo de fluxo de potência deve ser processado a cada mudança de topologia do sistema quando opera em estado restaurativo ou em ilha. Este método é um dos mais utilizados para sistemas de distribuição de média tensão, onde a topologia é radial.

No método proposto define o sistema radial de distribuição como um conjunto de *breakpoints*, representando as cargas no sistema, isto é, as barras. Com as leis de Kirchhoff é possível determinar a corrente e tensão em cada uma das barras e analisar se estão dentro do intervalo permitido pelas agências reguladoras. Para isso, primeiramente, o sistema é dividido em camadas (*layers*) a partir de um ponto de referência (geralmente, a subestação). Uma camada é definida pelo conjunto de barras que estão separadas a uma distância, em ramos, do ponto de referência, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Separação da rede em camadas



Fonte: Próprio autor

A solução do fluxo de potência segue com as especificações das condições iniciais assumindo o valor, em p.u, de uma tensão inicial em cada ponto (nó) do sistema, normalmente a magnitude de tensão da barra de referência, tendo em vista que a potência, em p.u, de cada nó é fornecida nos dados elétricos e os dados das cargas conectadas no sistema. Com as condições iniciais, realizam-se k iterações de uma sequência de três passos, definidas pelo *cálculo nodal das correntes*, *backward-sweep* e *forward-sweep*.

1. *Cálculo nodal das correntes*: Na iteração k , a corrente injetada no nó i é calculada pela Equação (1).

$$I_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i V_i^{(k-1)} ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

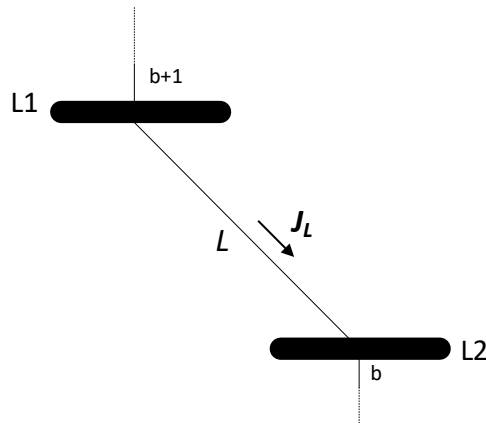
Onde, S_i é a potência injetada no nó i , $V_i^{(k-1)}$ é a tensão no nó i calculada na iteração anterior e Y_i é definida como o somatório dos elementos *shunt* da carga conectada ao nó i , que pode ser considerada nula em alguns casos. Quando $k = 1$, o valor da tensão é o valor de tensão inicial estabelecido na condição inicial do sistema.

2. *Backward Sweep*: Na iteração k , começando pelos nós localizados na última camada até o nó de referência (geralmente o alimentador), calculam-se as correntes nos ramos do sistema, J_L , através da Equação (2).

$$J_L^{(k)} = -I_{L2}^{(k)} + \sum_{\text{correntes nos ramos com origem na carga L2}} ; \quad L = b, b-1, \dots, b-n \quad (2)$$

Onde, $I_{L2}^{(k)}$ é a corrente injetada no nó $L2$. Neste passo, observa-se a aplicação direta da Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC). Na Figura 2 ilustra-se o passo *backward sweep*.

Figura 2 - Ilustração do passo *backward sweep*

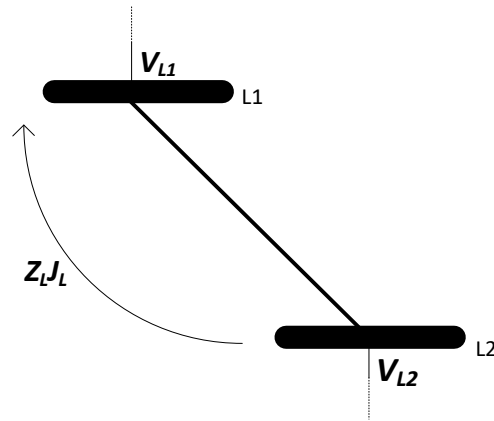


Fonte: Próprio autor

3. *Forward Sweep*: Na iteração k , começando com os nós localizados na primeira camada, aplica-se a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT) em cada ramo L com os valores de corrente encontrados no passo anterior, J_L . O resultado das magnitudes das tensões obtidos através da Equação (3) atualizam os valores encontrados na iteração $k - 1$. Na Figura 3 ilustra-se o *forward sweep*.

$$V_{L2}^{(k)} = V_{L1}^{(k)} - Z_L J_L^{(k)} ; L = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Figura 3 - Ilustração do passo *forward sweep*



Fonte: Próprio autor

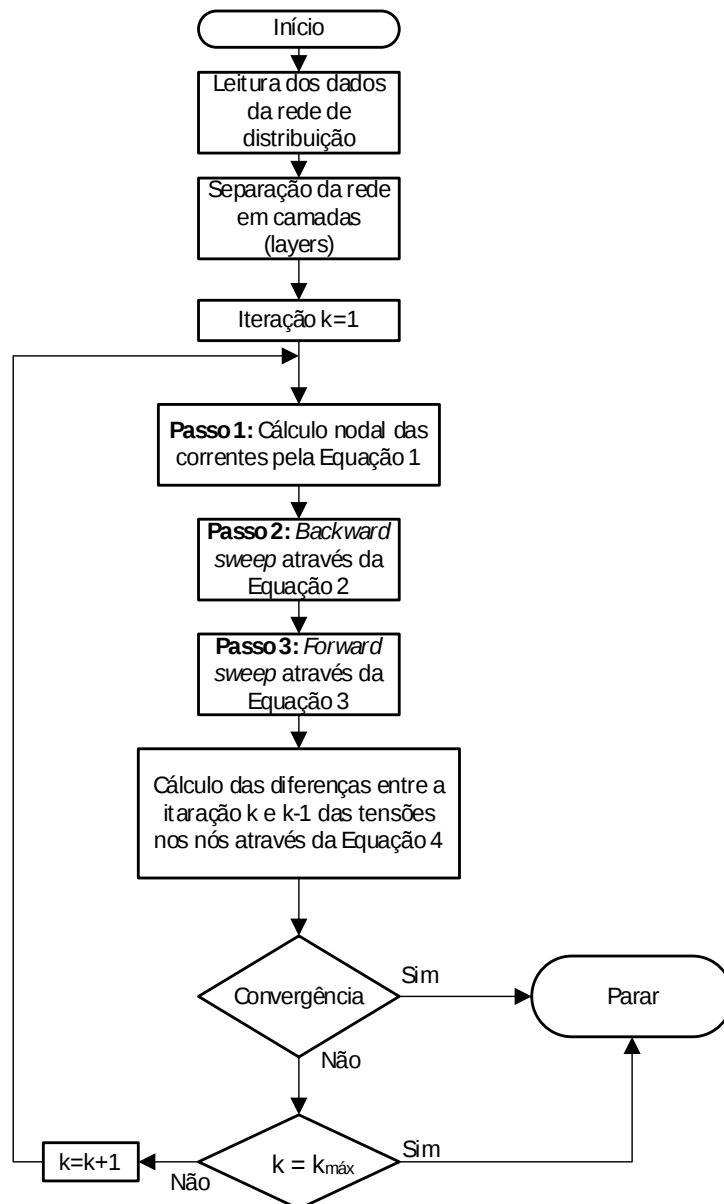
Na solução do método descrito para o fluxo de potência repetem-se os passos 1, 2, e 3 até que o critério de parada seja atingido. Para o projeto desenvolvido foi estabelecido dois critérios de parada. No primeiro, é feita a diferença, em módulo, da magnitude das tensões obtidas em todos os nós entre a iteração k e $k - 1$, sendo a convergência um valor menor ou igual ε como se destaca na Equação (4).

$$\left| V_L^{(k)} - V_L^{(k-1)} \right| \leq \varepsilon \quad (4)$$

Caso não satisfeito o primeiro critério de convergência, o segundo critério adotado deve ser verificado. No segundo critério, define-se um número máximo de

iterações k para o algoritmo de fluxo de potência. Na Figura 4 apresenta-se o fluxograma da técnica de solução para o cálculo de fluxo de potência processado para avaliar as condições operacionais da rede de distribuição durante o processo iterativo de solução do problema de alocação de chaves de manobras.

Figura 4 - Fluxograma para o problema de potência



Fonte: Próprio autor

Nas barras que possuem GD instalada, a sua capacidade de geração pode suprir parte ou totalidade da demanda da barra, podendo em casos de exceder esta demanda de energia e fornecer energia ao sistema, melhorando na maioria dos casos a magnitude de tensão do sistema e impactando no perfil de tensão da rede

elétrica. No entanto, as tensões nas barras podem exceder os limites de tensão estabelecidos pelo PRODIST. Em resumo, além da não convergência, a solução do fluxo de potência permite tecnicamente a não adotar como solução do problema as configurações que apresentam infactibilidades nas magnitudes de tensão tanto no estado de operação normal como no estado restaurativo.

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Na literatura, encontram-se várias referências para temas de geração distribuída. A geração renovável baseada em GDs despacháveis é uma alternativa para atender a demanda de consumidores dos sistemas de distribuição de energia com impactos insignificantes ao meio ambiente, pela baixa emissão de gases poluentes que aceleram o efeito estufa, sendo um dos principais motivos da sua crescente instalação em redes de distribuição de energia (MELGAR-DOMINGUEZ *et al*, 2019).

A GD está instalada mais próxima dos consumidores, uma vez que são instaladas em barras do sistema de distribuição. No entanto, a micro-geração geralmente é limitada a uma capacidade de geração menor que 50MW de potência, não centralmente planejada e despachada e conectada ao sistema de distribuição em uma faixa de tensão entre 230V ~ 145kV (CHOWDHURY; AGARWAL; KOVAL, 2003). Os tipos de GDs variam com o tipo de tecnologia utilizado para aproveitar os recursos renováveis, sendo o mais comum referentes a turbinas eólicas e, principalmente, referentes à incidência de raios solares. Por atender a demanda de alguns consumidores, o investimento em GDs despacháveis podem postergar a solicitação de fornecimento de mais energia à subestação, consequentemente, reduzir custos nos sistemas de geração e transmissão de energia em alta tensão (MELGAR-DOMINGUEZ *et al*, 2019; BROW; FREEMAN, 2001). Entretanto, os custos de instalação de geradores distribuídos são elevados e demoram cerca de 15 a 20 anos para que o investimento produza retorno financeiro para a concessionária.

A inserção massiva e inadequada de GDs no sistema pode causar problemas sérios na operação das redes de distribuição primárias. No planejamento dos sistemas de distribuição, as redes devem ser passivas, ou seja, proporcionar o

fornecimento de energia de forma unidirecional partindo da barra de referência. Dessa forma, com a alta penetração de energia proveniente de GDs, pode acarretar no fluxo reverso em alguns pontos do sistema de distribuição, aumentando ou diminuindo níveis de curto-circuito, podendo atrapalhar o correto funcionamento de dispositivos de proteção da rede, como relés e disjuntores. Além do mal funcionamento dos dispositivos de proteção, o fluxo reverso juntamente com mal dimensionamento de controle de reativo das GDs fazendo com que os níveis de potência reativa dos transformadores aumentem, podem elevar consideravelmente o carregamento nos trechos das redes elétricas, causando aumento de perdas técnicas e sobrecarga nos condutores. Em contraponto, se alocados de maneira correta, alivia o carregamento nos ramos da rede, reduzindo as perdas técnicas e melhorando o perfil de tensão do sistema de distribuição (CHAITUSANEY; YOKOYAMA, 2006; MONTOYA-BUENO; MUNOZ; CONTRERAS, 2015).

Na literatura, existem diversas modelagens de GDs, em função do tipo de geração e capacidade. Para GDs fotovoltaicos a modelagem utilizada neste trabalho baseia-se no artigo de Montoya-Bueno, Munoz e Contreras (2015), onde consideram-se os patamares de geração do GD com base na temperatura da junção das células solares provocadas pela irradiação solar para determinar a potência ativa gerada e injetada na rede. Pela Equação (5) tem-se a modelagem da temperatura da placa solar causada pela irradiação solar e, pela Equação (6), tem-se a modelagem de como a temperatura descrita transforma-se em energia.

$$T_{placa}^{\circ C} = T_{amb} + \left(\frac{TNOP - 20}{800} \right) G \quad (5)$$

$$P_W^{pv} = P_{padr\tilde{a}o} \left\{ \frac{G}{1000} [1 - \delta(T_{placa} - 25)] \right\} \quad (6)$$

em que P_W^{pv} é a potência injetada na rede dado em W e $T_{placa}^{\circ C}$ em $^{\circ}C$. $P_{padr\tilde{a}o}$ é a potência em condições padrão de teste da placa fotovoltaica (W), T_{amb} a temperatura ambiente ($^{\circ}C$), G a irradiação solar (W/m^2), $TNOP$ a temperatura nominal de operação da placa ($^{\circ}C$) e δ é o coeficiente de potência-temperatura ($\%/^{\circ}C$).

Os GD's além de potência ativa, também fornecem potência reativa capacitiva para o sistema, ou seja, injeta reativo na rede para que não ocorra excessos de reativos. A injeção de reativo é necessária, pois se apenas fornecesse potência ativa no sistema, poderia aumentar o fator de potência das barras, sendo necessário regulá-lo por meio de banco de capacitores, contudo, os próprios equipamentos para a instalação do sistema fotovoltaico fazem o controle da potência reativa por meio da Equação (7).

$$Q^{pv} = P^{pv} \cdot \tan \varphi \quad (7)$$

onde Q^{pv} é dado em VAr .

2.3 ENERGIA NÃO SUPRIDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NA PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Eventos naturais, falhas humanas e erros de especificação, coordenação e seletividade em diversos dispositivos que compõem o sistema e falta de manutenção e índices de confiabilidade baixos podem provocar falhas aleatórias em redes de distribuição elétrica, interrompendo o serviço de fornecimento aos consumidores, gerando multas para as distribuidoras.

Baseado em Teng e Liu (2003), na ocorrência de um fenômeno que crie uma falha inesperada no sistema, os dispositivos de proteção imediatamente são acionados, ou seja, o disjuntor do alimentador é aberto, interrompendo o fluxo de energia das barras consumidoras conectadas na região atingida pela falta. Com a energia interrompida, é necessário, por meio de chaves de manobras isolar o local onde ocorreu a falha, permitindo a possibilidade de religar outros consumidores de seções jusantes à da falha. Portanto, ao deixar somente os consumidores da seção onde houve a falha sem o fornecimento de energia durante o reparo, evita com que todos os consumidores ligados ao alimentador tenham o serviço de fornecimento de energia interrompido até que seja feito o reparo pertinente à causa da falha.

Uma seção, ou bloco de cargas, no sistema de distribuição é definida pela parte da rede que pode ser isolada através de ações adequadas de chaveamento da mudança de estados dos dispositivos de manobras mais próximos, como, por

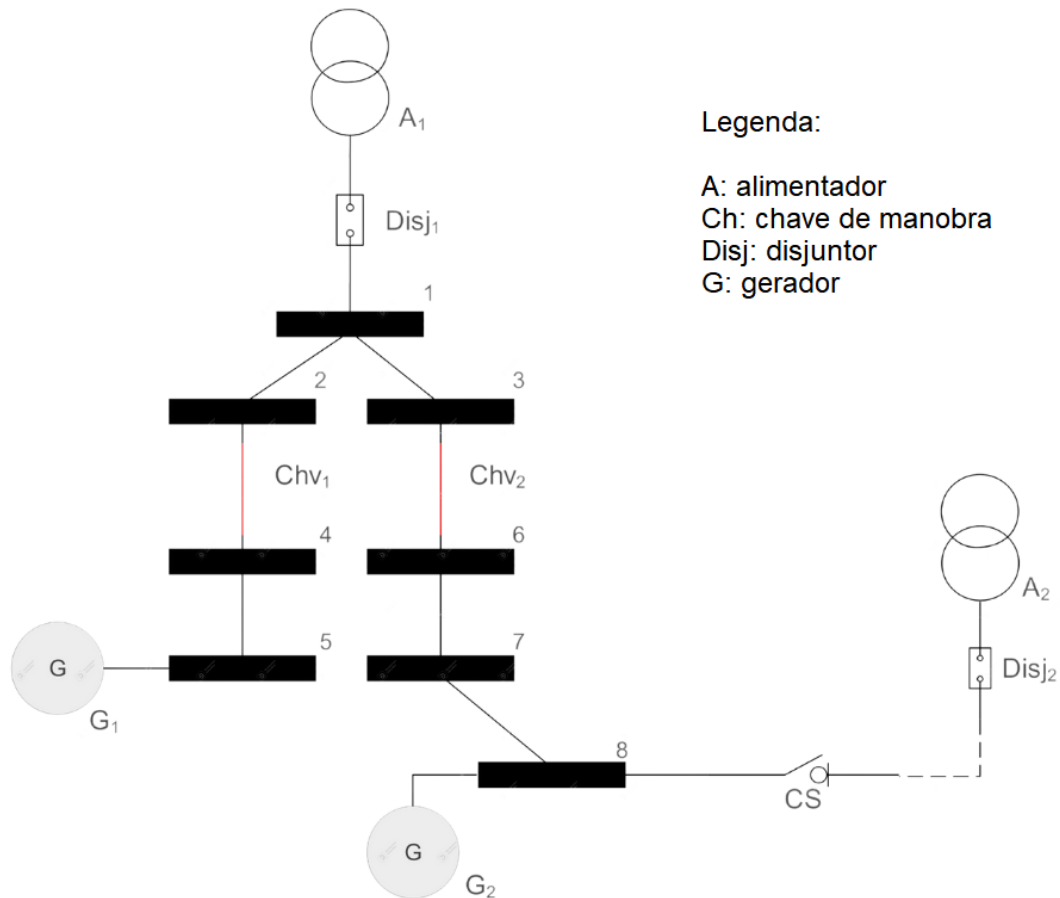
exemplo, as chaves de manobra, religadores e seccionadores. Neste as chaves de manobras têm a finalidade de definir seções na rede elétrica de distribuição e isolá-la em caso de incidência de faltas permanentes de energia, estando inicialmente no estado normalmente fechadas, localizadas nos ramos da rede.

Ramos que interligam alimentadores também possuem chaves de interconexão ou chaves socorro. As chaves de interconexão ficam em estado normalmente aberto durante a operação normal do sistema de distribuição, mudando de estado quando uma ou mais chaves de manobra são abertas, configurando um sistema de topologia diferente da original. A mudança de topologia da rede elétrica é comum não somente na incidência de faltas permanentes como abordado neste trabalho, o objetivo de mudar a topologia do sistema pode ser melhorar o carregamento dos alimentadores e redução de perdas técnicas por ser solicitada uma maior quantidade de demanda por parte de alguns consumidores em determinado patamar de carregamento. No entanto, custos de manobras devem ser considerados ao mudar a topologia do sistema por um curto período de tempo.

Durante a incidência de uma falha no sistema, os geradores distribuídos que estão alocados dentro da seção da falta, são desconectados do sistema de distribuição primário, não fornecendo energia para outras barras da rede. Quando alocados em seções a montante da falta, como o alimentador fornece energia para um número menor de barras, o GD pode contribuir para elevar a tensão acima do limite preestabelecido, sendo necessário seu desligamento. Quando alocados em seções jusantes à seção da falta, podem contribuir para manter o nível de tensão dentro dos limites estabelecidos pelo órgão regulatório. Ainda, em casos onde o remanejamento de cargas não é possível para seções a jusante da falta, dependendo do patamar de geração, o GD pode suprir a demanda dos consumidores por um certo tempo, evitando o não suprimento de energia, onde neste cenário tem a operação da seção em ilha ou micro rede.

Considerando que as chaves de manobras sejam instaladas somente em ramos já existentes no sistema, que os GD's sejam instalados somente em barras de consumidores já existentes no sistema, e que é permitido o remanejamento de cargas entre alimentadores, considere o sistema elétrico radial da Figura 5 no estado de operação.

Figura 5 - Topologia da rede em operação normal



Fonte: Próprio autor

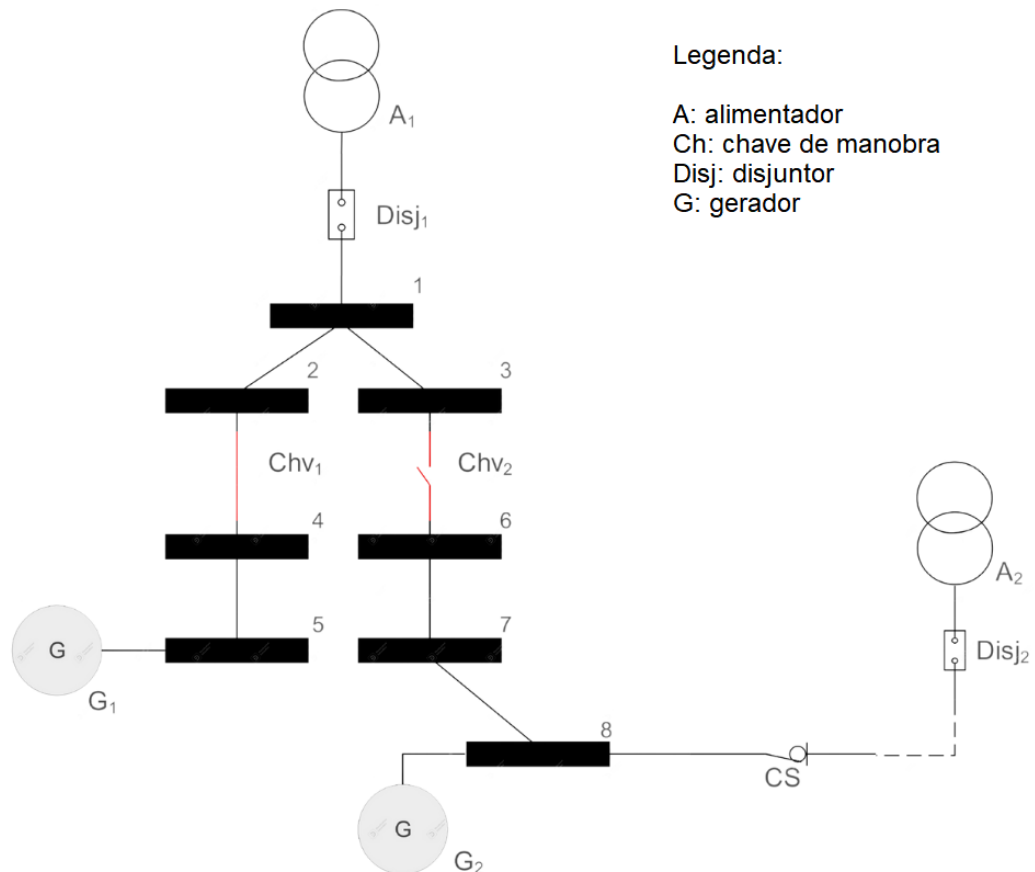
Dado o sistema da Figura 5, supõe-se uma falha no início do alimentador, nas barras 1, 2 ou 3. Neste caso, o disjuntor $Disj_1$ é acionado e todo o alimentador A_1 fica sem o fornecimento de energia. Com a presença das chaves, Chv_1 e Chv_2 , geradores distribuídos, G_1 e G_2 e a conexão dos alimentadores, A_1 e A_2 , por meio da chave socorro CS, é possível com que fornecedores da seção jusante à seção inicial tenham energia reestabelecida. A seguir, apresentam-se 03 possíveis cenários para o reabastecimento dos consumidores:

Cenário 1: Remanejamento de energia pelo alimentador A_2

Supõe-se que o GD G_2 não tenha capacidade suficiente de geração no instante da falta para alimentar os consumidores conectados às barras 6, 7 e 8, sendo inviável a operação do sistema em ilha nessa seção. Dessa forma, o que deve ser feito é conectar as cargas dos consumidores da seção ao alimentador A_2 .

Neste cenário, comum na incidência de faltas permanentes, a chave de manobra Chv₂ é aberta, e a chave socorro CS é fechada, criando um caminho elétrico para a passagem de corrente no alimentador A₂, reestabelecendo a energia para os consumidores das barras 6, 7 e 8, mudando a topologia radial da rede elétrica durante o período restaurativo, como ilustrado na Figura 6. Neste cenário, o GD G₂ contribui para melhorar no perfil de tensão e carregamento, ou seja, também fornece energia às barras. Para a realização da manobra para este cenário, é necessário avaliar o carregamento e magnitudes de tensão do alimentador A₂, inviabilizando a operação caso os critérios de capacidade de potência e nível de tensão não sejam atendidos.

Figura 6 - Topologia da rede no cenário 1

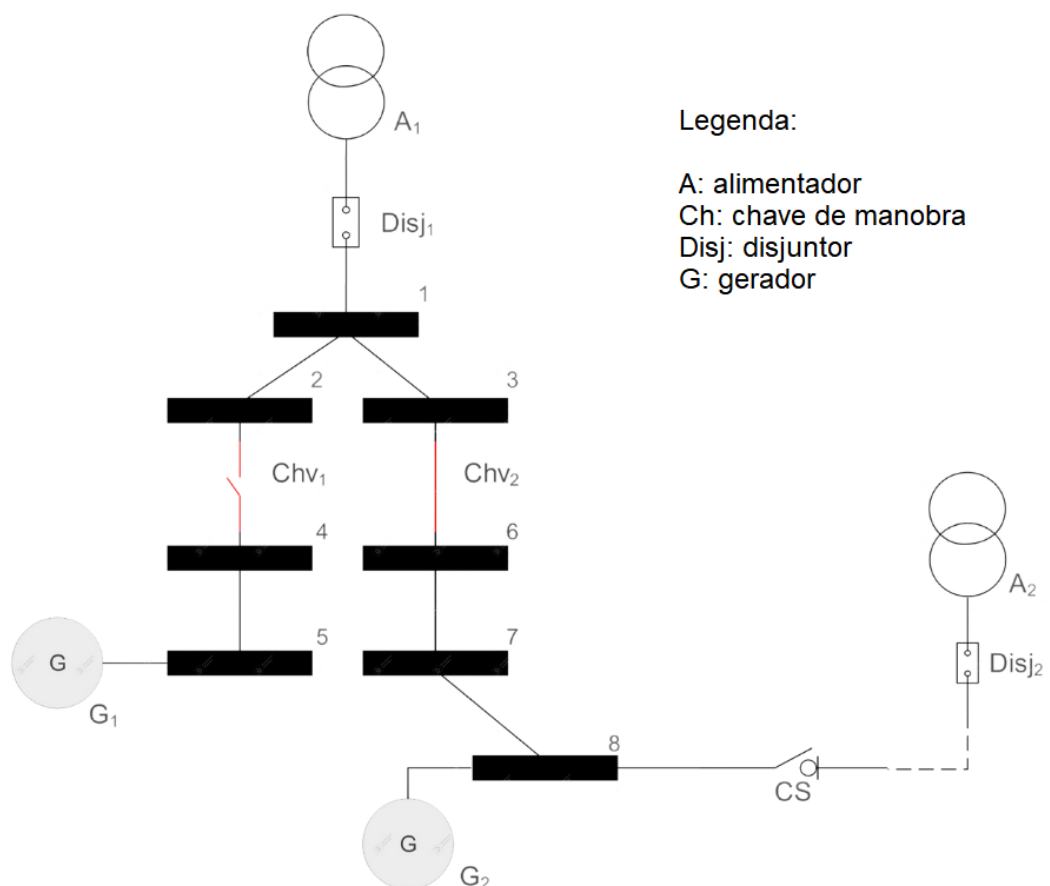


Fonte: Próprio autor

Cenário 2: Operação em ilha

Supõe-se que o GD G_1 tenha capacidade de geração suficiente para suprir a demanda da seção jusante à falta, composta pelas barras 4 e 5, durante o período restaurativo da rede. Para atender este cenário, a chave Chv_1 é aberta, e o GD G_1 supre a demanda dos consumidores da seção, levando em consideração que a capacidade de geração de G_1 deve ser superior à demanda solicitada pelas barras 4 e 5, uma vez que há perdas técnicas entre os trechos que conectam as barras na rede elétrica. Caso a capacidade de G_1 não atenda às necessidades dos consumidores da seção, a operação em ilha na seção não é válida, interrompendo o fornecimento de energia aos consumidores. Na Figura 7 apresenta-se a topologia do sistema para este cenário, a mudança de topologia é devida algumas barras estarão operando ilhadas, ou seja, sem a necessidade de conexão com qualquer alimentador da rede.

Figura 7 - Topologia da rede no cenário 2

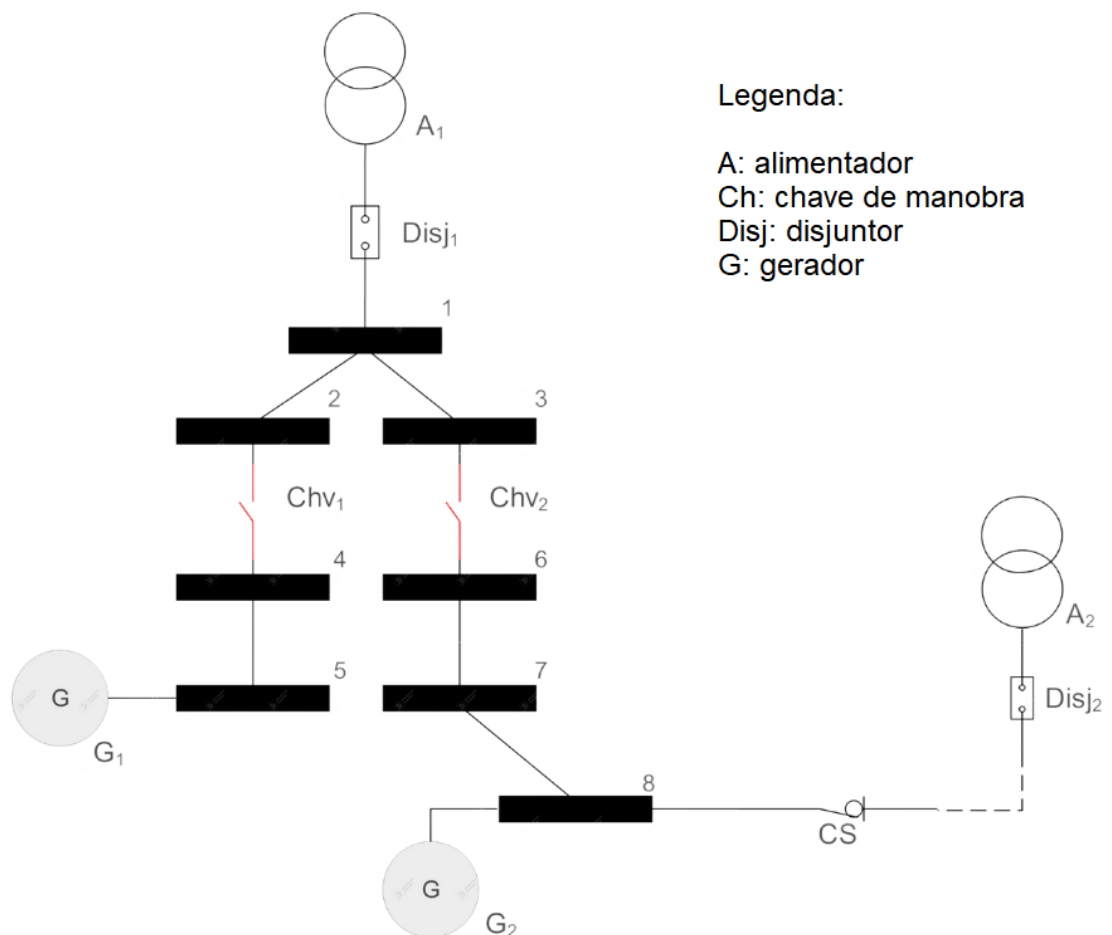


Fonte: Próprio autor

Cenário 3: Remanejamento de energia e operação em ilha

Considere que as condições de operação nos cenários 1 e 2 sejam satisfatórias. Logo, as chaves de manobra Chv_1 e Chv_2 são abertas e a chave CS é fechada, permitindo o reestabelecimento da energia da seção formada pelas barras 4 e 5 através da operação em ilha, e, da seção formada pelas barras 6, 7 e 8 através do remanejamento de cargas, mudando a topologia da rede como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Topologia da rede no cenário 3



Fonte: Próprio autor

O objetivo do cenário 3 é mostrar que na incidência de uma falta permanente, várias possibilidades de operação do sistema devem ser consideradas para que o

menor número de consumidores seja prejudicado pela interrupção do serviço de fornecimento de energia.

Existe a possibilidade de seções jusantes à seção da falta não ter GD conectados para auxiliar no remanejamento de cargas, seções com mais de um GD conectado para suprir a demanda da seção na operação ilhada e seções onde não é possível reestabelecer a energia por não ter GD conectado ou opções para remanejamento de carga. Tanto nos três cenários apresentados quanto em outros citados, o reestabelecimento de energia na incidência de faltas permanentes pode ou não ser viável. Portanto, para atingir o objetivo de deixar o menor número de consumidores sem energia durante faltas, o maior número de seções jusantes à seção da falta devem ter energia reestabelecida seja qual for a forma de operação, respeitando os critérios técnicos das agências reguladoras. Fazer com que o maior número de seções jusantes à seção da falta tenha energia reestabelecida é um problema ligado diretamente com a alocação otimizada de chaves de manobras em redes de distribuição de energia.

2.4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo do problema está diretamente ligada ao custo da energia não suprida (CENS) pela rede após a interrupção de energia elétrica devido a uma falta permanente na rede. Quanto maior a quantidade de consumidores prejudicados com o não fornecimento de energia, maior será a energia não suprida, consequentemente, maior o montante que a distribuidora deixa de arrecadar, uma vez que não se cobra tarifas do consumidor de um serviço inoperante, pois garantir a energia elétrica para residência, comércio ou indústria é dever da concessionária.

O montante que se deixa de arrecadar com a interrupção do serviço de fornecimento de energia é definido como custo da energia não suprida. Outro aspecto, está na necessidade de a empresa fornecedora de energia atender os índices de continuidade estabelecidos pela agência reguladora, onde o não cumprimento do índice de continuidade acarreta no pagamento de multas, devido a energia elétrica ser considerada um recurso essencial.

A redução do custo da energia não suprida está relacionada com a instalação de chaves de manobras em ramos da rede elétrica, entretanto, por ser um equipamento de controle e seccionamento, existem custos de investimento para a aquisição e instalação deste equipamento, e um custo de manutenção anual pelos desgastes que devem ser considerados pela concessionária.

No modelo do problema proposto incluem-se na função objetivo os custos de geração dos GDs, os custos fixos associados à aquisição dos geradores são desconsiderados, considerando apenas os custos relativos à capacidade de fornecer energia ao sistema, considerando que os GDs já estão instalados em barras da rede de distribuição. Sendo uma fonte de energia limpa e renovável por não emitir gases de efeito estufa, a concessionária não paga pelo quilowatt gerado após feito o investimento de compra e instalação da GD, aliviando custos no sistema de geração e transmissão até a subestação.

Por fim, a função objetivo do problema é baseada nos artigos Teng e Liu (2003) e no artigo de Montoya-Bueno, Munoz e Contreras (2015) para o tratamento do custo da função objetivo em redes de distribuição na presença de GDs, descrito pela Equação (8), e na tese de doutorado de Conceição (2018) para o modelamento de custos associados as chaves de manobra, descrito pela equação 9.

$$CENS_{US\$} = \sum_{a=1}^t \sum_{c=1}^s \left(\sum_{k=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\lambda l_i \left(\sum_{j=1}^p C_c (L_j - L_{GD_{cj}}) \right) \right] \right\} \right) \quad (8)$$

$$C_{US\$}^{chv} = N_{chv} \left(I_{chv} + A_{chv} + \sum_{a=1}^t M_{chv} \right) \quad (9)$$

Onde:

λ : Taxa de falhas anual (faltas/km.ano);

l_i : Comprimento da seção i (km);

C_c : Custo do quilowatt hora no cenário c (US\$);

L_j : Carga da barra j (kW);

L_{GD_j} : Carga da barra j proveniente de geração distribuída (kW);

N_{chv} : Número de chaves;

I_{chv} : Custo de instalação de uma chave de manobra (US\$);

A_{chv} : Custo de aquisição de uma chave de manobra (US\$);

M_{chv} : Custo de manutenção anual de uma chave de manobra (US\$);

a: Ano;

c: Cenário do ano;

i: Seção do alimentador;

j: Barra;

k: Alimentador.

A função objetivo dedicada ao problema proposto é modelada de acordo com os dois objetivos principais, a redução do CENS e os custos das chaves de manobras, sendo o custo final da função objetivo escrito na Equação (10).

$$FO_{US\$} = C_{US\$}^{chv} + CENS_{US\$} \quad (10)$$

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada para a solução do problema de alocação otimizada de chaves de manobra em redes de distribuição de energia com geração de fontes renováveis de energia, é o algoritmo GVNS (*General Variable Neighborhood Search*) que utiliza como ferramenta auxiliar para analisar as infactibilidades das soluções o algoritmo de fluxo de potência proposto por Shirmohamadi, Hong, Semlyen e Luo (1988).

3.1 ALGORITMOS VNS

Os algoritmos de busca de vizinhança variável (VNS) têm apresentado grande eficiência na solução de problema de otimização. Algoritmos VNS têm o objetivo de explorar sistematicamente cada uma das vizinhanças estabelecidas para o problema específico sob análise até sua estagnação, mudando de vizinhança para evitar ótimos locais (HANSEN e MLADENOVIC, 1999). Na meta-heurística do tipo VNS a solução corrente é também a solução incumbente no processo de busca, já que ao contrário das outras meta-heurísticas, o algoritmo VNS não permite a degradação da solução corrente para escapar dos ótimos locais, já que quando o algoritmo encontra um ponto de ótimo local, ele muda as estruturas de vizinhança com o objetivo de diversificar as soluções, e se a solução encontrada for um ótimo global, a tentativa de mudar para outras estruturas de vizinhança não gera resultados melhores para a função objetivo, ou seja, é falha, deixando assim a busca estagnada em possível ponto de ótimo. Portanto, o objetivo da VNS é, ao mesmo tempo, encontrar ótimos globais e escapar de ótimos locais (RUPOLO, 2017).

Segundo Mladenovic e Hansen (1997), a estratégia dos algoritmos de vizinhança variável é baseada em três hipóteses:

1. Um mínimo local de uma determinada estrutura de vizinhança pode não ser um mínimo local de outras estruturas de vizinhança;
2. Um mínimo global é visto como um mínimo local de todas as estruturas de vizinhança;

3. Os mínimos locais em relação às outras estruturas de vizinhança são próximos uns dos outros em grande parte dos problemas.

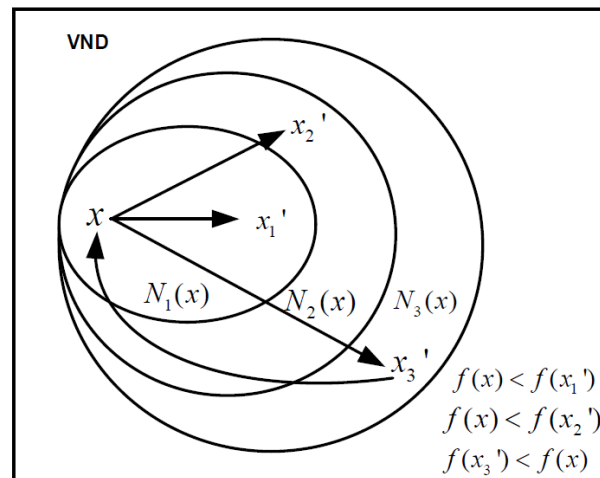
As hipóteses exigem o uso adequado das estruturas de vizinhança para a solução do problema, ou seja, o algoritmo deve ser implementado com estruturas de vizinhança que se adequem a encontrar um ótimo global. Também, é necessário escolher o algoritmo VNS apropriado para a solução do problema, entre os principais, destacam-se o VND (*Variable Neighborhood Descent*), o RVNS (*Reduced Variable Neighborhood Search*), o BVNS (*Basic Variable Neighborhood Search*) e o GVNS (*General Variable Neighborhood Search*).

Para o problema proposto, o algoritmo implementado é o GVNS, que se trata de uma composição de dois algoritmos VNS, o RVNS (*Reduced Variable Neighborhood Search*), utilizado para diversificar as soluções no espaço de busca, e o VND (*Variable Neighborhood Descent*), utilizado para intensificar a busca por ótimos locais.

3.2 O ALGORITMO VND

O algoritmo VND é o algoritmo mais simples dos algoritmos de busca em vizinhança variável, chamado de algoritmo de busca em vizinhança variável de descida. O objetivo é explorar um conjunto de estruturas de vizinhança de intensificação, se diferenciando pela dimensão do espaço de busca. O processo é inicializado com uma solução incumbente x , e, a partir dela geram-se soluções x' na estrutura de vizinhança $N_1(x)$. A melhor solução x' encontrada substitui a solução x e novamente geram-se soluções na vizinhança $N_1(x)$. Caso nenhuma solução x' encontrada seja melhor que x , o algoritmo busca uma melhor solução na vizinhança seguinte, $N_2(x)$, e assim por diante, percorrendo as estruturas de modo sequencial até que não seja possível encontrar uma solução melhor que a incumbente (RUPOLO, 2017). Na Figura 9 ilustra-se o processo de busca do algoritmo VND.

Figura 9 - Processo de busca do algoritmo VND



Fonte: Rupolo, 2017

Na Tabela 1 descreve-se o algoritmo VND.

Tabela 1 - Algoritmo VND

Algoritmo VND
1: Definir outro conjunto N_m de $m_{\max}$ vizinhanças;
2: Definir um critério de parada;
3: Determinar uma solução inicial x ;
4: Enquanto (não satisfeito critério de parada)
5: $m \leftarrow 1$;
6: Enquanto ($m \leq m_{\max}$)
7: Encontrar o melhor vizinho $x' \in N_m(x)$;
8: Se ($f(x') < f(x)$)
9: Então $x \leftarrow x', m \leftarrow 1$;
10: Senão $m \leftarrow m + 1$;
11: Fim Se
12: Fim Enquanto
13: Fim Enquanto

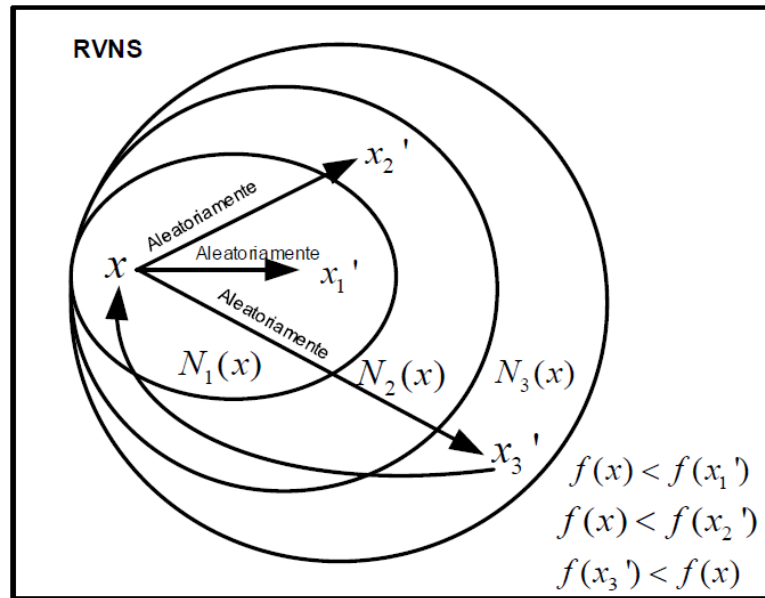
Fonte: Próprio autor

3.3 O ALGORITMO RVNS

O algoritmo RVNS, chamado de algoritmo de busca em vizinhança variável reduzida, utiliza os conceitos de diversificação e intensificação para obter soluções aceitáveis para um determinado problema. Durante o processo de busca, o algoritmo percorre o espaço intensificado de busca de uma determinada estrutura de vizinhança de forma aleatória, assim, as soluções encontradas são diversificadas

(RUPOLO, 2017). De maneira análoga ao VND, a varredura das estruturas de vizinhança acontece até que não seja encontrada uma solução melhor que a solução incumbente. Na Figura 10 ilustra-se o processo de busca do algoritmo RVNS.

Figura 10 - Processo de busca do algoritmo RVNS



Fonte: Rupolo, 2017

Na Tabela 2 descreve-se o algoritmo RVNS.

Tabela 2 - Algoritmo RVNS

Algoritmo RVNS	
1:	Definir outro conjunto N_k de $k_{máx}$ vizinhanças;
2:	Definir um critério de parada;
3:	Determinar uma solução inicial x ;
4:	Enquanto (não satisfeito critério de parada)
5:	$k \leftarrow 1$;
6:	Enquanto ($k \leq k_{máx}$)
7:	Encontrar o melhor vizinho $x' \in N_k$ através da estrutura aleatória
8:	Se ($f(x') < f(x)$)
9:	Então $x \leftarrow x', k \leftarrow 1$;
10:	Senão $k \leftarrow k + 1$;
11:	Fim Se
12:	Fim Enquanto
13:	Fim Enquanto

Fonte: Próprio autor

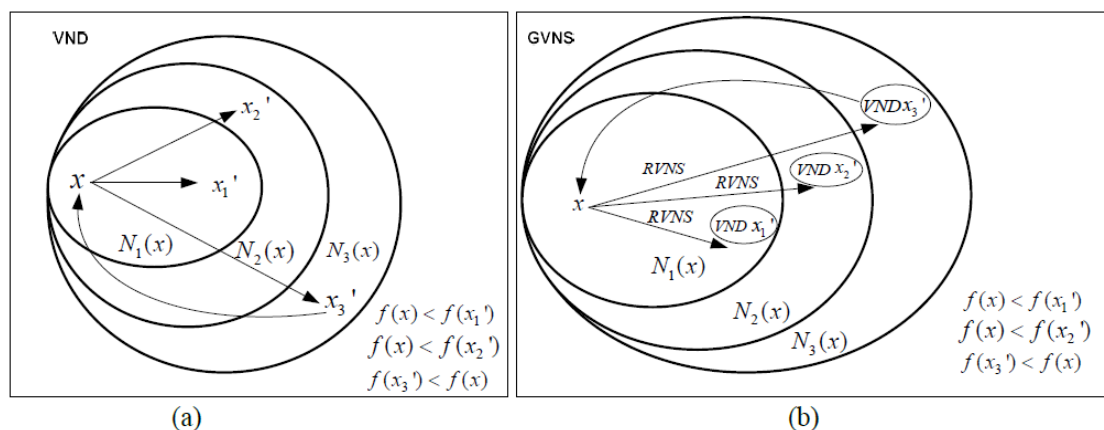
3.4 O ALGORITMO GVNS

O algoritmo GVNS é uma composição dos algoritmos RVNS e VND, que trabalha com dois conjuntos de vizinhanças, denominado conjunto superior para as vizinhanças estabelecidas para o RVNS, e conjunto inferior estabelecido para as vizinhanças do VND. No conjunto superior, o algoritmo RVNS permite que o algoritmo retorne ao processo inicial e substitua a solução incumbente sempre que uma melhor solução for encontrada por meio dos critérios de vizinhança, evitando ótimos locais e diversificando a solução corrente, também tem o objetivo de melhorar a solução corrente que inicia a busca. No conjunto inferior de vizinhanças, o algoritmo VND é responsável pela busca local, ou seja, intensifica o processo de encontrar melhores soluções (RUPOLO, 2017; MLADENOVIC, HANSEN, 1997).

O algoritmo GVNS se mostra eficiente para a solução de diversos problemas de otimização e é o algoritmo proposto neste trabalho para a solução do problema de alocação de chaves de manobra em redes de distribuição na presença de geração distribuída. Na

Figura 11 ilustra-se o processo de busca realizado pelo algoritmo GVNS, onde na Figura 11(a) representa-se o conjunto de vizinhanças para intensificação da busca por soluções, e na Figura 11(b) o conjunto de vizinhanças para a diversificar as soluções no espaço de busca.

Figura 11 - Processo de busca do algoritmo GVNS – (a) Estruturas de busca local. (b) Estruturas de diversificação



Fonte: Rupolo, 2017

Na Tabela 3 descreve-se o algoritmo GVNS.

Tabela 3 - Algoritmo GVNS

Algoritmo GVNS	
1:	Definir um conjunto N_k de $k_{m\acute{a}x}$ vizinhanças para diversificação;
2:	Definir outro conjunto M_m de $m_{m\acute{a}x}$ vizinhanças para intensificação;
3:	Determinar uma solução inicial x ;
4:	Enquanto (não satisfeito critério de parada)
5:	$k \leftarrow 1$;
6:	Enquanto ($k \leq k_{m\acute{a}x}$)
7:	Gerar uma solução $x' \in N_k(x)$;
8:	$m \leftarrow 1$;
9:	Enquanto ($m \leq m_{m\acute{a}x}$)
10:	Encontrar o melhor vizinho $x'' \in M_m(x')$;
11:	Se ($f(x'') < f(x')$)
12:	Então $x' \leftarrow x'', m \leftarrow 1$;
13:	Senão $m \leftarrow m + 1$;
14:	Fim Se
15:	Fim Enquanto
16:	Se ($f(x') < f(x)$)
17:	Então $x \leftarrow x', k \leftarrow 1$;
18:	Senão $k \leftarrow k + 1$;
19:	Fim Se
20:	Fim Enquanto
21:	Fim Enquanto

Fonte: Próprio autor

3.5 O ALGORITMO GVNS DEDICADO AO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CHAVES DE MANOBRAS

O algoritmo dedicado ao problema de alocação de chaves de manobras em redes de distribuição na presença de geração distribuída de fontes renováveis parte de uma solução inicial aleatória, alocando inicialmente duas chaves para cada alimentador em ramos sorteados, onde é permitida a alocação de chaves. O algoritmo GVNS proposto para a solução do problema apresenta um conjunto primário com quatro critérios de vizinhança, $k_{m\acute{a}x} = 4$, cujo objetivo é diversificar a solução corrente através de um algoritmo RVNS, e um conjunto secundário com dois critérios de vizinhança, $m_{m\acute{a}x} = 2$, cujo objetivo é intensificar o processo de busca em um determinado local através do algoritmo VND desenvolvido. O critério de parada estabelecido para o algoritmo GVNS é 05 iterações, onde cada iteração é

definida pela estagnação dos critérios de vizinhança do conjunto primário, de acordo com o algoritmo da Tabela 3.

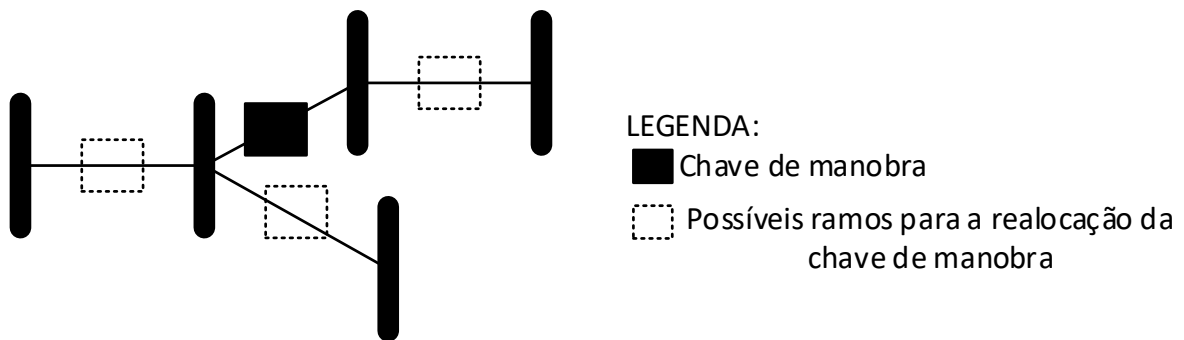
O conjunto primário estabelecido é dado pelas estruturas de vizinhança:

1. *Vizinhança k_1* : Sorteio de n chaves do sistema, onde $1 \leq n \leq 10$, não importando o ramo ou alimentador em que a chave está instalada, cuja busca local é realizada para cada chave sorteada.
2. *Vizinhança k_2* : Selecionar todas as chaves de um alimentador aleatório. Para esta estrutura são feitas 07 tentativas de sorteio de um alimentador, com a possibilidade de repetição de alimentadores entre as tentativas. A busca local é realizada para cada chave sorteada, cujo retorno é imediato caso encontre em qualquer tentativa uma melhor solução.
3. *Vizinhança k_3* : Sorteia todas as posições das n chaves instaladas em um alimentador. Ocorre uma tentativa para cada alimentador, sem a possibilidade de repetição entre as tentativas. A busca local é realizada para cada chave sorteada, cujo retorno é imediato caso encontre em qualquer tentativa uma melhor solução.
4. *Vizinhança k_4* : Instala uma nova chave de manobra em um ramo candidato. A tentativa de instalação da nova chave é realizada apenas uma única vez para cada alimentador, onde a chave instalada e as demais chaves existentes no alimentador são selecionadas para a realização da busca local, cujo retorno é imediato caso encontre melhor solução.

O conjunto secundário estabelecido é dado pelas estruturas de vizinhança:

1. *Vizinhança m_1* : Realoca a chave para o ramo adjacente. A função objetivo é recalculada com a chave em todos os ramos candidatos e adjacentes ao ramo que a chave se encontra, na tentativa de movimentá-la para um melhor local. Na Figura 12 ilustra-se o critério da primeira vizinhança do algoritmo VND.

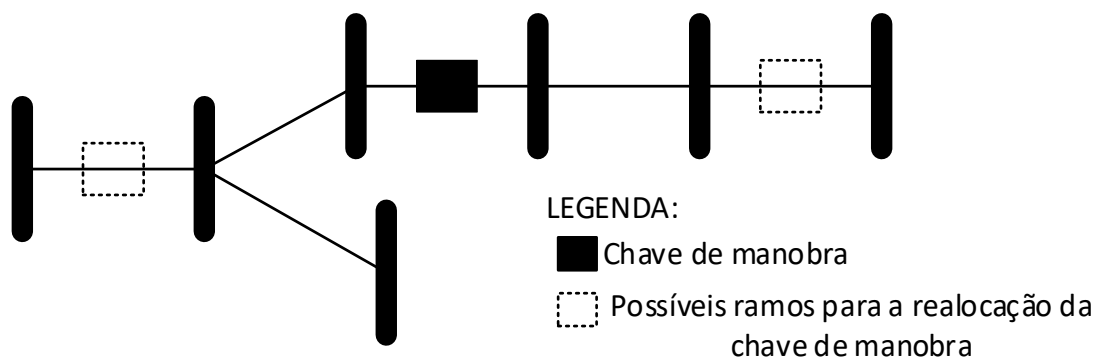
Figura 12 - Primeira vizinhança VND



Fonte: Próprio autor

2. *Vizinhança m_2* : Realoca a chave de manobra para o ramo adjacente ao ramo adjacente onde a chave está localizada. Similar à primeira estrutura de vizinhança do conjunto secundário, a função objetivo é recalculada para todos os possíveis ramos candidatos à alocação que são adjacentes ao ramo adjacente onde a chave está localizada, sendo escolhido o ramo que mais reduz o valor da função objetivo. Na Figura 13 ilustra-se o processo realizado pela segunda vizinhança do algoritmo VND.

Figura 13 - Segunda vizinhança VND

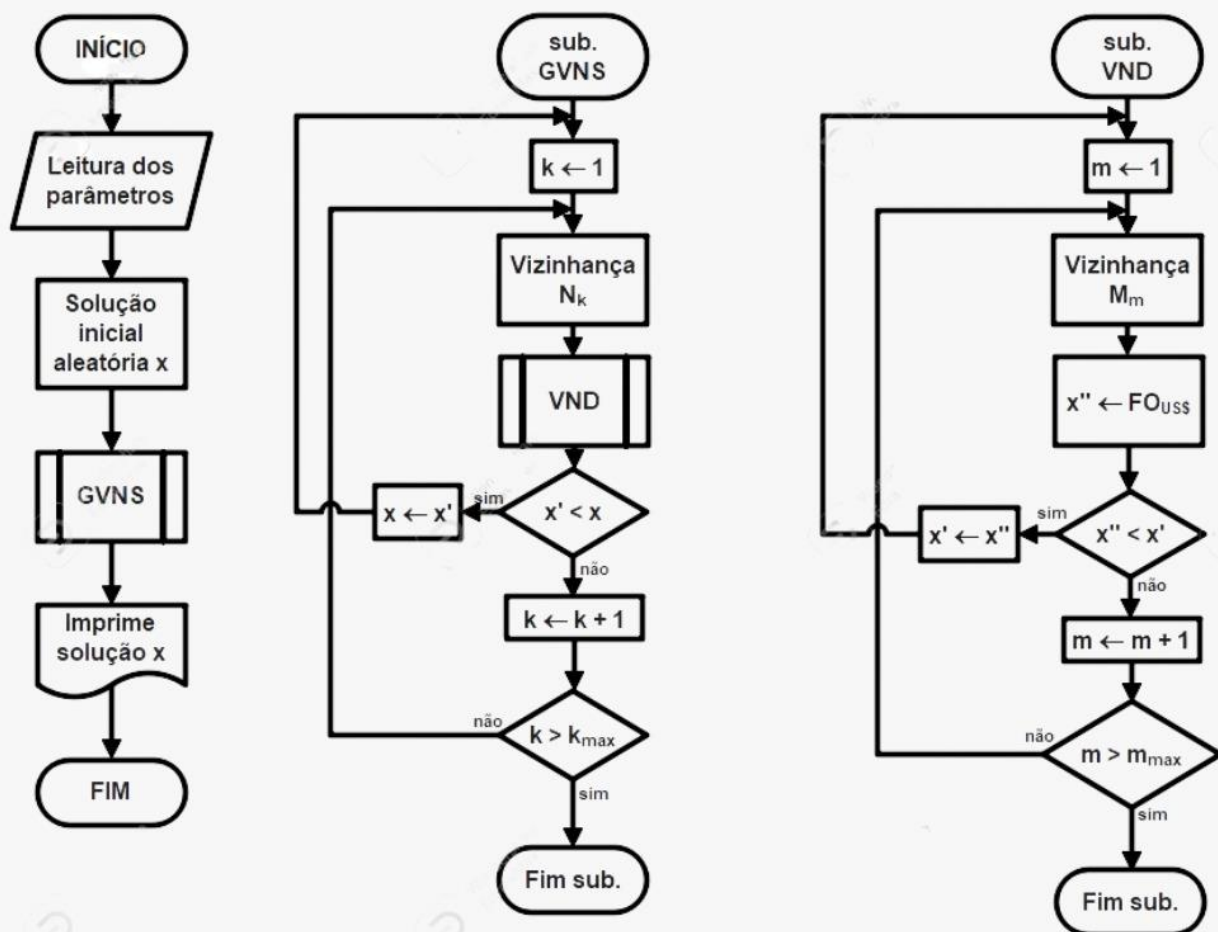


Fonte: Próprio autor

No algoritmo proposto combina-se o algoritmo GVNS com os critérios de vizinhança estabelecidos nesta seção, utilizando no cálculo da função objetivo os resultados da simulação do programa de cálculo de fluxo de potência considerando os geradores distribuídos de fontes renováveis instalados na rede de distribuição primária.

Na Figura 14 encontra-se o diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido para o problema de alocação de chaves proposto.

Figura 14 - Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido

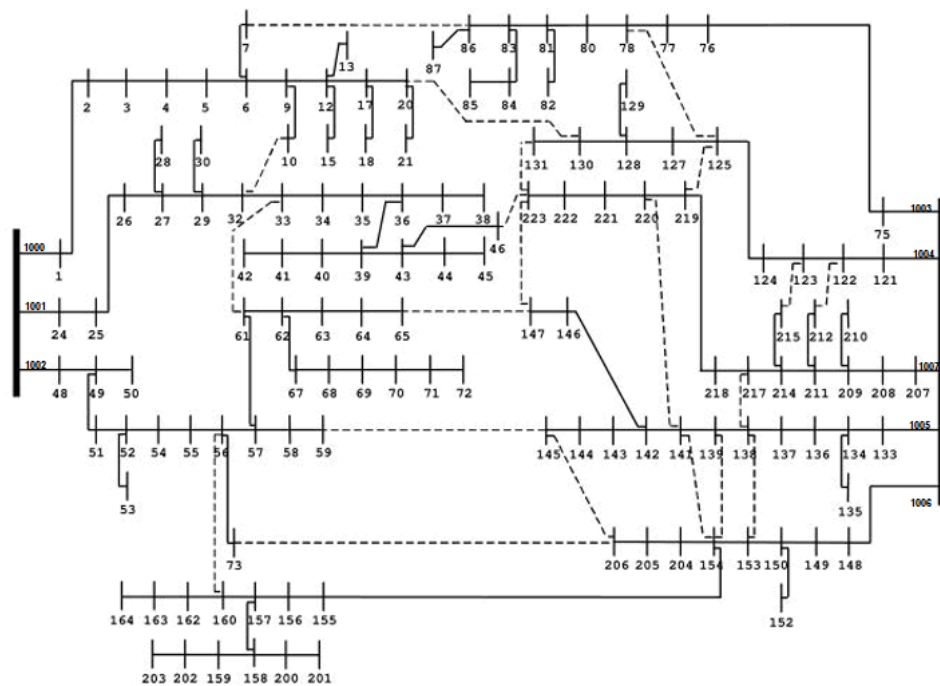


Fonte: Próprio autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O algoritmo desenvolvido foi implementado na linguagem de programação C++ utilizando o software Visual Studio Community 2019. Apresentam-se resultados para o sistema teste de 135 barras, em que o seu diagrama unifilar está representado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 135 barras



Fonte: RUPOLO e MANTOVANI, 2015 (adaptado)

Os dados da demanda do sistema teste são encontrados na literatura referenciada na Figura 15, no entanto, eles foram adaptados, considerando o parâmetro $R = 0,257 \Omega/km$ e que as potências das cargas são maiores. Os dados completos do sistema teste estão apresentados no Apêndice A. Este sistema possui 135 barras, 8 alimentadores e 28 GDs instalados em barras pré-definidas. O somatório da energia não suprida na função objetivo é o somatório da potência ativa das cargas que são desligadas devido a incidência de faltas permanentes nas seções da rede. Os custos das chaves de manobras instaladas são fixos. A função objetivo do problema é dado pela Equação (10), cujas condições de geração distribuída e fluxo de potência são respeitadas.

As condições para o fluxo de potência adotadas para a magnitude das tensões nas barras do sistema é entre 0,95 p.u à 1,05 p.u em operação normal da rede e entre 0,93 p.u à 1,05 p.u com a rede em estado restaurativo, como estabelece o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). A convergência do algoritmo de fluxo de potência implementado se dá pela Equação (4), onde $\varepsilon = 10^{-6}$, e caso não satisfeita é adotado o limite máximo $k = 8$ iterações.

A geração distribuída da rede depende da componente de irradiação solar (IS) e do tempo em horas que cada cenário de irradiação permite a geração da GD durante o período de 1 ano (8760 horas), influenciando diretamente na função objetivo. O custo da energia não suprida (ENS) varia de acordo com a época do ano. Com essas informações, foram definidos 07 cenários para o período de um ano, com valores baseados em consumidores residenciais e geração fotovoltaica, conforme a Tabela 4 (CONCEIÇÃO, 2018 – adaptado; MONTOYA-BUENO, MUNOZ e CONTRERAS, 2015 - baseado).

Tabela 4 - Cenários de operação das GDs no sistema teste

IS(p.u)	Tempo (h)	ENS (US\$/kWh)
0,147268	352	1,65
0,476003	1324,8	1,45
0,476003	1324,8	1,78
0,430219	1950	1,08
0,430219	1950	1,16
0,041415	930	0,92
0,041415	930	1,32

Fonte: Próprio autor

Para a modelagem dos GDs instalados na rede definidos pelas nas Equações (5), (6) e (7) são considerados os parâmetros: $T_{amb} = 20^{\circ}C$, $\tan \varphi = 0,48$, $G = 800 \cdot IS$, $P_{padrão} = 325 W$, $\delta = -0,0045 \text{ } \%/^{\circ}C$ e $TNOP = 45^{\circ}C$ para um módulo fotovoltaico. As barras nas quais são instalados os GDs são baseadas em projetos de iniciação científica do autor, onde cada um é composto por 250 módulos fotovoltaicos instalados, tendo potência máxima instalada de 81,25 kW.

A taxa de falhas do sistema (λ) considerada por quilômetro no período de 1 ano é de 0,072, $\lambda = 0,072 \left(\frac{\text{faltas}}{\text{km.ano}} \right)$. O tempo de reparo da falha considerado é de

4,0h e 0,12h para a isolação do local da falha e efetuar as ações de chaveamentos necessárias. Para as chaves me manobra, foram definidos os custos: $I_{chv} = US\$ 800,00$, $A_{chv} = US\$ 4.500,00$, e, $M_{chv} = US\$ 350,00$ (DE ASSIS, 2014).

Devido a função objetivo considerar os custos das chaves de manobras, a simulação de um período de um ano é inviável, tendo em vista que os custos do equipamento são elevados em relação ao custo da energia não suprida, gerando resultados não satisfatórios. Dessa forma, na função objetivo considera-se com um período de 5 anos, cujo cenário anual é o mesmo da Tabela 4, e as taxas de crescimento e expansão elétrica ou topológica não são aplicadas de forma simplificar a abordagem do problema neste trabalho.

4.1 RESULTADOS FORNECIDOS PELO ALGORITMO GVNS PROPOSTO

O algoritmo implementado foi executado 30 vezes durante a fase de testes, fornecendo resultados coerentes e de qualidade para o problema proposto. Na solução inicial no cálculo da função objetivo considerou-se que existem alocadas aleatoriamente 02 chaves em cada alimentador, totalizando 16 chaves inicialmente alocadas na rede.

Os conjuntos de vizinhança foram definidos anteriormente à fase de testes, onde foram implementadas várias estruturas de vizinhança baseadas na definição teórica do algoritmo GVNS referenciados por Mladenovic e Hansen (1997), cujo melhor conjunto de estrutura para diversificação e intensificação foram escolhidos para a realização dos testes. Em ambos conjuntos, a complexidade da estrutura aumenta conforme a execução do algoritmo avança, consumindo maior tempo de CPU para a sua execução. Consequentemente, as estruturas que mais foram executadas pelo algoritmo são as menos complexas, como é esperado segundo a teoria para o desenvolvimento e implementação do algoritmo GVNS.

A melhor solução encontrada foi de $US\$ 336.198,00$ e a pior foi de $US\$ 349.475,00$, que apresenta uma diferença de aproximadamente 3,95% em relação à melhor solução encontrada. No entanto, para grande parte das soluções encontradas pelo algoritmo não teve diferença superior a 2,00% em relação à

melhor solução encontrada. Na Tabela 5 apresentam-se os resultados encontrado pelo algoritmo nas 30 simulações executadas em ordem crescente, com a quantidade final de chaves alocadas na rede e com o erro percentual em relação à melhor solução encontrada.

Tabela 5 - Resultados encontrados pelo algoritmo GVNS

Simulação	$C_{US\\chv	$CENS_{US\\$}$	$FO_{US\\$}$	N_{chv}	Erro em relação a melhor solução (%)
5	155.100,00	181.098,00	336.198,00	22	-
17	155.100,00	181.632,00	336.732,00	22	0,1588%
2	162.150,00	174.848,00	336.998,00	23	0,2380%
24	176.250,00	160.790,00	337.040,00	25	0,2504%
7	169.200,00	168.046,00	337.246,00	24	0,3117%
19	190.350,00	147.524,00	337.874,00	27	0,4985%
6	169.200,00	169.466,00	338.666,00	24	0,7341%
30	169.200,00	170.860,00	340.060,00	24	1,1487%
18	169.200,00	171.492,00	340.692,00	24	1,3367%
15	169.200,00	171.529,00	340.729,00	24	1,3477%
27	190.350,00	150.798,00	341.148,00	27	1,4723%
1	190.350,00	151.380,00	341.730,00	27	1,6455%
14	183.300,00	158.873,00	342.173,00	26	1,7772%
23	169.200,00	173.102,00	342.302,00	24	1,8156%
28	197.400,00	145.037,00	342.437,00	28	1,8558%
22	169.200,00	173.464,00	342.664,00	24	1,9233%
9	190.350,00	152.507,00	342.857,00	27	1,9807%
10	176.250,00	166.962,00	343.212,00	25	2,0863%
8	183.300,00	160.640,00	343.940,00	26	2,3028%
3	183.300,00	161.003,00	344.303,00	26	2,4108%
21	246.750,00	98.188,00	344.938,00	35	2,5997%
11	183.300,00	162.098,00	345.398,00	26	2,7365%
29	169.200,00	176.346,00	345.546,00	24	2,7805%
26	176.250,00	169.535,00	345.785,00	25	2,8516%
13	190.350,00	156.737,00	347.087,00	27	3,2389%
12	183.300,00	165.233,00	348.533,00	26	3,6690%
20	183.300,00	165.438,00	348.738,00	26	3,7299%
16	176.250,00	172.557,00	348.807,00	25	3,7505%
4	211.500,00	137.583,00	349.083,00	30	3,8326%
25	225.600,00	123.875,00	349.475,00	32	3,9492%

Fonte: Próprio autor

Analisando-se resultados encontrados pelo algoritmo que estão apresentados na Tabela 5, discute-se a sua eficiência para solução do problema de alocação de

chaves em redes de distribuição com GD de fontes renováveis. Uma análise estatística dos resultados encontrados na Tabela 6, onde são encontrados o desvio médio, desvio padrão e média aritmética calculados.

Tabela 6 - Análise estatística dos resultados

Média Aritmética das Soluções (US\$)	Desvio Médio (US\$)	Desvio Padrão (US\$)
342.746,37	3.283,52	4.061,57

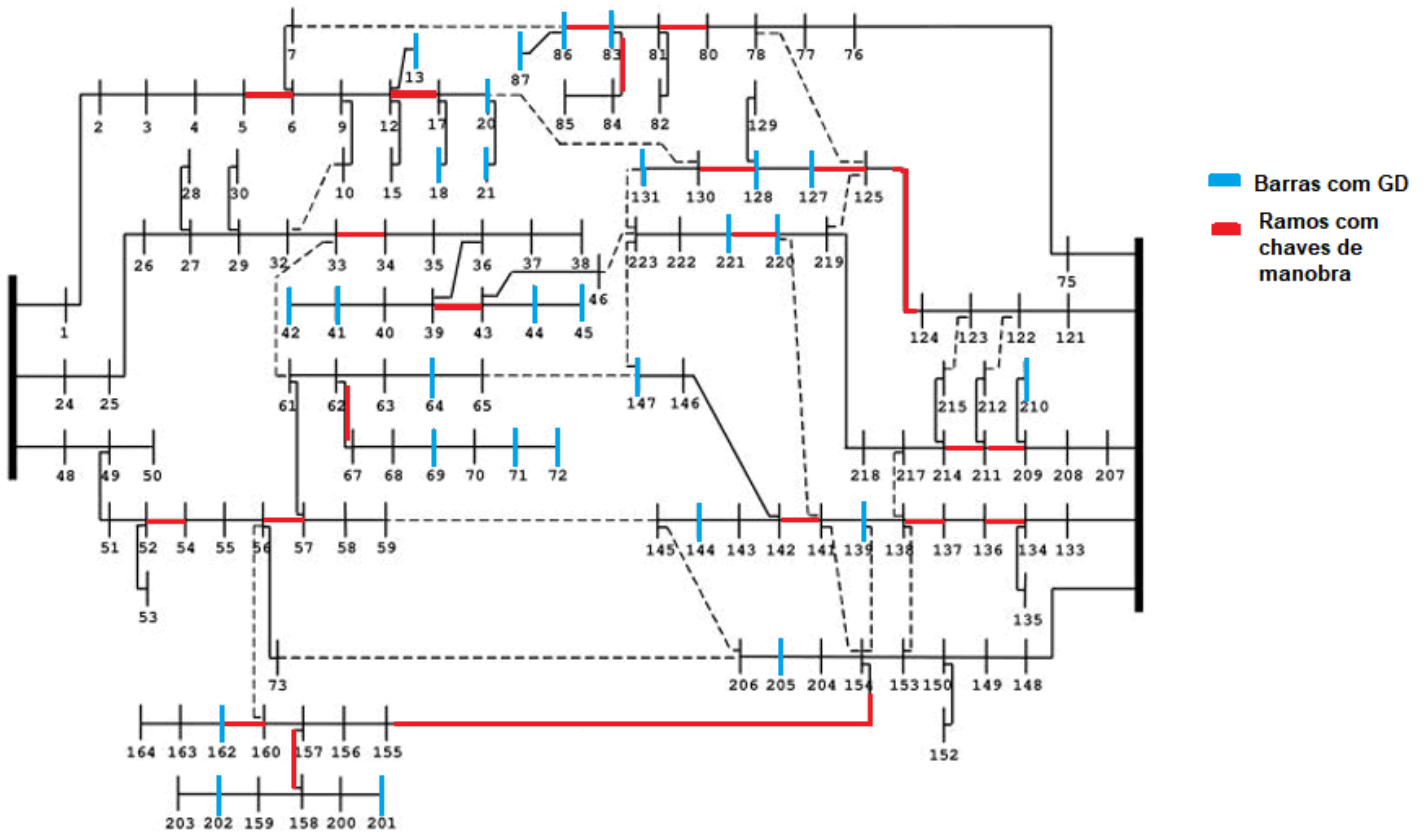
Fonte: Próprio autor

Sendo o desvio médio a dispersão calculada com relação à media aritmética e o desvio padrão dos valores das funções objetivo obtidos das simulações, na Tabela 6 comprova-se a eficiência do algoritmo de uma maneira estatística, onde a diferença do valor em dólar dos resultados encontrados são baixos perto do custo de alocação de chaves e custo de energia não suprida calculado pela função objetivo.

Na Tabela 5, verifica-se que o número de chaves alocadas varia a cada simulação, tendo um total de 35 chaves nas simulação 21, e 22 chaves na simulação 5, sendo esses o maior e menor número de chaves que foram alocadas, lembrando que o algoritmo é inicializado com 16 chaves. Verifica-se que o número de chaves não está relacionado com o ótimo global encontrado pelo algoritmo, mas representa grande importância na redução do valor da função objetivo. Dessa forma, torna-se claro que o local cujas chaves de manobra são instaladas é tão importante quanto o número de chaves que se instala no sistema.

Para a melhor solução, a disposição das 22 chaves alocadas no sistema teste com a presença de 28 barras com GD, é apresentada na Figura 16. Esta solução seria a esperada na prática para o problema de alocação de chaves, onde com um menor número de chaves determinam-se os melhores ramos candidatos para a instalação dos dispositivos de manobras.

Figura 16 - Ramos com chaves alocadas para a melhor solução



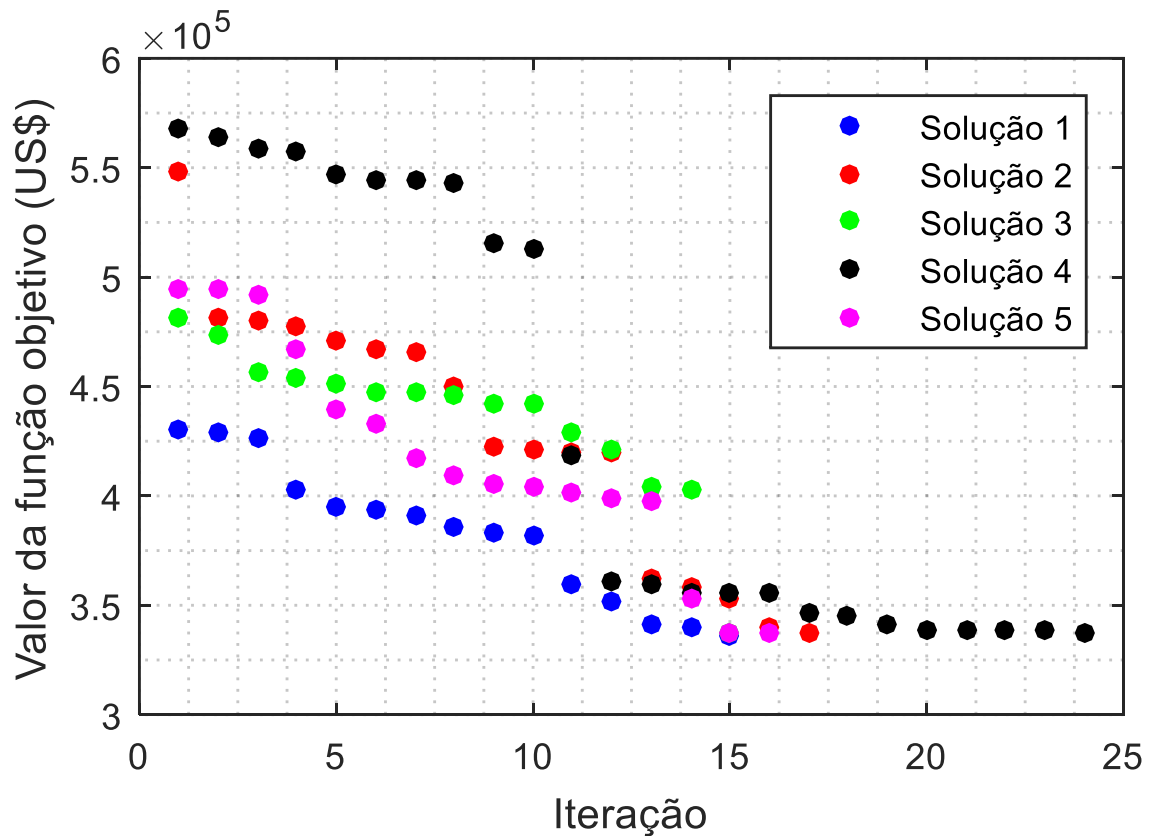
Fonte: RUPOLO e MANTOVANI, 2015 (adaptado)

4.2 ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DAS SOLUÇÕES

As soluções encontradas pelo algoritmo proposto são próximas uma das outras, tendo um baixo desvio em relação à média. No entanto, a solução inicial é gerada considerando um determinado número de chaves de manobras alocadas de maneira aleatória. A atualização da função objetivo até a solução final se dá por um número indefinido de iterações, podendo convergir a um ótimo global com tempo indefinido de processamento. O número de iterações não está relacionado com o valor inicial da função objetivo, ou seja, não importa se o valor inicial da função objetivo é elevado em relação às outras simulações, a implementação computacional do algoritmo pode executar mais ou menos iterações. Nos algoritmos VNS, o que define a solução final é a estagnação dos conjuntos de vizinhanças, não o número de iterações executadas.

Para as 05 melhores soluções encontradas a atualização da função objetivo é mostrada na Figura 17.

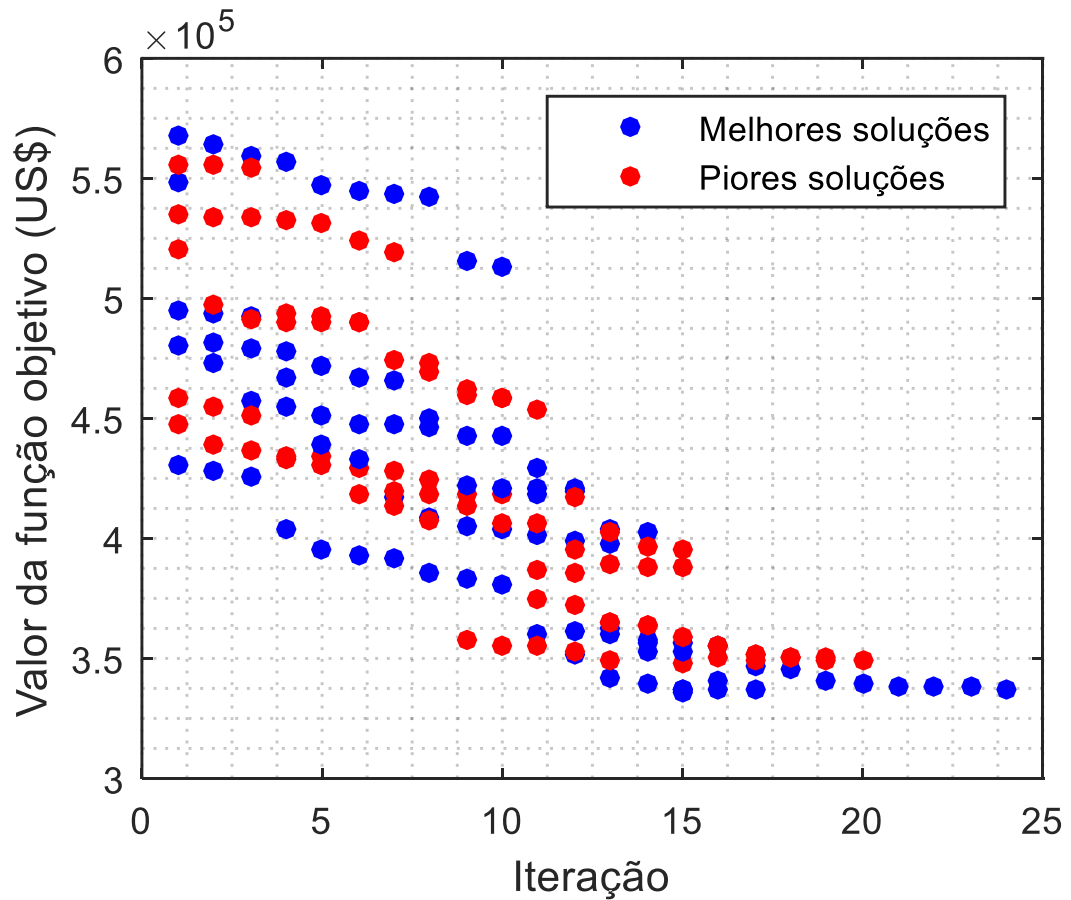
Figura 17 - Convergência do algoritmo GVNS para as 05 melhores soluções encontradas



Fonte: Próprio autor

Para a convergência das 05 melhores e 05 piores soluções encontradas, mostrada na Figura 18, observa-se o comportamento da implementação do algoritmo na atualização da função objetivo, onde com as 10 simulações verifica-se uma dispersão inicial entre os valores iniciais e a convergência para os pontos de ótimos, conforme o avanço das iterações. Entre uma iteração e outra, o valor da função objetivo pode ter pouca variação em sua atualização, como também pode ter uma alta variação. As altas variações são causadas pelo efeito do conjunto primário de estruturas de vizinhança, onde as soluções são diversificadas, fugindo de ótimos locais e permitindo que a busca não fique estagnada em um determinado local do espaço de busca. As pequenas variações são causadas pelo conjunto secundário de vizinhança, onde a busca é executada localmente.

Figura 18 - Convergência do algoritmo para melhores e piores soluções encontradas



Fonte: Próprio autor

Neste problema, grandes variações também podem acontecer na busca local e pequenas variações na busca diversificada, tudo depende de como estão alocadas as chaves na rede e potência injetada nas barras. Em uma região onde existem barras com demandas elevadas ou muito discrepantes entre elas, a simples realocação de uma chave para o ramo adjacente pode causar grande diferença no valor final da função objetivo, enquanto em uma região cujas barras apresentam baixas demandas ou demandas parecidas, a realocação da chave pode ser diversificada que o valor da função objetivo não varia abruptamente entre duas iterações.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema de alocação de chaves de manobra em redes de distribuição de energia elétrica com GDs de fontes renováveis é resolvido de maneira simplificada. Embora tenha sido considerado as fontes de GDs instaladas nas barras do sistema, idealmente os cenários de geração e cargas variam diariamente assim como a capacidade de geração que depende de fatores climáticos. Parâmetros como a taxa de falhas, tempo de reparo e tempo de manobra considerados constantes também variam em função das condições de manutenção e operação do sistema elétrico de potência e do tipo de chave de manobra instalada, em função de seus dispositivos de controle.

Faltas momentâneas de energia foram desconsideradas devido o curto período sem fornecimento de energia, necessitando que uma avaliação sobre a necessidade de manobra deva ser realizada, uma vez que os dispositivos de manobras possuem durante em sua vida útil uma certa quantidade de vezes que o dispositivo pode ser aberto e fechado (CONCEIÇÃO, 2018).

Este trabalho desenvolveu-se considerando os aspectos enumerados nesta seção visando obter uma modelagem mais realista para problema de alocação de chaves de manobras em redes com GDs de fontes renováveis. Este problema também pode ser abordado de forma mais completa nas pesquisas de planejamento de sistema de distribuição, onde além da alocação de chaves de manobras, seja realizada a alocação de GDs na rede de distribuição, considerando na função objetivo o tipo de geração, custos de instalação e manutenção dos geradores, redução de perdas técnicas nos ramos do alimentador, número de GDs que devem ser instalados, equações de redução de gases de efeito estufa, maior número de cenários de operação para explorar os limites do GD e aplicação de taxas de crescimento da demanda e expansão da rede em um período maior que o considerado no presente trabalho, uma vez que equipamentos geradores de fontes renováveis de energia são mais caros e necessitam de uma análise a longo prazo para avaliar os investimentos.

6 CONCLUSÃO

O objetivo do problema de alocação de chaves de manobra em redes de distribuição de energia elétrica com GDs de fontes renováveis instaladas foi atingido através do desenvolvimento de um modelo matemático genérico e da implementação computacional de um algoritmo GVNS. Na modelagem do problema considera-se a minimização do custo da energia não suprida para um período de cinco anos, modelado por uma função objetivo que leva em consideração os custos de aquisição, instalação e manutenção anual das chaves de manobras, a topologia radial do sistema de distribuição e a possibilidade de ocorrer faltas permanentes em todas as seções da rede e que interrompem o fornecimento de energia elétrica para os consumidores.

Para a operação do sistema de distribuição, devido a presença de GDs na rede, a alternativa de operação ilhada foi considerada na incidência de faltas permanentes de energia, além do remanejamento de cargas entre alimentadores por meio de chaves de interconexão. Considerou-se a análise do fluxo de potência através do método numérico *backward-forward*, por ser um método numérico eficiente para análises de redes primárias de distribuição de energia. A taxa de falhas do sistema foi considerada constante para todas as seções, no entanto, idealmente a taxa de falhas varia de valor conforme a seção e período do ano e o estado de manutenção da rede.

Dentre os benefícios da GD para a rede de distribuição, ela melhora o indicador de continuidade relacionado coma energia não suprida, pois garante maior número de possibilidades para reestabelecer a energia para os consumidores de seções jusantes à falta, minimizando o montante de energia não suprida, além de melhorar o perfil de tensão da rede, sendo possível em casos de remanejamento de carga entre os alimentadores manter a tensão dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos regulatórios de energia elétrica.

O algoritmo GVNS foi desenvolvido considerando quatro estruturas de vizinhanças no conjunto primário e duas estruturas de vizinhanças no conjunto secundário, partindo de uma solução inicial, onde 16 chaves foram alocadas de forma aleatória em ramos candidatos na rede. A implementação do algoritmo é

eficiente na solução do problema, obtendo uma solução média de *US\$ 342.746,37* com um desvio padrão de *US\$ 4.061,57* em relação à melhor solução, onde o maior erro percentual obtido em relação à melhor solução foi de aproximadamente 3,95%, mostrando robustez na convergência. A melhor solução encontrada foi de *US\$ 336.198,00*, onde 22 chaves de manobras foram alocadas na rede de distribuição teste. A pior solução encontrada foi de *US\$ 349.475,00*, com a alocação de 32 chaves de manobras. A solução onde o maior número de chaves foi alocado apresenta valor de função objetivo de *US\$ 344.938,00*, onde 35 chaves de manobra são alocadas na rede.

A solução do problema na minimização do custo da energia não suprida, não depende apenas do número de chaves instaladas no sistema, mas dos ramos candidatos nas quais as chaves são alocadas. Através da amostra de 30 simulações realizadas utilizando a implementação computacional do algoritmo, nem sempre alocar um maior número de chaves implica em uma melhor solução para o problema. No entanto, predefinir um número de chaves a ser alocadas, baseado na demanda do alimentador, restringe a otimização feita pelo algoritmo e simplifica a função objetivo do problema. Portanto, a função objetivo modelada com as duas componentes de função objetivo, considerando os custos das chaves de manobra e custo da energia não suprida, se mostra confiável para a solução do problema de alocação de chaves.

Ressalta-se que o problema foi modelado de maneira simplificada, onde maior número de parâmetros do problema de alocação otimização de chaves de manobra pode ser considerado na função objetivo. No entanto, para um planejamento à curto prazo de 05 anos, a função objetivo pode atender as necessidades técnicas da empresa. No planejamento de redes de distribuição a longo prazo, é possível que na modelagem do problema possa ser considerada a alocação de GD, cujo número e local de instalação possa ser definido por um algoritmo de busca, tornando o objetivo de minimizar o custo da energia não suprida ainda mais amplo e realista. Neste caso, um período maior que 05 anos e cenários de operação deve ser considerado para o planejamento, pois custos de instalação e manutenção de GDs na rede são mais elevados em comparação com os custos das chaves de manobras.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Resolução Normativa nº 956, de 2021. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/prodist>. Acesso: 04/01/2022.

ATWA, Y. M; EL-SAADANY, E. F; SALAMA, M. M. A; SEETHAPATHY, R. *Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization*. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 25, no. 1, p. 360–370, 2010.

BILLINTON, R., JONNAVITHULA, S. *Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No 3, 1996. Page(s): 1646-1651.

CASTANHEIRA, Guilherme P.; *Alocação Otimizada de Chaves de Manobra através de um Algoritmo de Busca em Vizinhaça Variável (VNS)*. **Relatório Final PIBIC**, Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2019.

CASTANHEIRA, Guilherme P.; *Alocação Otimizada de Chaves de Manobra para Restauração*. **Relatório Final PIBIC**, Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2020.

CASTANHEIRA, Guilherme P.; *Alocação Otimizada de Chaves de e Geração Distribuída de Fontes Renováveis em Redes de Distribuição de Energia*. **Relatório Final PIBIC**, Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2021.

CELLI, G., PILO, F. *Optimal Sectionalizing Switches Allocation in Distribution Networks*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 14, No 3, 1999. Page(s): 1167-1172.

CHOWDHURY, A. A.; AGARWAL, S. K.; KOVAL, D. O. *Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis*. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 39, n. 5, p. 1493–1498, 2003.

CONCEIÇÃO, Katiane Pereira da; Uma Nova Metodologia para o Desenvolvimento de Projetos de Proteção de Redes Ativas de Distribuição de Energia Elétrica. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2018. Disponível em: [conceicao_kp_dr_ilha.pdf \(unesp.br\)](#)

CRAINIC, Teodor Gabriel; GENDREAU, Michel; HANSEN, Pierre; MLADENović, Nenad. *Cooperative parallel variable neighborhood search for the p-median*. **Journal of Heuristics**, vol. 10, no. 3, p. 293–314, 2004.

DE ASSIS, Laura S; Otimização de Alocação de Chaves em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP, 2014.

EL-KHATTAM, Walid; MEMBER, Student; HEGAZY, Y G; SALAMA, M M A. *An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning*. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 20, no. 2, p. 1158–1165, 2005.

FALAGHI, H.; HAGHIFAM, M.; SING, C. *Ant colony optimization-based method for placement of sectionalizing switches in distribution networks using a fuzzy multiobjective approach*. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 24, n. 1, p. 268–276, 2009.

HANSEN, Pierre; MLADENOVIC, Nenad. *Variable Neighborhood Search: Principles and Applications*. **European Journal of Operational Research**. p 449-467, 22 de Dezembro de 1999.

HEIDARI, A.; AGELIDIS, V. G.; KIA, M.; POU, J.; AGHAEI, J.; SHAFIE-KHAH, M.; CATALAO, J. P. S. *Reliability Optimization of Automated Distribution Networks With Probability Customer Interruption Cost Model in the Presence of DG Units*. **IEEE Transactions on Smart Grid, Piscataway**, v. 8, n. 1, p. 305–315, 2017.

JAYAWEERA, D.; GALLOWAY, S.; BURT, G.; MCDONALD, J. R. *A Sampling Approach for Intentional Islanding of Distributed Generation*. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 22, n. 2, p. 514–521, 2007.

Kagan, N.; Barioni de Oliveira, C.C.; Schmidt, H.P.; Robba, E.J. “Introdução a Sistemas Elétricos de Potência: Componentes Simétricas”. 2ª Edição – São Paulo: Blucher, 2000.

LEVITIN, G., MAZAL-TOV, S., ELMAKIS, D. *Optimal Sectionalizer Allocation in Electric Distribution Systems by Genetic Algorithm*. **Electric Power Systems Research**, Vol. 31, 1994. Page(s): 97-102.

LÓPEZ, J. C.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. *Optimisation-based Switch allocation to improve energy losses and service restoration in radial electrical distribution systems*. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Vol. 10, Iss 11, pp. 2792-2801, Março de 2016.

MELGAR-DOMINGUEZ, O.D.; POURAKBARI-KASMAEI, M.; LEHTONEN, M.; SANCHES MANTOVANI, J.R.. *An economic-environmental asset planning in electric distribution networks considering carbon emission trading and demand response*. **Electric Power Systems Research**, v. 181, p. 106202, 2020.

MELGAR-DOMINGUEZ, O.D.; POURAKBARI-KASMAEI, M.; LEHTONEN, M.; MANTOVANI, J.R.S. *Voltage-dependent load model-based short-term distribution network planning considering carbon tax surplus*. **IET Generation Transmission & Distribution**, v. 13, p. 3760-3770, 2019.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. *Variable neighborhood search*. **Computers & Operations Research**, New York, v. 24, p. 1097–1100, 1997.

MONTOYA-BUENO, Sergio; MUNOZ, Jose Ignacio, CONTRERAS, Javier; *A Stochastic Investment Model for Renewable Generation in Distribution Systems*. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, Vol. 6, no. 4, Outubro de 2015.

RUPOLO, D.; MANTOVANI, J. R. S. *Reconfiguration of Radial Electric Power Distribution System via a Scatter Search Algorithm*. **IEEE Latin America Transactions**, Vol. 13, no. 4, Abril de 2015.

RUPOLO, Diogo. Planejamento Integrado de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Fontes Renováveis de Geração Distribuída na Média e Baixa Tensão. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de

Ilha Solteira - UNESP, 2017. Disponível em: [Microsoft Word - Tese Final Diogo Corrigida Biblioteca \(unesp.br\)](#)

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X.; A. *Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks*, **IEEE Transactions On Power Systems**, Vol. 3, No. 2, Maio de 1988.

SHIRMOHAMMADI, D.; CHENG, C. S. *A three-phase power flow method for real time distribution system analysis*. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 10, n. 2, p. 671-679, 1995.

TENG, Jen-Hao; LIU, Yi-Hwa. *A Novel ACS-Based Optimum Switch Reallocation Method*. **IEEE Transactions On Power Systems**, Vol. 18, NO. 1, Fevereiro de 2003.

TENG, Jen-Hao; LIU, Yi-Hwa. *Feeder-Switch Reallocation for Customer Interruption Cost Minimization*. **IEEE Transactions On Power Delivery**, Vol. 17, NO. 1, Janeiro de 2002.

VELASQUEZ, Miguel A; QUIJANO, Nicanor; CADENA, Angela I.; *Optimal placement of switches on DG enhanced feeders with short circuit constraints*. **Electric Power Systems Research**, Vol. 141, p. 221-232, 2016.

WESZ, Luis Gustavo S. *Desenvolvimento de Uma Metodologia Integrada Para Alocação Otimizada de Dispositivos de Controle e Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2005. Disponível em: [Microsoft Word - tese finalnova05-101.doc \(unesp.br\)](#)

APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA TESTE 135 BARRAS

Os dados do sistema teste de 135 barras foram adaptados do arquivo 135 – Node Distribution Network. Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Elétrica: LaPSEE: Sistemas Testes. [200-]. Tendo os dados contidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados do sistema teste utilizado

Barra Inicial	Barra final	R(Ω)	X(Ω)	P(kW)	Q(kVAr)	Comprimento(km)	Barra final com GD	Ramo com chave de interconexão	Ramo candidato a instalação de chave
1000	1	0,33205	0,76653	0	0	1,292023346	Não	Não	Não
1	2	0,00188	0,00433	47,78	19,009	0,007315175	Não	Não	Não
2	3	0,22324	0,51535	42,551	16,929	0,868638132	Não	Não	Não
3	4	0,09943	0,22953	87,022	34,622	0,38688716	Não	Não	Sim
4	5	0,15571	0,35945	311,31	123,855	0,605875486	Não	Não	Sim
5	6	0,16321	0,37677	148,869	59,228	0,635058366	Não	Não	Sim
6	7	0,11444	0,26417	238,672	94,956	0,445291829	Não	Não	Não
6	9	0,05675	0,05666	62,299	24,786	0,220817121	Não	Não	Sim
9	10	0,52124	0,27418	124,598	49,571	2,028171206	Não	Não	Não
9	12	0,10877	0,1086	140,175	55,768	0,423229572	Não	Não	Sim
12	13	0,39803	0,20937	116,813	46,474	1,548754864	Sim	Não	Não
12	15	0,91744	0,31469	249,203	99,145	3,569805447	Não	Não	Não
12	17	0,11823	0,11805	291,447	115,952	0,460038911	Não	Não	Sim
17	18	0,50228	0,26421	303,72	120,835	1,954396887	Sim	Não	Não
17	20	0,05675	0,05666	215,396	85,695	0,220817121	Sim	Não	Sim
20	21	0,29379	0,15454	198,586	79,007	1,143151751	Sim	Não	Não
1001	24	0,33205	0,76653	0	0	1,292023346	Não	Não	Não
24	25	0,00188	0,00433	0	0	0,007315175	Não	Não	Não
25	26	0,22324	0,51535	0	0	0,868638132	Não	Não	Não
26	27	0,10881	0,25118	30,127	14,729	0,423385214	Não	Não	Sim
27	28	0,71078	0,37388	230,972	112,92	2,765680934	Não	Não	Não
27	29	0,18197	0,42008	60,256	29,458	0,708054475	Não	Não	Sim
29	30	0,30326	0,15952	230,972	112,92	1,18	Não	Não	Não
29	32	0,02439	0,0563	120,507	58,915	0,094902724	Não	Não	Sim
32	33	0,04502	0,10394	0	0	0,175175097	Não	Não	Sim
33	34	0,01876	0,04331	56,981	27,857	0,072996109	Não	Não	Sim
34	35	0,11823	0,11805	364,665	178,281	0,460038911	Não	Não	Sim
35	36	0,02365	0,02361	0	0	0,092023346	Não	Não	Sim
36	37	0,18954	0,0997	124,647	60,939	0,737509728	Não	Não	Não
37	38	0,39803	0,20937	56,981	27,857	1,548754864	Não	Não	Não
36	39	0,05675	0,05666	0	0	0,220817121	Não	Não	Sim
39	40	0,09477	0,04985	85,473	41,787	0,368754864	Não	Não	Sim
40	41	0,41699	0,21934	0	0	1,622529183	Sim	Não	Sim

41	42	0,11372	0,05982	396,735	193,96	0,442490272	Sim	Não	Não
39	43	0,07566	0,07555	0	0	0,294396887	Não	Não	Sim
43	44	0,36960	0,19442	181,152	88,563	1,438132296	Sim	Não	Sim
44	45	0,26536	0,13958	242,172	118,395	1,032529183	Sim	Não	Não
43	46	0,05675	0,05666	75,316	36,821	0,220817121	Não	Não	Não
1002	48	0,33205	0,76653	0	0	1,292023346	Não	Não	Não
48	49	0,11819	0,27283	1,254	0,531	0,459883268	Não	Não	Não
49	50	2,96288	1,01628	6,274	2,66	11,52871595	Não	Não	Não
49	51	0,00188	0,00433	0	0	0,007315175	Não	Não	Sim
51	52	0,06941	0,16024	117,88	49,971	0,270077821	Não	Não	Sim
52	53	0,81502	0,42872	62,668	26,566	3,171284047	Não	Não	Não
52	54	0,06378	0,14724	172,285	73,034	0,248171206	Não	Não	Sim
54	55	0,13132	0,30315	458,556	194,388	0,510972763	Não	Não	Sim
55	56	0,06191	0,14291	262,962	111,473	0,240894942	Não	Não	Sim
56	57	0,11444	0,26417	235,761	99,942	0,445291829	Não	Não	Sim
57	58	0,28374	0,28331	0	0	1,104046693	Não	Não	Sim
58	59	0,28374	0,28331	109,215	46,298	1,104046693	Não	Não	Não
57	61	0,04502	0,10394	0	0	0,175175097	Não	Não	Sim
61	62	0,02626	0,06063	72,809	30,865	0,102178988	Não	Não	Sim
62	63	0,06003	0,13858	258,473	109,57	0,233579767	Não	Não	Sim
63	64	0,03002	0,06929	69,169	29,322	0,116809339	Sim	Não	Sim
64	65	0,02064	0,04764	21,843	9,26	0,080311284	Não	Não	Não
62	67	0,10881	0,25118	0	0	0,423385214	Não	Não	Sim
67	68	0,25588	0,1346	20,527	8,702	0,995642023	Não	Não	Sim
68	69	0,41699	0,21934	150,548	63,819	1,622529183	Sim	Não	Sim
69	70	0,50228	0,26421	220,687	93,552	1,954396887	Não	Não	Sim
70	71	0,33170	0,17448	92,384	39,163	1,290661479	Sim	Não	Não
71	72	0,20849	0,10967	0	0	0,811245136	Sim	Não	Não
56	73	0,13882	0,32047	226,693	96,098	0,540155642	Não	Não	Não
1003	75	0,00750	0,01732	0	0	0,029182879	Não	Não	Não
75	76	0,27014	0,62362	294,016	116,974	1,051128405	Não	Não	Não
76	77	0,38270	0,88346	83,015	33,028	1,489105058	Não	Não	Sim
77	78	0,33018	0,7622	83,015	33,028	1,284747082	Não	Não	Sim
78	80	0,32830	0,75787	103,77	41,285	1,277431907	Não	Não	Sim
80	81	0,17072	0,39409	176,408	70,184	0,664280156	Não	Não	Sim
81	82	0,55914	0,29412	83,015	33,028	2,175642023	Não	Não	Não
81	83	0,05816	0,13425	217,917	86,698	0,226303502	Sim	Não	Sim
83	84	0,70130	0,3689	23,294	9,267	2,728793774	Não	Não	Sim
84	85	1,02352	0,53839	5,075	2,019	3,982568093	Não	Não	Não
83	86	0,06754	0,15591	72,638	28,899	0,262801556	Sim	Não	Sim
86	87	1,32352	0,45397	405,99	161,523	5,149883268	Sim	Não	Não
1004	121	0,01126	0,02598	0	0	0,04381323	Não	Não	Não
121	122	0,72976	1,68464	100,182	42,468	2,839533074	Não	Não	Não
122	123	0,22512	0,51968	142,523	60,417	0,875953307	Não	Não	Não
123	124	0,20824	0,48071	96,042	40,713	0,810272374	Não	Não	Sim
124	125	0,04690	0,10827	300,454	127,366	0,182490272	Não	Não	Sim

125	127	0,61950	0,61857	141,238	59,873	2,410505837	Sim	Não	Sim
127	128	0,34049	0,33998	279,847	118,631	1,324863813	Sim	Não	Sim
128	129	0,56862	0,29911	87,312	37,013	2,212529183	Não	Não	Não
128	130	0,10877	0,1086	243,849	103,371	0,423229572	Não	Não	Sim
130	131	0,56862	0,29911	247,75	105,025	2,212529183	Sim	Não	Não
1005	133	0,01126	0,02598	0	0	0,04381323	Não	Não	Não
133	134	0,41835	0,96575	89,878	38,101	1,627821012	Não	Não	Não
134	135	0,10499	0,13641	1137,28	482,108	0,408521401	Não	Não	Não
134	136	0,43898	1,01338	458,339	194,296	1,708093385	Não	Não	Sim
136	137	0,07520	0,02579	385,197	163,29	0,292607004	Não	Não	Sim
137	138	0,07692	0,17756	0	0	0,299299611	Não	Não	Sim
138	139	0,33205	0,76653	79,608	33,747	1,292023346	Sim	Não	Sim
139	141	0,08442	0,19488	87,312	37,013	0,32848249	Não	Não	Sim
141	142	0,13320	0,30748	0	0	0,518287938	Não	Não	Sim
142	143	0,29320	0,29276	74,001	31,37	1,140856031	Não	Não	Sim
143	144	0,21753	0,21721	232,05	98,369	0,846420233	Sim	Não	Não
144	145	0,26482	0,26443	141,819	60,119	1,030428016	Não	Não	Não
142	146	0,10318	0,23819	0	0	0,401478599	Não	Não	Sim
146	147	0,13507	0,31181	76,449	32,408	0,525564202	Sim	Não	Não
1006	148	0,00938	0,02165	0	0	0,036498054	Não	Não	Não
148	149	0,16884	0,38976	51,322	21,756	0,656964981	Não	Não	Não
149	150	0,11819	0,27283	59,874	25,381	0,459883268	Não	Não	Sim
150	152	2,28608	0,78414	9,065	3,843	8,895252918	Não	Não	Não
150	153	0,45587	1,05236	2,092	0,887	1,77381323	Não	Não	Sim
153	154	0,69600	1,60669	16,735	7,094	2,708171206	Não	Não	Sim
154	155	0,45774	1,05669	1506,522	638,634	1,781089494	Não	Não	Sim
155	156	0,20298	0,26373	313,023	132,694	0,789805447	Não	Não	Sim
156	157	0,21348	0,27737	79,831	33,842	0,830661479	Não	Não	Sim
157	158	0,54967	0,28914	51,322	21,756	2,138793774	Não	Não	Sim
158	159	0,54019	0,28415	0	0	2,101906615	Não	Não	Sim
157	160	0,04550	0,05911	202,435	85,815	0,177042802	Não	Não	Sim
160	162	0,47385	0,24926	60,823	25,784	1,843774319	Sim	Não	Sim
162	163	0,86241	0,45364	45,618	19,338	3,355680934	Não	Não	Não
163	164	0,56862	0,29911	0	0	2,212529183	Não	Não	Não
158	200	0,77711	0,40878	157,07	66,584	3,023774319	Não	Não	Sim
200	201	1,08038	0,5683	0	0	4,20381323	Sim	Não	Não
159	202	1,09933	0,57827	250,148	106,041	4,277548638	Sim	Não	Sim
202	203	0,47385	0,24926	0	0	1,843774319	Não	Não	Não
154	204	0,32267	0,74488	69,809	29,593	1,255525292	Não	Não	Sim
204	205	0,14633	0,33779	32,072	13,596	0,569377432	Sim	Não	Não
205	206	0,12382	0,28583	61,084	25,894	0,481789883	Não	Não	Não
1007	207	0,01126	0,02598	0	0	0,04381323	Não	Não	Não
207	208	0,64910	1,49842	94,622	46,26	2,525680934	Não	Não	Não
208	209	0,04502	0,10394	49,858	24,375	0,175175097	Não	Não	Não
209	210	0,52640	0,18056	123,164	60,214	2,048249027	Sim	Não	Não
209	211	0,02064	0,04764	78,35	38,304	0,080311284	Não	Não	Sim

211	212	0,53071	0,27917	145,475	71,121	2,065019455	Não	Não	Não
211	214	0,09755	0,2252	21,369	10,447	0,379571984	Não	Não	Sim
214	215	0,11819	0,27283	74,789	36,564	0,459883268	Não	Não	Não
214	217	0,13882	0,32047	227,926	111,431	0,540155642	Não	Não	Sim
217	218	0,04315	0,09961	35,614	17,411	0,167898833	Não	Não	Sim
218	219	0,09192	0,2122	249,295	121,877	0,35766537	Não	Não	Sim
219	220	0,16134	0,37244	316,722	154,842	0,627782101	Sim	Não	Sim
220	221	0,37832	0,37775	333,817	163,199	1,472062257	Sim	Não	Sim
221	222	0,39724	0,39664	249,295	121,877	1,545680934	Não	Não	Não
222	223	0,29320	0,29276	0	0	1,140856031	Não	Não	Não
7	86	0,13132	0,30315	0	0	0,510972763	Não	Sim	Não
10	32	0,26536	0,13958	0	0	1,032529183	Não	Sim	Não
20	130	0,14187	0,14166	0	0	0,552023346	Não	Sim	Não
46	223	0,08512	0,08499	0	0	0,331206226	Não	Sim	Não
33	61	0,04502	0,10394	0	0	0,175175097	Não	Sim	Não
59	145	0,14187	0,14166	0	0	0,552023346	Não	Sim	Não
65	147	0,14187	0,14166	0	0	0,552023346	Não	Sim	Não
73	206	0,03940	0,09094	0	0	0,153307393	Não	Sim	Não
78	125	0,12944	0,29882	0	0	0,503657588	Não	Sim	Não
125	219	0,01688	0,03898	0	0	0,065680934	Não	Sim	Não
131	223	0,33170	0,17448	0	0	1,290661479	Não	Sim	Não
139	154	0,14187	0,14166	0	0	0,552023346	Não	Sim	Não
138	217	0,07692	0,17756	0	0	0,299299611	Não	Sim	Não
138	153	0,07692	0,17756	0	0	0,299299611	Não	Sim	Não
141	154	0,07692	0,17756	0	0	0,299299611	Não	Sim	Não
141	220	0,07692	0,17756	0	0	0,299299611	Não	Sim	Não
145	206	0,26482	0,26443	0	0	1,030428016	Não	Sim	Não
160	56	0,49696	0,64567	0	0	1,933696498	Não	Sim	Não
212	122	0,17059	0,08973	0	0	0,663774319	Não	Sim	Não
215	123	0,05253	0,12126	0	0	0,204396887	Não	Sim	Não
223	147	0,29320	0,29276	0	0	1,140856031	Não	Sim	Não

Fonte: 135 – Node Distribution Network. Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Elétrica: LaPSEE:

Sistemas Testes. [200-] (Adaptado).Disponível em:

<https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>