

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ISABELLA DE FREITAS FEITEIRA

**RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO USANDO UMA
ESTRATÉGIA BASEADA NA META-HEURÍSTICA GRASP**

Ilha Solteira

2021

ISABELLA DE FREITAS FEITEIRA

**RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO USANDO UMA
ESTRATÉGIA BASEADA NA META-HEURÍSTICA GRASP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP como parte dos requisitos
para obtenção de título de Engenheira
Eletricista.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Orientador

**Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo
Possagnolo**

Colaborador

Ilha Solteira

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F311r Feiteira, Isabella de Freitas.
Reconfiguração de sistemas de distribuição usando uma estratégia baseada na meta-heurística GRASP / Isabella de Freitas Feiteira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
72 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica)-
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021

Orientador: Ruben Augusto Romero Lázaro

Coorientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

Inclui bibliografia

1. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. 2. Meta-Heurística GRASP. 3. VND.


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 treze dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e um, a discente *Isabella de Freitas Feiteira*, matriculada sob o nº 152054758, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro, o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite e a Prof^a. Dr^a. Anna Diva Plasencia Lotufo apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO USANDO UMA ESTRATÉGIA BASEADA NA META-HEURÍSTICA GRASP" obtendo a nota 10.0 (dez ponto zero) e conceito aprovada.



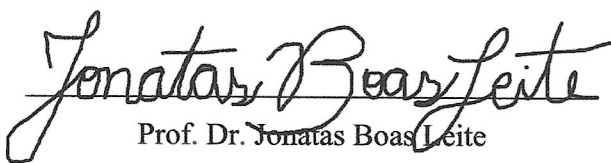
Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

- orientador -



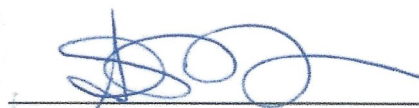
Isabella de Freitas Feiteira

- discente -



Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Membro da Banca -

Prof^a. Dr^a. Anna Diva Plasencia Lotufo

- Membro da Banca -

DEDICO

À minha mãe **Neide** e ao meu pai **Luiz Sérgio**,
que me proporcionaram a oportunidade de
estudar e conquistar este diploma.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que sou e vivo.

Aos meus pais por serem minha base, por acreditarem em mim e ficarem ao meu lado em todos os momentos. E a toda minha família pelo amor, compreensão e apoio.

Ao Fabio pela dedicação, amor e cuidado, e por me ajudar a conquistar este sonho.

Ao professor Ruben Romero pela oportunidade, por todo ensinamento e por confiar no meu potencial. E a todos do laboratório LAPSEE, em especial ao Leonardo que me auxiliou em tudo que precisei e me fez enxergar possibilidades para minha experiência acadêmica.

Aos grandes amigos que tive nesta trajetória, em especial à Jéssica e à Aline por enfrentarmos de mãos dadas todas as etapas desta grande conquista.

À UNESP e todos seus colaboradores, pela infraestrutura, respaldo e por tornar possível o sonho de cada estudante.

À FAPESP, por me proporcionar recurso financeiro (proc. 2017/11902-6) possibilitando dedicação à pesquisa e participação de um congresso nacional.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos é
senão uma gota de água no mar. Mas o mar
seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um método de resolução para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando uma meta-heurística especializada GRASP (do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*). A reconfiguração do sistema de distribuição é realizada pela mudança de status das chaves de interconexão da rede e através dela a solução radial ótima pode ser encontrada. O algoritmo proposto tem objetivo de estabelecer uma topologia radial que minimize o valor de perdas do sistema, despendendo de pouco esforço computacional e com menor tempo de resposta possível. As restrições operacionais da rede, como o limite de tensão nas barras e os limites de correntes nos circuitos, são verificadas por meio do cálculo de fluxo de carga, o qual também é responsável pela apuração da função objetivo do problema (perdas no sistema). O algoritmo é composto por três fases, sendo elas: pré-processamento, fase construtiva e, por fim, fase de melhoria local. Dentre as estratégias utilizadas, na terceira fase foi aplicado o conceito de busca em vizinhança variável com a estrutura VND (do inglês, *Variable Neighborhood Descent*). O algoritmo foi implementado em linguagem MATLAB® testando os sistemas de 33, 84, 136 e 415 barras. Os resultados encontrados foram comparados com os existentes na literatura e adicionalmente, foi feita uma comparação de desempenho e resultados encontrados com o parâmetro de aleatoriedade $\alpha = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ e $1,0$.

Palavras-chave: Fluxo de carga. GRASP. MATLAB®. Meta-heurística. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. VND.

ABSTRACT

This work presets a method of resolution for the electric distribution network reconfiguration problem using a specialized GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) metaheuristic. The reconfiguration of the distribution network is performed by changing the statuses of the network interconnection switches and through it the optimal radial solution can be found. The proposed algorithm aims to establish a radial topology that minimizes the value of the losses of the system, spending minimum computational effort and with the lowest computational time as possible. Operational network constraints, such as the voltage limit on the buses and the current limits on the circuits, are verified through the load flow calculation, which is also responsible for calculating the objective function of the problem (network losses). The algorithm consists of three phases: pre-processing, constructive phase, and, finally, a local search phase. Among the strategies used, in the third phase, the concept of search in variable neighborhood was applied with the VND (Variable Neighborhood Descent) structure. The algorithm was implemented in MATLAB® testing the systems of 33, 84, 136, and 415 buses. The results found were compared with those existing in the literature and additionally, a performance comparison was conducted, and results were found for the following values for the randomization parameter: $\alpha = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ e $1,0$.

Keywords: Load Flow. GRASP. MATLAB®. Metaheuristic. Reconfiguration of electric distribution networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência.	17
Figura 2 – Sistema malhado operando radialmente.	17
Figura 3 – Sistema de 14 barras.	20
Figura 4 – Representação de uma proposta de solução.	31
Figura 5 – (a) Sistema de 14 barras, (b) formação laço 'M', (c) formação laço 'N', (e) Formação laço 'O'.	33
Figura 6 – Método para obter topologias radiais.	34
Figura 7 – (a) Formação dos laços 'M' e 'N', (b) formação do laço 'P'.	34
Figura 8 – Estrutura do algoritmo VND.	36
Figura 9 – Sistema de 33 barras.	40
Figura 10 – Perfis de tensão no sistema de 33 barras com e sem reconfiguração.	42
Figura 11 – Sistema de 84 barras.	43
Figura 12 – Perfis de tensão no sistema de 84 barras com e sem reconfiguração.	45
Figura 13 – Sistema de 136 barras.	46
Figura 14 – Perfis de tensão no sistema de 136 barras com e sem reconfiguração.	48
Figura 15 – Sistema de 415 barras.	49
Figura 16 – Perfis de tensão no sistema de 415 barras com e sem reconfiguração.	51
Figura 17 – (a) Sistema exemplo original, (b) sistema exemplo renumerado.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados para o sistema de 33 barras.	41
Tabela 2 – Resultados para o sistema de 84 barras.	44
Tabela 3 – Resultados para o sistema de 136 barras.	47
Tabela 4 – Resultados para o sistema de 415 barras.	50
Tabela 5 – Avaliação de impacto do parâmetro de aleatoriedade.	52
Tabela 6 – Dados do sistema de 33 barras.	59
Tabela 7 – Dados do sistema de 84 barras.	60
Tabela 8 – Dados do sistema de 136 barras.	62
Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GRASP	Do inglês, <i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
RSDEE	Reconfiguração do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SD	Sistema de Distribuição
RCL	Do inglês, <i>Restricted Candidate List</i>
LaPSEE	Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica
AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
SDH	Do inglês, <i>Steepest Descent Heuristic</i>
VNS	Do inglês, <i>Variable Neighborhood Search</i>
BVNS	Do inglês, <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
RVNS	Do inglês, <i>Reduce Variable Neighborhood Search</i>
GVNS	Do inglês, <i>General Variable Neighborhood Search</i>
VND	Do inglês, <i>Variable Neighborhood Descent</i>
FC	Fluxo de Carga

LISTA DE SÍMBOLOS

v	Função objetivo
g_{ij}	Condutância do ramo ij
x_{ij}	Variável binária para operação do ramo ij
V_i	Módulo de tensão na barra i
V_j	Módulo de tensão na barra j
θ_{ij}	Diferença angular das tensões nas barras ij
P_i^{SE}	Potência ativa fornecida pela subestação na barra i
P_i^D	Potência ativa demandada na barra i
P_{ij}	Fluxo de potência ativa no ramo ij
Q_i^{SE}	Potência reativa fornecida pela subestação na barra i
Q_i^D	Potência reativa demandada na barra i
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa no ramo ij
N	Conjunto de barras do sistema
B	Conjunto de ramos do sistema
$\bar{V}$	Limite máximo de tensão nas barras
$\underline{V}$	Limite mínimo de tensão nas barras
I_{rij}	Componente real da corrente no ramo ij
I_{mij}	Componente imaginária da corrente no ramo ij
$\bar{I}_{ij}$	Limite máximo de corrente no ramo ij
b_{ij}	Susceptância no ramo ij
nb	Número de barras do sistema
nr	Número de ramos do sistema
X	Conjunto de índices das variáveis que podem ser escolhidas
$h(x_i)$	Função indicadora de sensibilidade
h^{max}	Parâmetro máximo da função indicadora de sensibilidade
h^{min}	Parâmetro mínimo da função indicadora de sensibilidade
N^{GRASP}	Número de repetições das fases construtiva e de melhoria local

S_{ij}	Fluxo de potência aparente do ramo ij
$\overline{S}_{ij}$	Parâmetro máximo de potência aparente do ramo ij
$\underline{S}_{ij}$	Parâmetro mínimo de potência aparente do ramo ij
α	Parâmetro de aleatoriedade do algoritmo
v'	Função objetivo penalizada
ρ	Fator de penalização
β_i	Variável binária para violação de tensão na barra i
γ_{ij}	Variável binária para violação de corrente no ramo ij

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. CONTEXTO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	20
2.1 O CONCEITO DO PROBLEMA DE RSDEE	21
2.2 MODELO MATEMÁTICO PARA O RSDEE	22
2.3 TÉCNICAS UTILIZADAS NA LITERATURA ESPECIALIZADA	24
3. META-HEURÍSTICA GRASP	27
3.1 FUNDAMENTOS DA META-HEURÍSTICA	27
3.2 CONCEITO DA META-HEURÍSTICA GRASP	28
3.2.1 Fase de pré-processamento	28
3.2.2 Fase construtiva	29
3.2.3 Fase de melhoria local	30
3.3 PARTICULARIDADES DA APLICAÇÃO DO GRASP AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	31
3.3.1 Representação da Solução	31
3.3.2 Restrição de Radialidade	32
3.3.3 Geração de Propostas Radiais	32
3.3.4 Uso do Fluxo de Carga Radial	35
3.3.5 Conceito de Busca em Vizinhança Variável	35
4. META-HEURÍSTICA GRASP APLICADA AO PROBLEMA RSDEE	37
4.1 FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO	37
4.2 FASE CONSTRUTIVA	37
4.3 FASE DE MELHORIA LOCAL	39
5. TESTES E RESULTADOS	40
5.1 SISTEMA DE 33 BARRAS	40
5.2 SISTEMA DE 84 BARRAS	42
5.3 SISTEMA DE 136 BARRAS	45
5.4 SISTEMA DE 415 BARRAS	48
6. CONCLUSÕES	53
7. REFERÊNCIAS	54
ANEXOS	59
A DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS	59
A.1 Sistema de 33 barras	59
A.2 Sistema de 84 barras	60

A.3 Sistema de 136 barras	61
A.4 Sistema de 415 barras	64
B ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL DE VARREDURA	72

1. INTRODUÇÃO

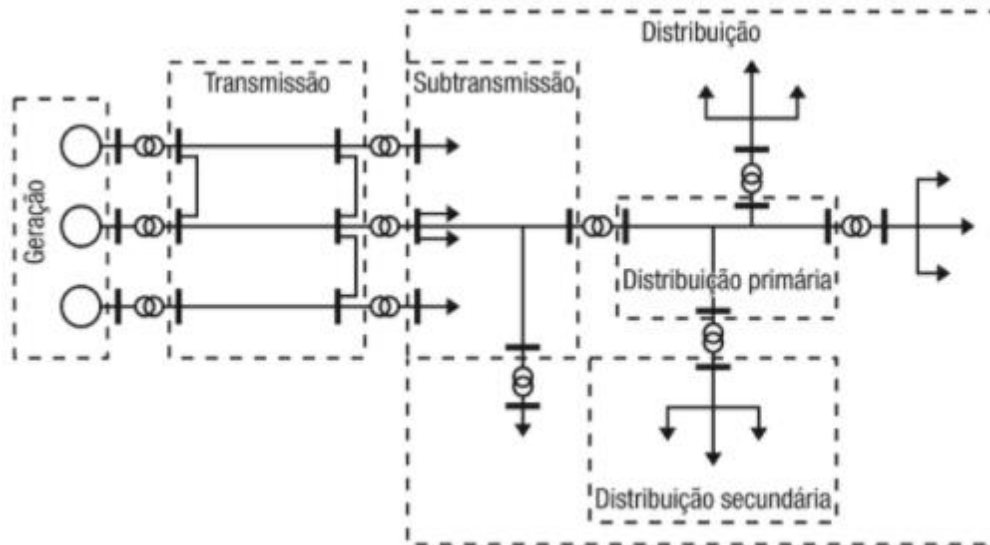
Este trabalho consiste no desenvolvimento de um algoritmo usando a meta-heurística GRASP (do inglês, Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) aplicado ao problema de otimização de reconfiguração de distribuição de energia elétrica (RSDEE) com um perfil de demanda conhecido, visando estabelecer a solução ótima, ou seja, uma topologia radial que minimize o valor de perdas do sistema, despendendo de pouco esforço computacional e com menor tempo de resposta possível.

Problemas de otimização combinatória são aqueles que envolvem um número grande, mas finito, de alternativas e podem surgir em diferentes ambientes como na indústria, no governo e na ciência. Podem ser exemplificados por projetos de localização de seções eleitorais e alocação de eleitores, redes eficientes de telecomunicações, programação de operações em uma fábrica, zoneamento escolar, logística de veículos de entrega, entre muitos outros (FEO; RESENDE, 1995).

No Brasil a energia chega ao consumidor final através da interligação das malhas de transmissão, subtransmissão e dos sistemas de distribuição primário e secundário. Toda essa estrutura está compreendida pelo SIN – Sistema Interligado Nacional, supervisionado, operado e controlado pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Em parte da região Norte, Mato Grosso e no arquipélago de Fernando de Noronha existe a presença de sistemas isolados, os quais não estão interligados ao SIN, visto que a energia gerada por diferentes meios é totalmente consumida na própria região de produção (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS, 2021).

De maneira geral as etapas da energia elétrica a partir de um centro de geração seriam: (i) subestação elevadora; (ii) sistema de transmissão (tensão entre 500-138 kV); (iii) subestação abaixadora; (iv) sistema de subtransmissão (tensão entre 138-34,5 kV) podendo suprir demandas de grandes usuários; (v) segunda subestação abaixadora; (vi) sistema de distribuição primária (tensão entre 34,5-13,8 kV) podendo suprir demandas de clientes de médio porte; (vii) transformadores de distribuição; e (viii) sistema de distribuição secundária (tensão entre 380-127 V) atendendo demandas de consumidores de baixa tensão. Estas possibilidades citadas podem ser visualizadas na Figura 1.

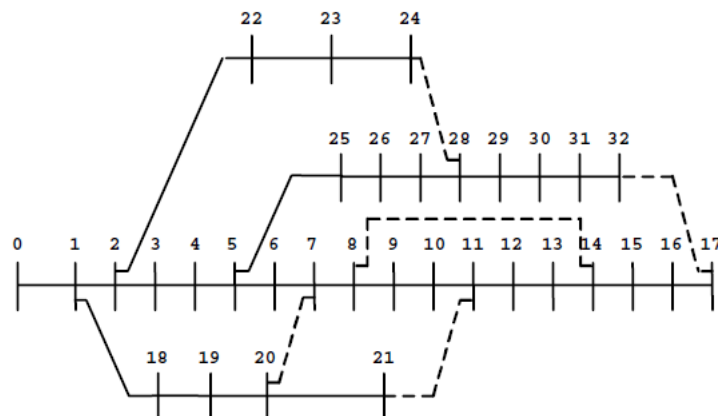
Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência.



Fonte: Kagan, Oliveira e Robba (2000).

A topologia construída para a rede de distribuição primária é malhada, porém, opera de maneira radial, o que significa que o sistema não apresenta laços. Como pode ser observado na Figura 2, existem dois tipos de estados das chaves seccionadoras no sistema: normalmente fechadas, representadas pelas linhas contínuas, que fazem a conexão efetiva entre as barras, e normalmente abertas, representadas pelas linhas tracejadas que poderiam conectar as barras 7-20, 8-14, 11-21, 17-32 e 24-28. Neste exemplo a configuração escolhida para as chaves não permite que o sistema apresente fechamentos de malha (laços), tornando a operação radial (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2000).

Figura 2 – Sistema malhado operando radialmente.



Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

A reconfiguração do sistema de distribuição ocorre por meio da abertura e fechamento de chaves de interconexão da rede, com intuito de controlar e/ou planejar a operação do sistema, isto é, restaurar o serviço para o maior número de consumidores possível após a ocorrência de uma falta e/ou para balancear as cargas do sistema afim de reduzir perdas. No sistema de distribuição primário as chaves seccionadoras possuem duas funções: gerenciar a configuração da rede e isolar faltas (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

Os sistemas elétricos estão suscetíveis a faltas, sendo o tipo mais comum o curto-circuito (monofásico, bifásico ou trifásico), normalmente provocado pela ação de descargas atmosféricas, contato com árvores e animais, falhas de equipamentos e/ou erro humano, podendo gerar sobrecorrente e desbalanceamento na tensão da rede (SOUZA, 2008).

A abordagem heurística é a mais aplicada para resolver problemas que envolvem um extenso número de alternativas, tornando impraticável a estratégia de enumeração explícita visto que o número de combinações cresce, em geral, exponencialmente com o tamanho do problema. De acordo com Feo e Resende (1995), as técnicas meta-heurísticas mais promissoras são *simulated annealing*, *tabu search*, algoritmos genéticos e o GRASP.

A técnica GRASP é um processo iterativo que consiste em duas fases, a construtiva e a de busca local. Na fase de construção é criada uma solução factível, escolhendo-se um elemento por vez, sendo que a cada iteração de construção a escolha do elemento é randômica e determinada por meio de uma lista dos melhores elementos candidatos, chamada *restricted candidate list* (RCL). A solução gerada na fase construtiva não possui garantia de ser a solução ótima local em relação a sua vizinhança. Por este motivo é aplicada a fase de busca local em que a solução corrente é sucessivamente substituída por soluções melhores existentes em sua vizinhança. Esta fase é encerrada quando não houver soluções melhores que a corrente (FEO; RESENDE, 1995).

Uma topologia radial corresponde a uma árvore geradora do ponto de vista da teoria de grafos. O problema de reconfiguração pode ser formulado como sendo encontrar uma árvore geradora mínima a qual minimiza perdas satisfazendo as seguintes restrições: (1) as duas leis de Kirchhoff, que podem ser representadas por um problema de fluxo de carga radial generalizado; (2) os valores de tensão nas barras devem estar dentro de limites específicos; (3) a capacidade de corrente nos condutores deve ser respeitada; e (4) a configuração deve ser radial.

Além destas restrições, o problema de reconfiguração apresenta particularidades quando resolvido por meio de meta-heurísticas, sendo elas uma estratégia eficiente para a geração de topologias radiais iniciais e de novas topologias a partir da inicial, e ainda, o caráter altamente combinatório do problema.

O presente trabalho será disposto em capítulos da seguinte forma:

Capítulo 2: serão apresentados o contexto e a definição do problema de RSDEE, seu modelo matemático, bem como as técnicas de otimização usadas para solução do problema.

Capítulo 3: será exposto o conceito de meta-heurística, a definição da técnica GRASP, e todas as especificidades que devem ser seguidas para sua aplicação.

Capítulo 4: irá retratar a concepção da meta-heurística GRASP para o problema de reconfiguração, o funcionamento de cada fase do algoritmo proposto neste trabalho, e também seu fluxograma representativo.

Capítulo 5: exibirá os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo para quatro sistemas amplamente utilizados na literatura especializada.

Anexo A: serão descritos os dados dos quatro sistemas testados pelo algoritmo proposto no trabalho.

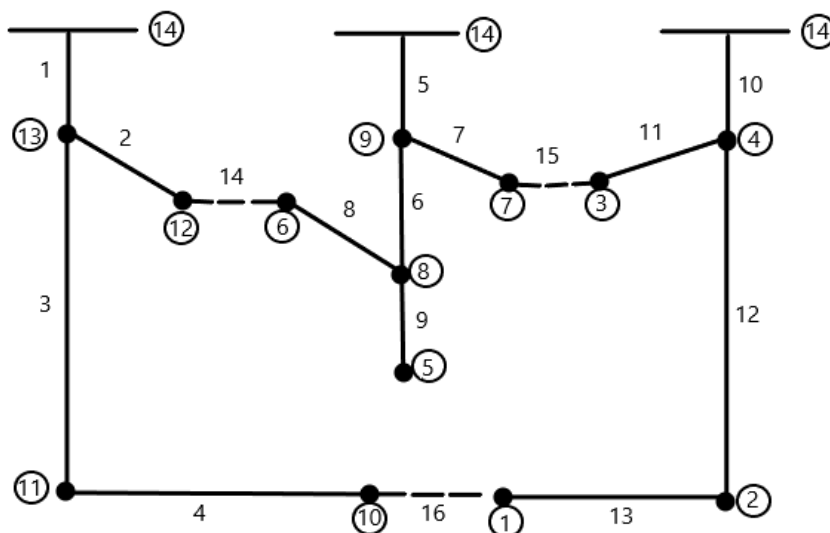
Anexo B: por fim, demonstrará a estrutura do algoritmo de fluxo de carga radial de varredura utilizado no trabalho.

2. CONTEXTO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema de distribuição possui configuração malhada, mas opera de forma radial. Para isso ser possível, é preciso que alguns ramos da rede estejam desligados, os chamados ramos de ligação. O conjunto de circuitos (ramos) que permanecem ligados é chamado de árvore geradora, do ponto de vista da teoria dos grafos. Para gerar uma nova topologia radial, dada uma configuração inicial radial, faz-se necessária uma troca adequada entre um ramo da árvore por um ramo de ligação.

Para melhor visualização, na Figura 3 está sendo apresentado um sistema de pequeno porte, o qual é bastante utilizado na literatura especializada. Os números circulados representam as barras do circuito e os demais números representam os ramos. Pode-se observar que a estrutura construída é malhada, isto é, existe a possibilidade de fechar laços no sistema, mas como os ramos 14, 15 e 16 são ramos de ligação classifica-se uma configuração radial. Dada esta primeira topologia inicial, para criar-se uma nova proposta basta, por exemplo, fechar o ramo 15 e abrir um subsequente tendo como opções o ramo 5, 7, 10 ou 11.

Figura 3 – Sistema de 14 barras.



Fonte: Civanlar et al. (1988)

Através deste exemplo pode-se entender a quantidade de possíveis soluções para este problema, mas deve-se levar em consideração que nem toda topologia radial é factível e produz um baixo nível de perdas para o sistema. De qualquer maneira, resolver este problema de forma enumerativa e/ou de forma manual é impraticável e por este motivo são aplicadas as meta-heurísticas.

Segundo Saha (2009), citado por Pessoa (2017), um sistema de distribuição possui as seguintes características:

- Operação radial;
- Contém alimentadores principais (primários) e secundários;
- Alimenta cargas em média tensão e/ou baixa tensão;
- A maioria dos circuitos são trifásicos, sendo que em redes rurais existe a presença de circuitos monofásicos;
- Normalmente o sistema de distribuição é suprido por um único alimentador de alta tensão;
- Atualmente a presença de geração distribuída está aumentando no sistema; e
- Os grandes motores presentes no sistema de distribuição, diante de uma situação de falta, podem funcionar como um “gerador distribuído”.

2.1 O CONCEITO DO PROBLEMA DE RSDEE

A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é realizada por meio da abertura e fechamento de chaves de interconexão do sistema, e pode ser usada como ferramenta de controle em tempo real e/ou de planejamento da operação do sistema. Quando utilizada para planejamento tem objetivo de obter a melhor distribuição possível, ou seja, a solução que apresenta perdas mínimas e atende as demandas diárias com devida qualidade de energia. Por outro lado, quando usada para o controle da operação do sistema tem o intuito de restaurar a rede devido a um curto-circuito ou até mesmo para balancear as cargas do sistema; dado que este procedimento ocorre em tempo real, o tempo de resposta da reconfiguração é uma variável importante e deve ter o menor valor possível (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

O algoritmo proposto neste trabalho tem como objetivo minimizar perdas do sistema por meio da reconfiguração da rede de distribuição, isto é, encontrar a configuração radial, dentre as configurações possíveis, que resulte nas perdas mínimas de potência no SD. A solução proposta deve satisfazer as seguintes restrições de operação:

- (i) Limite de tensão;
- (ii) Capacidade de corrente das linhas e transformadores;
- (iii) Limites de confiabilidade;
- (iv) As duas leis de Kirchhoff; e
- (v) A configuração deve ser radial.

Para um problema ser resolvido com aplicação de meta-heurísticas é preciso que exista uma estratégia eficiente de geração de topologia radial para ser utilizada como a proposta inicial do problema, além disso, uma outra estratégia eficiente para criação de novas topologias radiais a partir da inicial, uma vez que o problema possui um caráter altamente combinatório. O problema de RSDEE pode ser solucionado por técnicas meta-heurísticas, as quais serão brevemente apresentadas no item 2.3 deste trabalho.

2.2 MODELO MATEMÁTICO PARA O RSDEE

O modelo matemático para o problema de RSDEE para minimização de perdas ativas é representado a partir das seguintes equações, adaptado de Franco et al. (2012):

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

sujeito a:

$$P_i^{SE} - P_i^D - \sum_{j \in N_i} x_{ij} P_{ij} = 0 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$Q_i^{SE} - Q_i^D - \sum_{j \in N_i} x_{ij} Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

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

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

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in B \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in B} x_{ij} = |N| - 1 \quad (7)$$

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

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

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

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

A equação (1) é referente à função objetivo do problema, isto é, o valor das perdas ativas de energia na operação, sendo que ij representa um ramo do sistema, B o conjunto de ramos do sistema (operando e não operando), o parâmetro g_{ij} é a condutância do ramo ij e x_{ij} é uma variável binária que indica o estado de operação do ramo ij ($x_{ij} = 0$ se o ramo não estiver operando e $x_{ij} = 1$ em caso contrário). Além disso, V_i representa o módulo de tensão na barra i sendo que deve respeitar os valores $\underline{V}$, que é o limite mínimo de tensão nas barras, e $\overline{V}$, que é limite máximo. E, por fim, $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ que representa a diferença angular das tensões nas barras i e j .

Na equação (2), tem-se: P_i^{SE} e P_i^D sendo potência ativa fornecida pela subestação e potência ativa demandada na barra i , respectivamente, e P_{ij} o fluxo de potência ativa no ramo ij . Em que N representa o conjunto de barras do sistema e N_i o conjunto de barras conectadas à barra i . Na sequência, para a equação (3), são apresentados: Q_i^{SE} e Q_i^D sendo potência reativa fornecida pela subestação e potência reativa demandada na barra i , respectivamente, e Q_{ij} o fluxo de potência reativa no ramo ij . Já na equação (4), encontra-se: $I_{r_{ij}}$ e $I_{m_{ij}}$ que são as partes real e imaginária da corrente no ramo ij , respectivamente, e $\bar{I}_{ij}$ que é o limite máximo de corrente no ramo ij . O parâmetro ainda não apresentado e que é utilizado nas equações (8, 9, 10 e 11) é b_{ij} que se refere à susceptância do ramo ij .

A função objetivo v minimiza as perdas ativas no sistema. As restrições (2) e (3) são os balanços de potência ativa e reativa no sistema e representam a aplicação da primeira lei de

Kirchhoff. As restrições (4) e (5) representam os limites de magnitude de tensão nas barras e de corrente nos ramos do sistema, respectivamente. A restrição (6) indica a natureza binária da variável de decisão x_{ij} . A restrição (7) é uma condição necessária para que a solução seja radial, e que em conjunto com (2) e (3) garante a topologia radial do sistema elétrico. As restrições (8) e (9) calculam os valores de fluxos de potência ativa e reativa no sistema, respectivamente, e em conjunto com (2) e (3) impõem a segunda lei de Kirchhoff. Por fim, (10) e (11) fornecem os valores das partes real e imaginária da corrente, usadas na equação (5).

2.3 TÉCNICAS UTILIZADAS NA LITERATURA ESPECIALIZADA

Na literatura especializada utilizada como referência para este trabalho pode-se indicar algumas opções de estratégias para resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica por meio da utilização da otimização clássica, meta-heurísticas e/ou técnicas heurísticas de otimização. Em relação às técnicas de heurísticas podem ser citados trabalhos como: Merlin e Black, (1975), Civanlar et al. (1988), Goswami e Basu, (1992), Gomes et al. (2005) e Schimdt et al. (2005).

O primeiro, Merlin e Black, (1975), gerou grande impacto na literatura especializada. Sua proposta consiste em gerar uma topologia radial partindo da topologia malhada com todos os ramos fechados. Para isso a cada iteração é retirado um ramo, dentre aqueles que preservam a conectividade do sistema de distribuição, sendo que o ramo retirado é aquele que leva o menor valor de fluxo de potência aparente para a topologia corrente. O processo iterativo termina quando se encontra uma topologia radial. Para um sistema com nb barras e nr ramos o processo termina após retirar $(nr - nb + 1)$ ramos. Em cada passo, deve-se resolver um problema de fluxo de carga para sistemas de distribuição ligeiramente malhados.

A ideia fundamental que sustenta a heurística é a retirada daqueles ramos que produzem menor variação de fluxos de potência aparente nos ramos quando comparados com a distribuição de fluxos do sistema malhado. Assim, existe a observação empírica de que a distribuição de fluxos de potência do sistema malhado é aquela que produz menores perdas como também foi observado posteriormente em Ritter, Franco e Romero (2015). Essa proposta fundamental foi usada em muitos trabalhos, incorporada em estruturas de otimização mais complexas e também foi usada neste trabalho.

Em Civanlar et al. (1988), dado um sistema radial, com o fechamento de um ramo de ligação, é formado um laço no sistema e para definir qual ramo do laço formado será aberto utiliza-se uma comparação entre o módulo da tensão nas barras ligadas ao ramo que fora fechado. Isto é feito para reduzir as quantidades de possíveis soluções visto que os ramos conectados a barra de menor módulo de tensão serão desconsiderados. E após esta redução de possibilidades é usada a técnica baseada no cálculo do fluxo de carga.

Já em Goswami e Basu, (1992) desenvolveram um novo algoritmo de reconfiguração do alimentador que otimiza o padrão de fluxo em um único ciclo do sistema. O algoritmo fecha apenas um ramo em determinado instante e volta para a topologia radial abrindo o mesmo ramo ou algum outro ramo, dentre os presentes no laço formado, dependendo do resultado do padrão de fluxo ideal, também desenvolvido pelos autores. Na sequência, em Gomes et al. (2005), combinou-se dois procedimentos heurísticos, sendo eles uma rotina de fluxo de energia Newton-Raphson, bem como rotinas para executar buscas de barras e verificação de laço no sistema.

Por fim, em Schimdt et al. (2005) é apresentada uma heurística de troca de ramos. Assim, deve-se verificar se uma troca de ramos simples (um ramo é fechado e outro é aberto em um determinado laço) produz uma diminuição de perdas. Se a topologia vizinha produziu uma diminuição das perdas, então essa topologia se transforma na nova topologia corrente. Essa estratégia pode ser generalizada para encontrar estruturas de vizinhança em meta-heurísticas mais complexas. Assim, as chamadas vizinhanças N1 e N2 usadas neste trabalho são uma generalização da proposta apresentada por Schimdt.

Por outro lado, alguns trabalhos que utilizaram técnicas meta-heurísticas para resolução do problema de RSDEE, são elencados a seguir: Mendoza et al. (2006), Carreño, Romero e Padilha-Feltrin (2008), Delbem, Carvalho e Bretas (2005), Possagnolo (2015) e Salazar, Gallego e Romero (2006).

Em Mendoza et al. (2006) é apresentado um algoritmo genético aplicado ao problema de reconfiguração. Essa proposta pode ser considerada como sendo relevante porque apresenta uma das primeiras proposições de representação de uma proposta de solução que trabalha em espaço de busca reduzido em que os operadores genéticos geram, quase sempre, topologias radiais. Deve-se observar que um dos principais problemas na aplicação de algoritmos genéticos e evolucionários em geral era a dificuldade em gerar suas topologias radiais a partir de duas topologias radiais geradoras e preservando a informação genética das

topologias radiais geradoras. A proposta apresentada em Mendoza et al. (2006) é inovadora nesse aspecto.

Em Carreño, Romero e Padilha-Feltrin (2008) é apresentado um algoritmo genético aplicado ao problema da reconfiguração em que existe um controle completo das topologias radiais geradas pelos operadores de recombinação e de mutação e ainda é preservada a informação genética presente nas topologias radiais geradoras.

Em Delbem, Carvalho e Bretas (2005), foi proposta uma nova codificação de árvore com base na representação de cadeia de grafos, além disso, foram desenvolvidos operadores genéticos que usam a codificação proposta para gerar novas soluções, sendo que a proposição é capaz de representar florestas (grafos compostos por um conjunto de árvores).

Em Salazar, Gallego e Romero (2006) é desenvolvido um método de otimização do problema de reconfiguração usando a técnica de redes neurais artificiais e que apresenta resultados promissores. E por fim, em Possagnolo (2015) é apresentado um algoritmo de busca em vizinhança variável, chamado de *Variable Neighborhood Search* (VNS) para o problema de reconfiguração. O aspecto importante deste trabalho é a idealização de estruturas de vizinhanças que aumentam em tamanho e complexidade. No algoritmo GRASP desenvolvido neste trabalho é usada uma das estruturas de vizinhança (VND) para implementar a fase de busca local.

Na literatura especializada, a aplicação de técnicas exatas de otimização de modelos completos do problema da reconfiguração é muito recente. A principal dificuldade é que não existia um modelo matemático completo que incorporasse a exigência de radialidade para a solução ótima através de relações algébricas simples. Esse problema foi resolvido apenas em 2012 por pesquisadores do LaPSEE – Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, em Lavorato et al. (2012). Propostas alternativas para o controle da radialidade no modelo matemático são apresentadas em Farivar e Low (2013), Jabr, Singh e Pal (2012) e Jabr (2006).

Quando existe um modelo matemático, então pode ser resolvido usando *solvers* comerciais cada vez mais eficientes e poderosos existentes no mercado. Assim, se o modelo resultante for um modelo de programação não linear inteira mista, então pode ser usado o solver comercial KNITRO no ambiente AMPL. Por outro lado, se o modelo for uma programação linear inteira mista ou de programação cônica de segunda ordem como em Jabr (2006), então pode ser usado o solver comercial CPLEX no ambiente AMPL.

3. META-HEURÍSTICA GRASP

3.1 FUNDAMENTOS DA META-HEURÍSTICA

As técnicas heurísticas são usadas para encontrar soluções de alta qualidade para problemas complexos, visto que problemas são complexos quando possuem característica de explosão combinatória e/ou modelagem matemática complexa, como por exemplo, restrições não lineares, região factível não convexa, variáveis inteiras ou discretas. Heurísticas são técnicas vantajosas para utilizar em casos que: (1) Não existe um método exato de otimização para resolução; (2) Os dados apresentam incerteza; (3) Na prática, a solução ótima não é muito importante; (4) Existem limitações de tempo de processamento e/ou de memória de armazenamento de dados; e (5) Se tem o objetivo de encontrar uma solução inicial como ponto de partida na execução de uma técnica de otimização (ROMERO; LAVORATO, 2012).

A técnica heurística é um processo de otimização que encontra solução do problema usando informação de um índice de performance. Este índice pode ser simples, baseado no senso comum do pesquisador, ou pode ser obtido por meio da resolução de um problema complexo geralmente ligado à análise de sensibilidade do modelo matemático original, ou versões relaxadas (CARREÑO; ROMERO; PADILHA-FELTRIN, 2008).

Por outro lado, meta-heurísticas são processos de generalização e/ou integração entre duas técnicas heurísticas, sendo elas o algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso (AHC) e a heurística de busca através de vizinhança (SDH, do inglês *Steepest Descent Heuristic*), visando percorrer o espaço de busca para encontrar soluções de alta qualidade.

De forma geral o AHC é um procedimento do tipo passo a passo, isto é, a cada iteração é escolhido um elemento ou componente para compor a proposta de solução, e essa escolha é feita utilizando um indicador de sensibilidade que demonstra o elemento mais interessante baseado no índice de performance do problema em questão. Já o SDH parte de uma solução inicial factível, chamada de solução corrente, e percorrendo o espaço de busca encontra novas soluções. Se a solução encontrada é melhor que a corrente, então a corrente é atualizada, caso contrário a nova solução não é utilizada. O processo termina quando nenhuma solução vizinha é melhor que a solução corrente (ROMERO; LAVORATO, 2012).

3.2 CONCEITO DA META-HEURÍSTICA GRASP

A meta-heurística GRASP foi proposta por Feo e Resende (1995), e consiste num processo iterativo em que cada iteração é formada pelas fases construtiva e de busca local. Assim como descrito no item anterior, o GRASP é uma técnica de combinação do algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso, nomeado neste trabalho como fase construtiva, e a heurística de busca através de vizinhança, nomeada como fase de melhoria local ou busca local. A fase de pré-processamento, que será apresentada na sequência, é a etapa em que os elementos pretendentes são incorporados ou descartados da proposta de solução reduzindo o espaço de busca (FEO; RESENDE, 1995).

Para exemplificar de forma genérica, na sequência é apresentado o passo a passo da meta-heurística GRASP, segundo Romero e Lavorato, (2012):

Passo 1: Determinar a forma de codificação das propostas de solução. Definir o modo de avaliação de qualidade da função objetivo. Identificar um AHC e um SDH para serem usados nas fases construtiva e de melhoria local, respectivamente.

Passo 2: Ler os dados, implementar a fase de pré-processamento e determinar o valor de α .

Passo 3: Executar a fase construtiva e obter uma proposta de solução.

Passo 4: Executar a fase de melhoria local e atualizar a solução corrente, caso a nova solução encontrada seja melhor que a corrente.

Passo 5: Se o critério de parada não for satisfeito, voltar ao passo 2. Caso contrário, parar. A solução final do algoritmo será a corrente armazenada.

3.2.1 Fase de pré-processamento

O objetivo central desta etapa é diminuir o espaço de busca identificando os elementos que têm grandes chances de fazer parte da solução ótima e descartando aqueles que não têm. Esta identificação é feita a partir de atributos (subestruturas) que permitem iniciar o processo de busca de forma mais eficiente. Podem ser utilizadas estratégias que fixam variáveis inteiras ou binárias nos valores ótimos antes de iniciar o processamento, como também, podem ser usadas estratégias de geração de restrições as quais descartam uma parte da região factível por não fazerem parte da solução ótima (ROMERO; LAVORATO, 2012).

3.2.2 Fase construtiva

Esta fase tem como ideia central gerar uma solução de qualidade. Para isso primeiro cria-se uma lista de elementos candidatos, chamada lista RCL, com base num indicador de sensibilidade escolhido para o problema. Esta lista pode ter um ou vários elementos, dependendo do indicador utilizado. A partir desta lista restrita inicia-se o processo de construção de uma solução, em que a cada iteração um elemento da RCL é escolhido para formar a solução. O processo se encerra quando uma solução é criada, independente se factível ou não, e o custo desta proposta é avaliada. Esta etapa é tida como uma escolha randômica que caracteriza a componente probabilística do algoritmo (RESENDE, 2007).

De forma geral, o passo 3 do algoritmo GRASP apresenta a seguinte sequência de acontecimentos:

- i. Escolher a solução inicial podendo ser vazia (solução em construção).
- ii. Usando um indicador de sensibilidade, elaborar uma lista RCL com k componentes mais atrativas.
- iii. Escolher um elemento dentre os k elementos existentes na RCL e adicionar à solução corrente.
- iv. Se o critério de parada for satisfeito, encerrar a fase construtiva. Caso contrário, voltar ao item ii.

Importante entender que a variável k descrita acima não é estabelecida no algoritmo. A dimensão k da lista varia não só em função do valor do parâmetro α escolhido, mas também a cada iteração da fase construtiva.

A estratégia do indicador de sensibilidade pode utilizar métodos matemáticos ou pode ser apenas uma informação adquirida intuitivamente ou a partir da experiência do(a) pesquisador(a).

Para um problema que visa a minimização da função objetivo, os elementos mais atrativos para compor a lista RCL são aqueles que apresentam menor valor de $h(x_i)$, função indicadora de sensibilidade, e devem satisfazer a relação (12), na qual os elementos estão ordenados em ordem crescente, ou a relação (13), em que estão ordenados de forma decrescente.

$$RCL = \{i \in X / h^{min} \leq h(x_i) \leq h^{min} + \alpha(h^{max} - h^{min})\} \quad (12)$$

$$RCL = \{i \in X / h^{max} - \alpha(h^{max} - h^{min}) \leq h(x_i) \leq h^{max}\} \quad (13)$$

Em que X é o conjunto de índices das variáveis que ainda podem ser escolhidas, α é um parâmetro com valores entre 0 e 1 e as funções h^{max} e h^{min} apresentam a seguinte forma:

$$h^{max} = \max \{ h(x_i) \} \quad (14)$$

$$h^{min} = \min \{ h(x_i) \} \quad (15)$$

O parâmetro α determina as características aleatória e gulosa do algoritmo, visto que quando usado igual a 1 representa o parâmetro totalmente aleatório e, por outro lado, quando usado igual a 0 assume característica gulosa (ROMERO; LAVORATO, 2012).

Observa-se que a dimensão da lista varia a cada iteração da fase construtiva, pois os elementos da lista provêm do indicador de sensibilidade, ou seja, dos valores de h^{max} e h^{min} (SOUZA, 2013).

3.2.3 Fase de melhoria local

Tem como finalidade encontrar uma solução ótima local na vizinhança da solução construída na fase anterior. A fase construtiva do GRASP não garante que a solução escolhida seja a ótima local e, portanto, aplica-se a busca local para melhorar a solução construída em cada iteração. Este processo é feito através de sucessivas substituições entre a solução corrente (na primeira iteração é a solução construída na fase anterior) e novas soluções geradas que forem de melhor qualidade. Finaliza-se quando nenhuma nova solução da vizinhança é melhor que a corrente. Esta etapa pode ser simples com a aplicação de uma heurística de busca através de vizinhança ou mais complexa com a aplicação de meta-heurísticas mais sofisticadas como *simulated annealing*, *tabu search*, VNS, algoritmo genético entre outros, mas também existem propostas intermediárias com a aplicação de estratégias de otimização que fazem parte de meta-heurísticas sofisticadas que é o caso da estratégia *Path Relinking* a qual é parte do *Tabu Search* (ROMERO; LAVORATO, 2012).

3.3 PARTICULARIDADES DA APLICAÇÃO DO GRASP AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO

Para resolver o problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando a estratégia de meta-heurística GRASP existem algumas particularidades que devem ser levadas em consideração. A primeira delas é a representação de uma proposta de solução. Na sequência apresenta-se uma abordagem para lidar com a restrição de radialidade, que por muito tempo foi um item crítico do problema que dificultava seu processamento. Temos, em seguida, a geração de propostas radiais. E ainda, o uso do fluxo de carga radial e o conceito de busca em vizinhança variável.

3.3.1 Representação da Solução

O primeiro passo na resolução de um problema, utilizando uma meta-heurística, é o projeto da representação de uma proposta de solução. Com esta representação deve ser possível não só a averiguação da factibilidade da proposta em questão como também constatar o valor da função objetivo da proposta, no caso da reconfiguração, a função objetivo são as perdas ativas totais do sistema em estudo.

Além disso, é preciso que a representação possibilite a geração de novas propostas de solução a partir da proposta de solução corrente, conforme a lógica da meta-heurística que está sendo utilizada, e a transferência de informações. Ademais, a proposta de solução pode estar representada de forma explícita, na qual a interpretação é óbvia, ou de forma implícita, em que é necessária uma decodificação para assim ser interpretada (POSSAGNOLO, 2015).

No caso do problema de reconfiguração, a representação da proposta de solução usada neste trabalho é feita por meio de um vetor denominado *sol*, o qual demonstra os ramos que estão em aberto no sistema. Assim, a proposta de solução para o sistema de 14 barras da Figura 3 seria como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Representação de uma proposta de solução para o sistema de 14 barras.

$$\text{sol} =$$

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

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.2 Restrição de Radialidade

Por motivos operacionais, um sistema de distribuição primária deve operar com topologia radial mesmo que sua configuração construída seja malhada. Para isso alguns ramos do sistema devem permanecer abertos, os chamados ramos de ligação. Em Ritter, Franco e Romero (2015) foi observado que quanto mais a topologia de operação for malhada, menores são as perdas. Entretanto, a topologia radial é escolhida com intuito de reduzir as correntes de curto-circuito, reduzir o custo com equipamentos elétricos e, também, facilitar a coordenação de proteção (RITTER, 2014).

3.3.3 Geração de Propostas Radiais

Uma das estratégias eficientes para geração de propostas radiais consiste em usar o algoritmo de Kruskal para gerar uma topologia radial. Nesse contexto, pode-se gerar um vetor de pesos, fornecendo pesos unitários a cada ramo ou pesos aleatórios variando em um intervalo e usando esses pesos gerados no algoritmo de Kruskal para gerar uma topologia radial. Outra estratégia consiste em fornecer pesos de forma aleatória, mas controlados. Assim, os ramos mais próximos da subestação podem receber pesos de valores maiores. Entretanto, as melhores propostas de geração de topologias radiais iniciais de qualidade são aquelas que usam informação das características do problema ou algoritmos heurísticos generalizados, como acontece na fase construtiva do algoritmo GRASP.

O processo de geração de soluções radiais, para a busca em vizinhança N1, pode ser explicitado analisando a Figura 5, visto que os ramos 14, 15 e 16 são ramos de ligação e os outros 13 ramos estão fechados formando uma árvore geradora. Caso o ramo 15 seja fechado será formado um laço ‘M’ no sistema contendo os ramos 5, 7, 10, 11 e 15; se apenas o ramo 14 for fechado formará um laço ‘N’ contendo os ramos 1, 2, 5, 6, 8 e 14; e ainda, se apenas o ramo 16 for fechado formará um laço ‘O’ contendo os ramos 1, 3, 4, 10, 12, 13 e 16. Em todos os três casos, se um dos ramos contidos no laço for aberto a topologia do sistema voltará a ser radial.

Figura 6 – Método para obter topologias radiais.

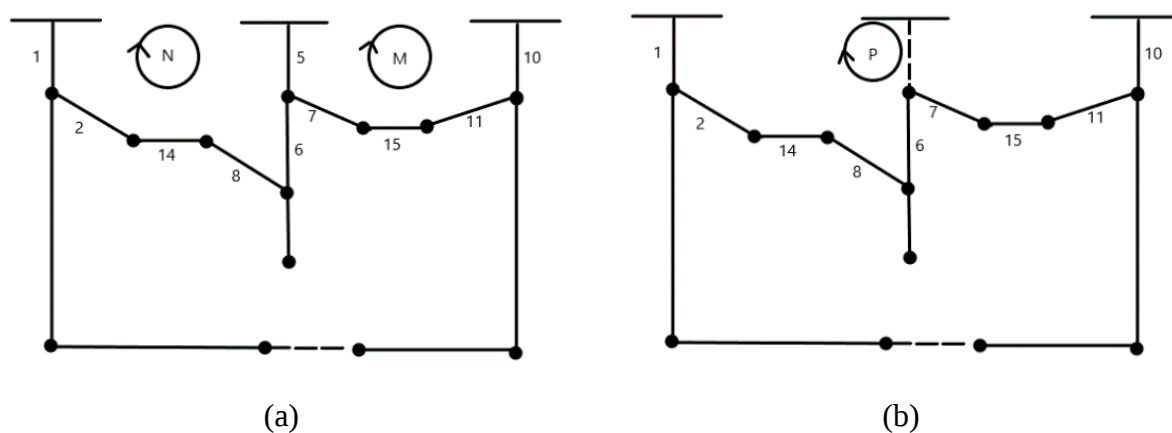
Inicialização: Feche k chaves do sistema de distribuição;

Repita os passos k vezes:

- (1) Identifique todos os laços independentes do sistema e os ramos a eles pertencentes;
- (2) Abra a chave desejada desde que esta pertença a um ramo identificado no passo anterior.

Fonte: POSSAGNOLO, (2015)

Ou seja, ainda analisando a Figura 5(a), se dois ramos forem fechados, como por exemplo, 14 e 15, formarão os laços ‘M’ e ‘N’, respectivamente, como apresentados na figura a seguir. Com a abertura de um ramo que esteja contido em qualquer um dos dois laços o sistema continuará malhado. Por exemplo, se o ramo 5 for aberto o sistema continuará com o laço formado pelos ramos 1, 2, 6, 7, 8, 10, 11, 14 e 15. Desta forma, após esta etapa, deve-se realizar uma atualização dos ramos contidos no laço remanescente. No caso, seria o laço ‘P’ formado pelos ramos descritos na figura 7 (b). Somente após este passo pode-se escolher arbitrariamente qualquer ramo contido no laço ‘P’ e assim o sistema retornará à condição radial.

Figura 7 – (a) Formação dos laços ‘M’ e ‘N’ e (b) formação do laço ‘P’.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.4 Uso do Fluxo de Carga Radial

Neste trabalho é utilizada a estratégia de cálculo de fluxo de carga para calcular as perdas ativas de cada proposta sugerida pela meta-heurística, mas também, para verificar se os limites de tensão nas barras e corrente nos ramos estão sendo respeitados. Isto é, o algoritmo de fluxo de carga foi empregado para a apuração da função objetivo e para verificação das restrições de operação de cada solução proposta. O algoritmo de fluxo de carga de varredura está apresentado no Anexo B deste trabalho.

3.3.5 Conceito de Busca em Vizinhaça Variável

A meta-heurística de busca em vizinhaça variável é um processo em que a vizinhaça da solução corrente é explorada de forma abrangente, visando melhorar a função objetivo do problema.

Segundo Possagnolo (2015), a meta-heurística VNS percorre as seguintes propriedades:

- 1) Um ótimo local com relação a uma estrutura de vizinhaça não é necessariamente o mesmo ótimo local para outra estrutura de vizinhaça;
- 2) Um ótimo global é um mínimo local em relação à todas as possíveis estruturas de vizinhaça;
- 3) Para muitos problemas, ótimos locais com relação a uma ou várias estruturas de vizinhaça são relativamente próximos uns aos outros.

A busca em vizinhaça variável apresenta quatro possíveis estruturas, sendo BVNS (do inglês, Basic Variable Neighborhood Search), RVNS (do inglês, Reduce Variable Neighborhood Search), GVNS (do inglês, General Variable Neighborhood Search) e VND (do inglês, Variable Neighborhood Descent).

Para o problema de RSDEE a estrutura VND se enquadra melhor, pois é baseada no item 1 citado anteriormente, um ótimo local para uma estrutura de vizinhança não é necessariamente um ótimo local para outra estrutura de vizinhança, isto é, o ótimo local $\mathbf{x}'$ na vizinhança $\mathcal{N}_1(\mathbf{x}')$ não necessariamente é igual ao ótimo local $\mathbf{x}''$ na vizinhança $\mathcal{N}_2(\mathbf{x}')$.

De forma geral o funcionamento do algoritmo VND é dado por: a partir de uma solução inicial $\mathbf{x}^0$ toda sua vizinhança, $\mathcal{N}_1(\mathbf{x}^0)$, é analisada. Se a melhor solução da vizinhança, $\mathbf{x}^1$, for de melhor qualidade ($v(\mathbf{x}^1) < v(\mathbf{x}^0)$), isto é, função objetivo de $\mathbf{x}^1$ é menor que a função objetivo de $\mathbf{x}^0$, então, a solução é atualizada e toda sua vizinhança, $\mathcal{N}_1(\mathbf{x}^1)$, é analisada à procura da melhor solução $\mathbf{x}^2$. Se $\mathbf{x}^2$ for de pior qualidade em relação a $\mathbf{x}^1$, o algoritmo analisa a próxima vizinhança, $\mathcal{N}_2(\mathbf{x}^1)$, e encontra a melhor solução $\mathbf{x}^3$. Ao atualizar $\mathbf{x}^3$ como solução corrente, se de melhor qualidade, a busca de sua vizinhança é reiniciada na primeira estrutura, $\mathcal{N}_1(\mathbf{x}^3)$, obtendo sua melhor solução $\mathbf{x}^4$. Este processo se encerra quando nenhuma melhoria é alcançada em nenhuma estrutura de vizinhança.

O algoritmo VND apresentado por Hansen e Mladenović (2001) possui a seguinte estrutura:

Figura 8 – Estrutura do algoritmo VND.

Início: Selecionar o conjunto de estruturas de vizinhança $\mathcal{N}_l$, $l = 1, \dots, l_{\max}$, que será utilizado na descida; encontrar uma solução inicial $\mathbf{x}$;

Repetir os passos seguintes até que nenhuma melhoria na solução seja obtida:

- (1). Faça $l \leftarrow 1$;
- (2). Repetir os passos a seguir até $l = l_{\max}$:
 - (a) **Exploração da vizinhança:** Encontrar o melhor vizinho $\mathbf{x}'$ de $\mathbf{x}$ ($\mathbf{x}' \in \mathcal{N}_l(\mathbf{x})$);
 - (b) **Mover ou não:** Se a solução $\mathbf{x}'$ for melhor que a incumbente $\mathbf{x}$, faça $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}'$ e continue a busca em $\mathcal{N}_l$ ($l \leftarrow l + 1$); caso contrário faça $l \leftarrow l + 1$.

Fonte: Hansen e Mladenovic (2001).

Para algoritmos VND com estratégia de estruturas de vizinhança maior ou igual a 2, o procedimento consiste em realizar uma troca (vizinhança N1), calcular o FC para sistemas radiais, e só então realizar as trocas de dois ramos (vizinhança N2), conforme exposto no item 3.3.3 deste trabalho, estimando o custo das perdas através do FC.

4. META-HEURÍSTICA GRASP APLICADA AO PROBLEMA RSDEE

O algoritmo GRASP proposto neste trabalho apresenta três principais fases como abordado no item anterior, sendo elas: fase de pré-processamento, fase construtiva e fase de melhoria local. A seguir serão apresentados, de forma mais descritiva, os passos selecionados para resolução.

4.1 FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta etapa do algoritmo é feita a leitura e processamento de dados, de forma a reduzir o espaço de busca do problema, conforme o passo a passo a seguir:

Passo 1: Ler os dados.

Passo 2: Fechar todos os ramos do sistema e executar um cálculo de fluxo de carga (FC) para redes fracamente malhadas.

Passo 3: Calcular o fluxo de potência aparente em cada ramo ij do sistema, usando a equação (16) abaixo, e ordená-los em ordem decrescente.

$$S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (16)$$

Passo 4: Definir os parâmetros $0 \leq \alpha \leq 1$ e N^{GRASP} (número de repetições das fases construtiva e de melhoria local). Neste trabalho foram utilizados $\alpha = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ e 1 , e $N^{\text{GRASP}} = 10$.

4.2 FASE CONSTRUTIVA

Estruturada conforme um algoritmo heurístico construtivo (AHC), nesta parte do algoritmo são criadas propostas de solução para o problema de reconfiguração. É uma etapa iterativa a qual se repete $nb - 1$ vezes, isto é, conforme o número de barras do sistema que está sendo testado e está baseada no algoritmo de Kruskal. Pode ser descrita da seguinte forma:

Passo 1: Dentre os ramos abertos e que se fechados não formarão laços na solução corrente, encontrar o ramo com menor valor de fluxo de potência aparente, $\underline{S}_{ij}$, e o ramo com maior valor de fluxo de potência aparente, $\bar{S}_{ij}$.

Passo 2: Adicionar à lista RCL os ramos que se fechados não formarão laços na solução corrente e que possuem valor de fluxo de potência aparente conforme a equação (12), a qual aplicada neste trabalho é apresentada como:

$$\underline{S}_{ij} + \alpha(\bar{S}_{ij} - \underline{S}_{ij}) \leq S_{ij} \leq \bar{S}_{ij} \quad (17)$$

É importante destacar que para esta adaptação o impacto do parâmetro α será o inverso em relação ao determinado no item 3.2.2 para as equações (12) e (13), dado que para $\alpha = 1$ o algoritmo terá característica totalmente gulosa (determinística) e, por outro lado, para $\alpha = 0$ assume característica aleatória. Visto que para o primeiro caso S_{ij} poderá unicamente ter o valor $\bar{S}_{ij}$, em contrapartida para $\alpha = 0$ S_{ij} poderá variar de entre os valores máximo e mínimo do fluxo de potência aparente, $\bar{S}_{ij}$ e $\underline{S}_{ij}$, respectivamente.

Passo 3: Incorporar à solução corrente um ramo da lista RCL escolhido aleatoriamente.

Passo 4: Se a proposta de solução estiver completa encerrar a fase construtiva e aplicar o FC na proposta de solução criada (para verificação da função objetivo e da conformidade perante os limites de corrente e tensão). Caso contrário, retornar ao passo 1.

É importante ressaltar que a verificação realizada no último passo desta fase funciona como uma verificação de factibilidade da proposta criada. Portanto, tendo que a função objetivo pode ser encontrada por meio da equação (18), para realizar a verificação das restrições de limite de corrente nos ramos e de tensão nas barras é preciso utilizar uma equação de função objetivo penalizada, demonstrada na equação (19).

$$v = \sum_{ij \in B} R_{ij} I_{ij}^2 \quad (18)$$

$$v' = v + \rho(\sum_{i \in N} \beta_i (\underline{V} - V_i) + \sum_{ij \in B} \gamma_{ij} (I_{ij} - \bar{I}_{ij})) \quad (19)$$

Para a equação (19), o ρ é utilizado como fator de penalização, o qual possui grande magnitude para que toda solução infactível seja descartada no processo de busca, no GRASP proposto foi usado $\rho = 10^8$. As variáveis β_i e γ_{ij} são variáveis binárias para violação de tensão e corrente, respectivamente, de forma que se a variável for igual a 0 indica que não houve violação, caso contrário a variável será igual a 1.

Apesar da restrição de corrente estar presente na equação (19) esta não é considerada neste trabalho, pois os sistemas testes estão operando na topologia inicial proposta, em que os limites devem estar satisfeitos, e espera-se que aplicando a reconfiguração as correntes nos ramos sejam ainda menores e, além disso, os dados de corrente máxima nos condutores dos sistemas testes não estão disponíveis (POSSAGNOLO, 2015).

Portanto, utilizando a equação (19) caso haja violação de tensão em uma ou mais barras a variável β_i terá valor $\beta_i = 1$ e desta forma será adicionado à v' um valor de grande magnitude que fará com que a proposta não seja estudada na análise de vizinhança realizada na etapa de busca local.

4.3 FASE DE MELHORIA LOCAL

Neste processo de melhoria são encontradas novas propostas, a partir da troca entre ramos de ligação e ramos conectados ao sistema, as quais também passam pela análise de vizinhança até que se encontre a melhor proposta possível. O algoritmo GRASP elaborado neste trabalho utiliza a técnica de análise de vizinhança N2. A seguir é apresentada a sequência de processamento desta etapa.

Passo 1: A partir da solução corrente ($\mathbf{x}$), analisar vizinhança $N_1(\mathbf{x})$. Se a melhor solução encontrada for melhor que a corrente, atualizar a incumbente e repetir o passo 1. Caso nenhuma melhoria seja obtida, ir para o passo 2.

Passo 2: Analisar vizinhança $N_2(\mathbf{x})$, ou seja, realizar a troca de um primeiro ramo, montar o conjunto de laços independentes e realizar a troca de um segundo ramo. Se a melhor solução encontrada for melhor que a corrente, atualizar a solução corrente e ir para o passo 1. Caso nenhuma melhoria seja obtida, encerrar esta fase.

5. TESTES E RESULTADOS

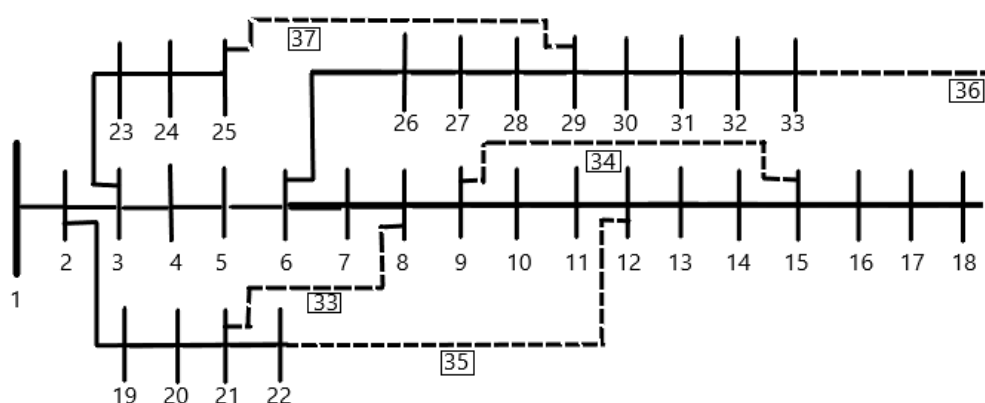
Neste item serão apresentados os resultados dos testes dos quatro sistemas analisados neste trabalho (33, 84, 136 e 415 barras). Os resultados obtidos serão comparados com as soluções ótimas conhecidas pela literatura. Adicionalmente, será feita uma comparação de desempenho e resultados encontrados para situações com $\alpha = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ e 1 , avaliando a atuação deste parâmetro na resolução do problema de reconfiguração. É importante observar que cada um dos testes foi composto de dez iterações do algoritmo GRASP.

O algoritmo proposto foi implementado em linguagem MATLAB® e os testes foram executados num notebook com processador Intel Core i3-4005U de 1.70GHz e 4 GB de RAM.

5.1 SISTEMA DE 33 BARRAS

Este sistema é apresentado em Baran e Wu (1989). Possui uma barra de subestação, 32 barras de carga e 37 circuitos. As demandas de potência ativa e reativa são 3715kW e 2300kVAr, respectivamente. A tensão na subestação é de 12,66kV e a tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é 0,9131 pu. O sistema de 33 barras é ilustrado abaixo e contém 5 (cinco) ramos de ligação, representados pelas linhas tracejadas. Os dados completos estão apresentados no Anexo A.1.

Figura 9 – Sistema de 33 barras.



Fonte: Baran e Wu, (1989).

Na tabela 1 são apresentados o estado inicial do sistema e os resultados para os seis valores de α compreendendo a solução proposta (circuitos abertos), a função objetivo (perdas) e os dois parâmetros de processamento quantidade de cálculo de fluxo de carga e tempo de resolução.

Tabela 1 – Resultados para o sistema de 33 barras.

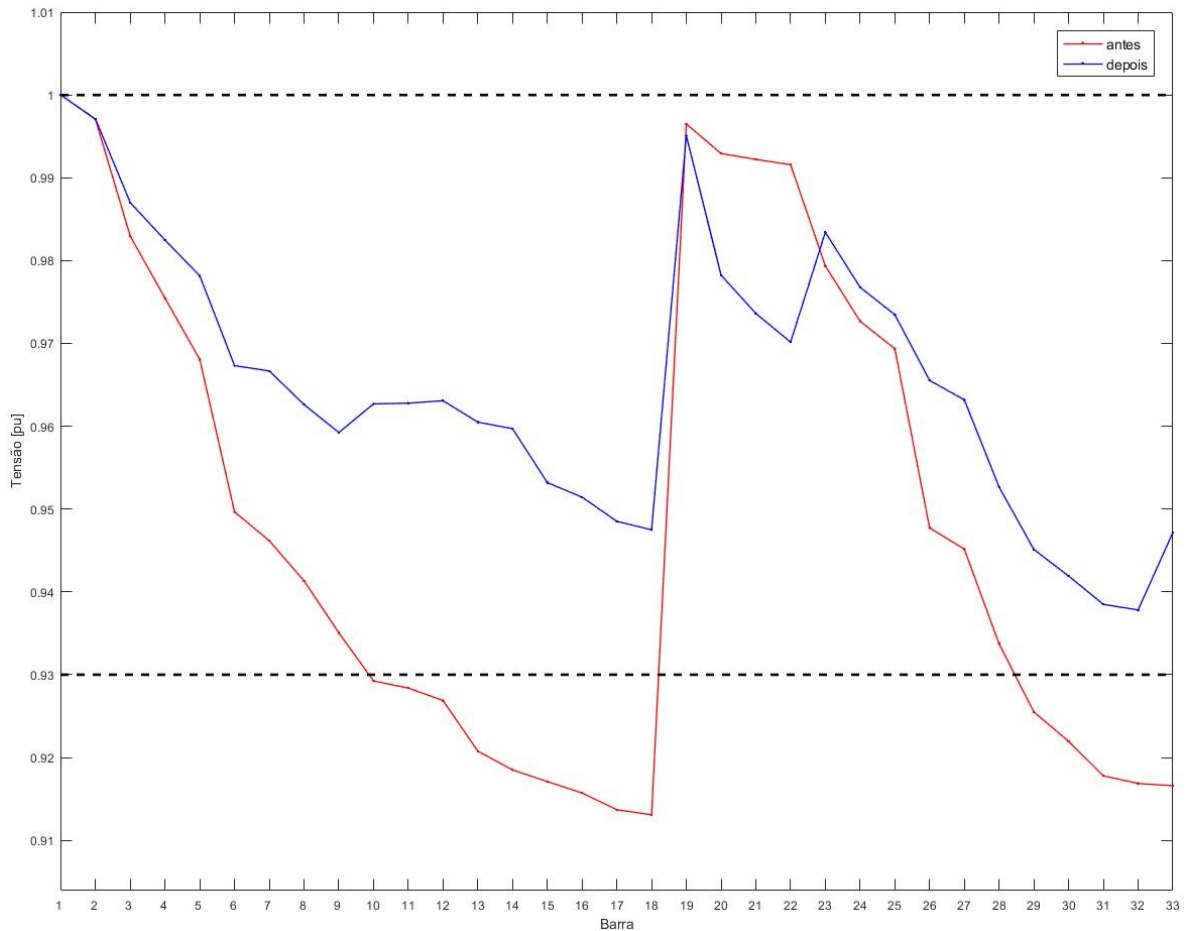
Método e parâmetro α	Circuitos abertos	Perdas [kW]	Nº de cálculos de FC	Tempo [s]
Inicial	33, 34, 35, 36, 37	202,6771	-	-
GRASP ($\alpha=0$)	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	569	1,70
GRASP ($\alpha=0,2$)	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	585	2,00
GRASP ($\alpha=0,4$)	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	425	1,64
GRASP ($\alpha=0,6$)	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	384	1,55
GRASP ($\alpha=0,8$)	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	370	1,45
GRASP ($\alpha=1$)	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	360	1,37

Fonte: Elaborado pela autora.

Para todos os valores de α o algoritmo atingiu o valor ótimo de perda igual a 139,5513kW representando melhoria de 31,146%.

Na solução final a tensão mínima do sistema obtida foi de 0,9378 pu e o perfil de tensão é demonstrado na Figura 10, já em comparação com o perfil inicial.

Figura 10 – Perfis de tensão no sistema de 33 barras antes e depois da reconfiguração.

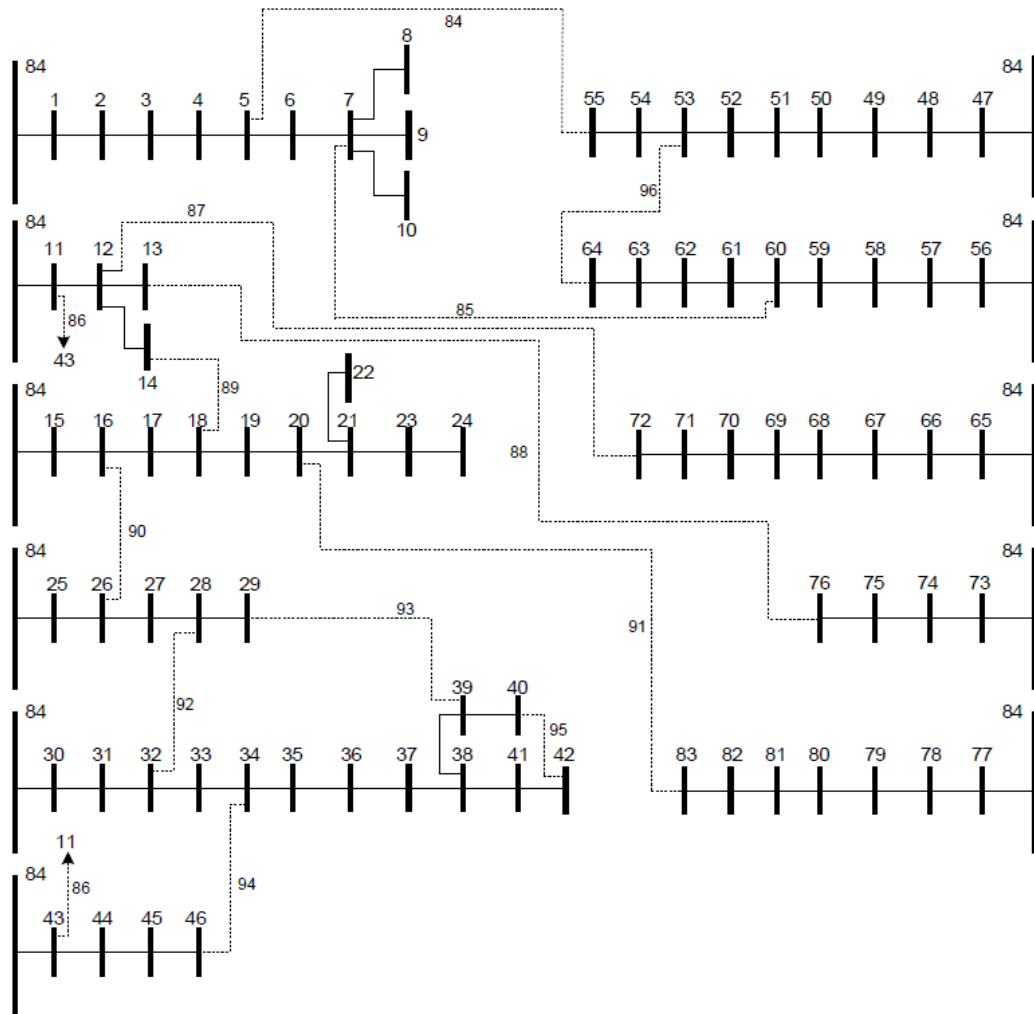


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 SISTEMA DE 84 BARRAS

Este sistema é apresentado em Chiou; Chang; Su (2005). Possui 1 barra de subestação, 83 barras de carga e 96 circuitos. As demandas de potência ativa e reativa são 28351kW e 20700kVAr, respectivamente. A tensão na subestação é de 11,40kV e a tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é 0,9285 pu. O sistema é ilustrado abaixo e apresenta 13 (treze) ramos de ligação representados pelas linhas tracejadas. Os dados completos estão apresentados no Anexo A.2.

Figura 11 – Sistema de 84 barras.



Fonte: Chiou, Chang e Su (2005).

Na tabela 2 são apresentados o estado inicial do sistema e os resultados para os seis valores de α compreendendo a solução proposta (circuitos abertos), a função objetivo (perdas) e os dois parâmetros de processamento quantidade de cálculo de fluxo de carga e tempo de resolução.

Tabela 2 – Resultados para o sistema de 84 barras.

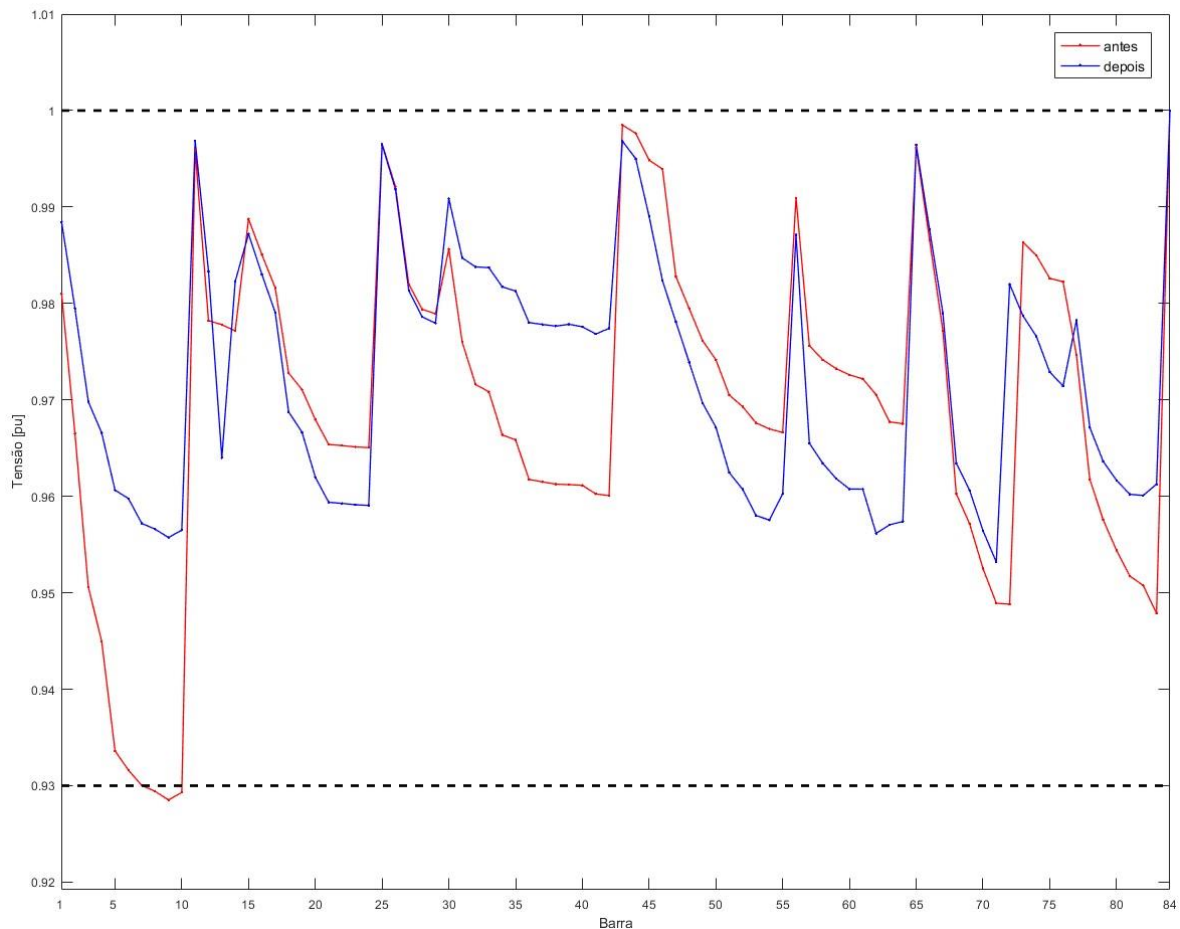
Método e parâmetro α	Circuitos abertos	Perdas [kW]	Nº de cálculos de FC	Tempo [s]
Inicial	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96	531,9975	-	-
GRASP ($\alpha=0$)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1407	6,91
GRASP ($\alpha=0,2$)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1367	6,46
GRASP ($\alpha=0,4$)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1369	6,42
GRASP ($\alpha=0,6$)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1363	6,28
GRASP ($\alpha=0,8$)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1340	6,18
GRASP ($\alpha=1$)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1340	5,58

Fonte: Elaborado pela autora.

Para todos os valores de α o algoritmo atingiu o valor ótimo de perda igual a 469,8799kW representando melhoria de 11,6763%.

Na solução final a tensão mínima do sistema obtida foi de 0,9532 pu e o perfil de tensão é demonstrado na Figura 12, já em comparação com o perfil inicial.

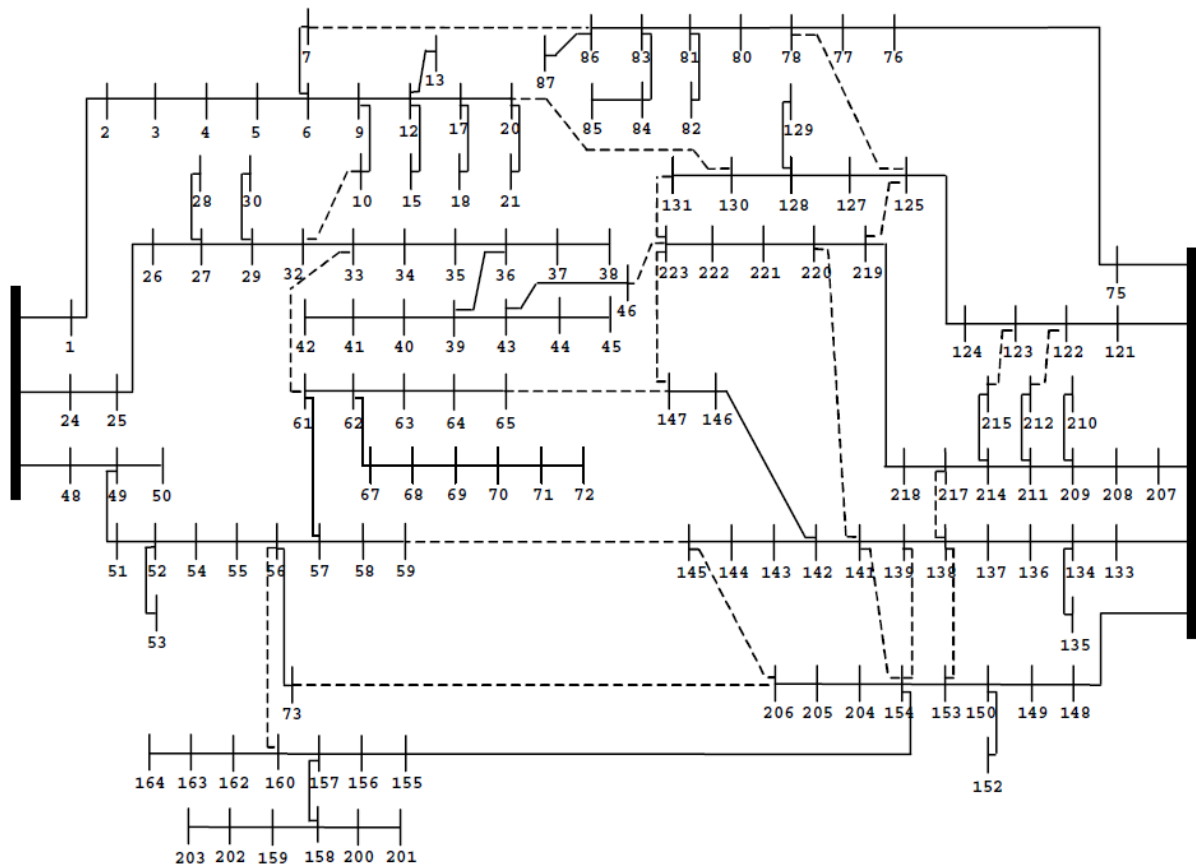
Figura 12 – Perfis de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da reconfiguração.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 SISTEMA DE 136 BARRAS

Este sistema é apresentado em Mantovani; Casari; Romero (2000). Possui duas barras de subestação, 135 barras de carga e 156 circuitos. As demandas de potência ativa e reativa são 18313,8090kW e 7932,5335kVAr, respectivamente. A tensão na subestação é de 13,80kV e a tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é 0,9307 pu. O sistema é ilustrado abaixo e apresenta 21 (vinte e um) ramos de ligação representados pelas linhas tracejadas. Os dados completos estão apresentados no Anexo A.3.

Figura 13 – Sistema de 136 barras.

Fonte: Mantovani, Casari e Romero, 2000.

Na tabela 3 são apresentados o estado inicial do sistema e os resultados para os seis valores de α compreendendo a solução proposta (circuitos abertos), a função objetivo (perdas) e os dois parâmetros de processamento quantidade de cálculo de fluxo de carga e tempo de resolução.

Tabela 3 – Resultados para o sistema de 136 barras.

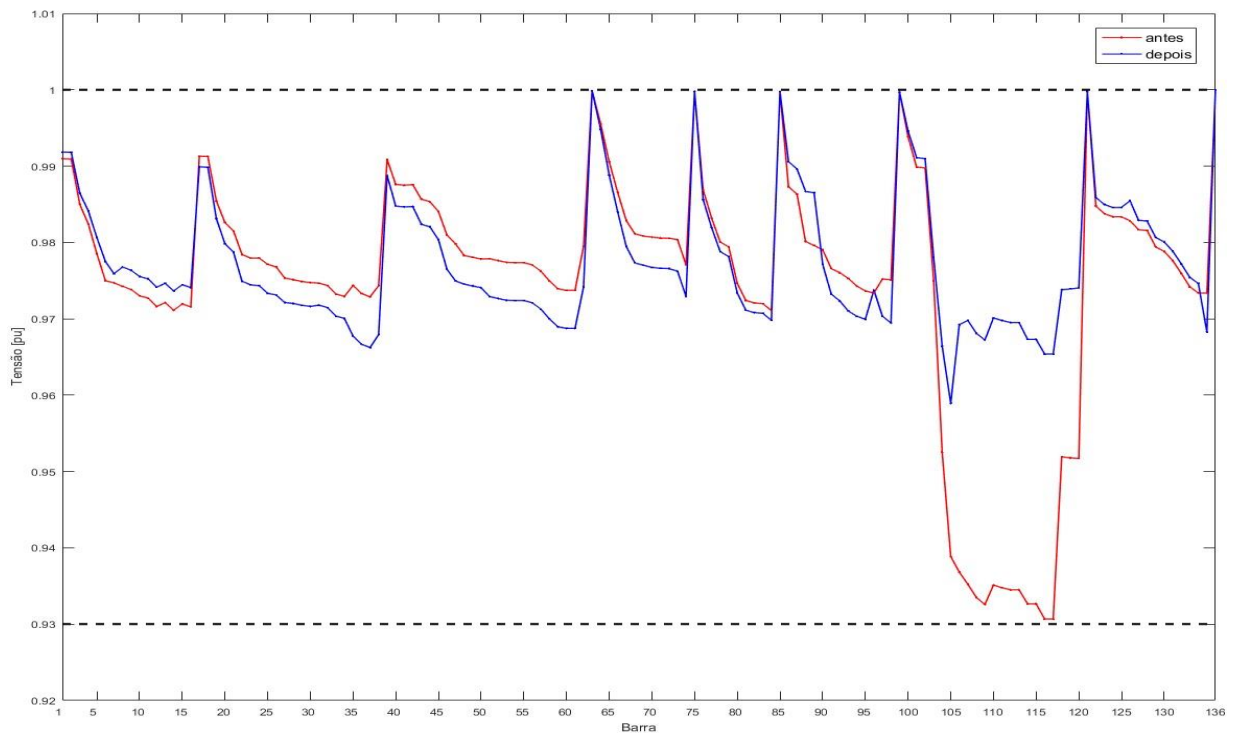
Método e parâmetro α	Circuitos abertos	Perdas [kW]	Nº de cálculos de FC	Tempo [s]
Inicial	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156	320,3644	-	-
GRASP ($\alpha=0$)	7, 38, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151	280,3776	3319	40,51
GRASP ($\alpha=0,2$)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,1930	3301	40,12
GRASP ($\alpha=0,4$)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,1930	3194	37,85
GRASP ($\alpha=0,6$)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,1930	2916	33,32
GRASP ($\alpha=0,8$)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,1930	2899	32,80
GRASP ($\alpha=1$)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,1930	2890	32,66

Fonte: Elaborado pela autora.

Para os valores de $\alpha = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ e 1 o algoritmo atingiu o valor ótimo de perda igual a 280,1930kW representando melhoria de 12,5393%. Mas para $\alpha = 0$ a solução encontrada possui perdas de 280,3776kW o que significa uma melhoria de 12,4817%.

Na solução final a tensão mínima do sistema obtida foi de 0,9589 pu e o perfil de tensão é demonstrado na Figura 14, já em comparação com o perfil inicial.

Figura 14 – Perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração.

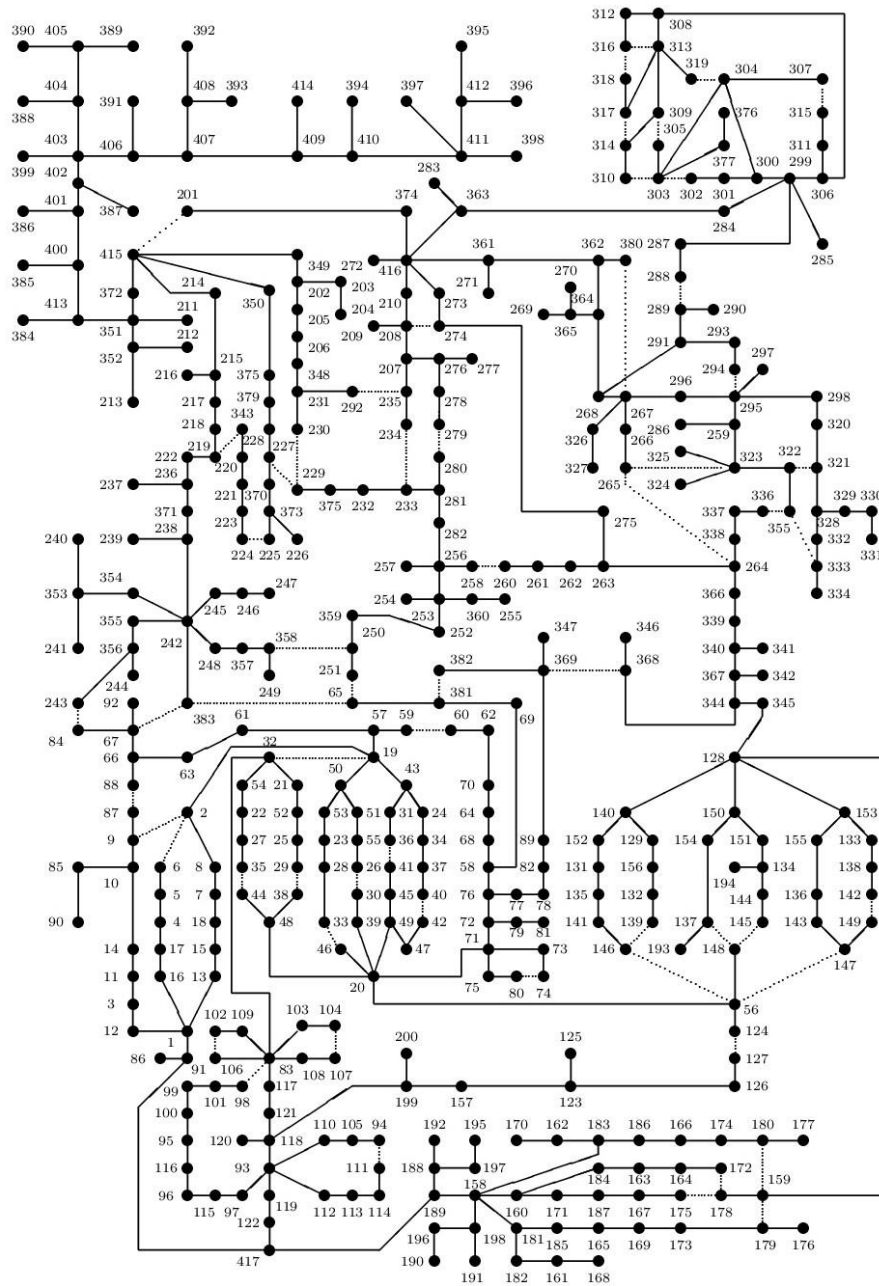


Fonte: Elaborado pela autora.

5.4 SISTEMA DE 415 BARRAS

Este sistema é apresentado em Bernal-Agustin (1998). Possui três barras de subestação, 414 barras de carga e 473 circuitos. As demandas de potência ativa e reativa são 27372,40kW e 13237,00kVAr, respectivamente. A tensão na subestação é de 10,00kV e a tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é 0,9301 pu. O sistema é ilustrado abaixo e apresenta 59 (cinquenta e nove) ramos de ligação representados pelas linhas tracejadas. Os dados completos estão apresentados no Anexo A.4.

Figura 15 – Sistema de 415 barras.



Fonte: LaPSEE, 2019.

Na tabela 4 são apresentados o estado inicial do sistema e os resultados para os seis valores de α compreendendo a solução proposta (circuitos abertos), a função objetivo (perdas) e os dois parâmetros de processamento quantidade de cálculo de fluxo de carga e tempo de resolução.

Tabela 4 – Resultados para o sistema de 415 barras.

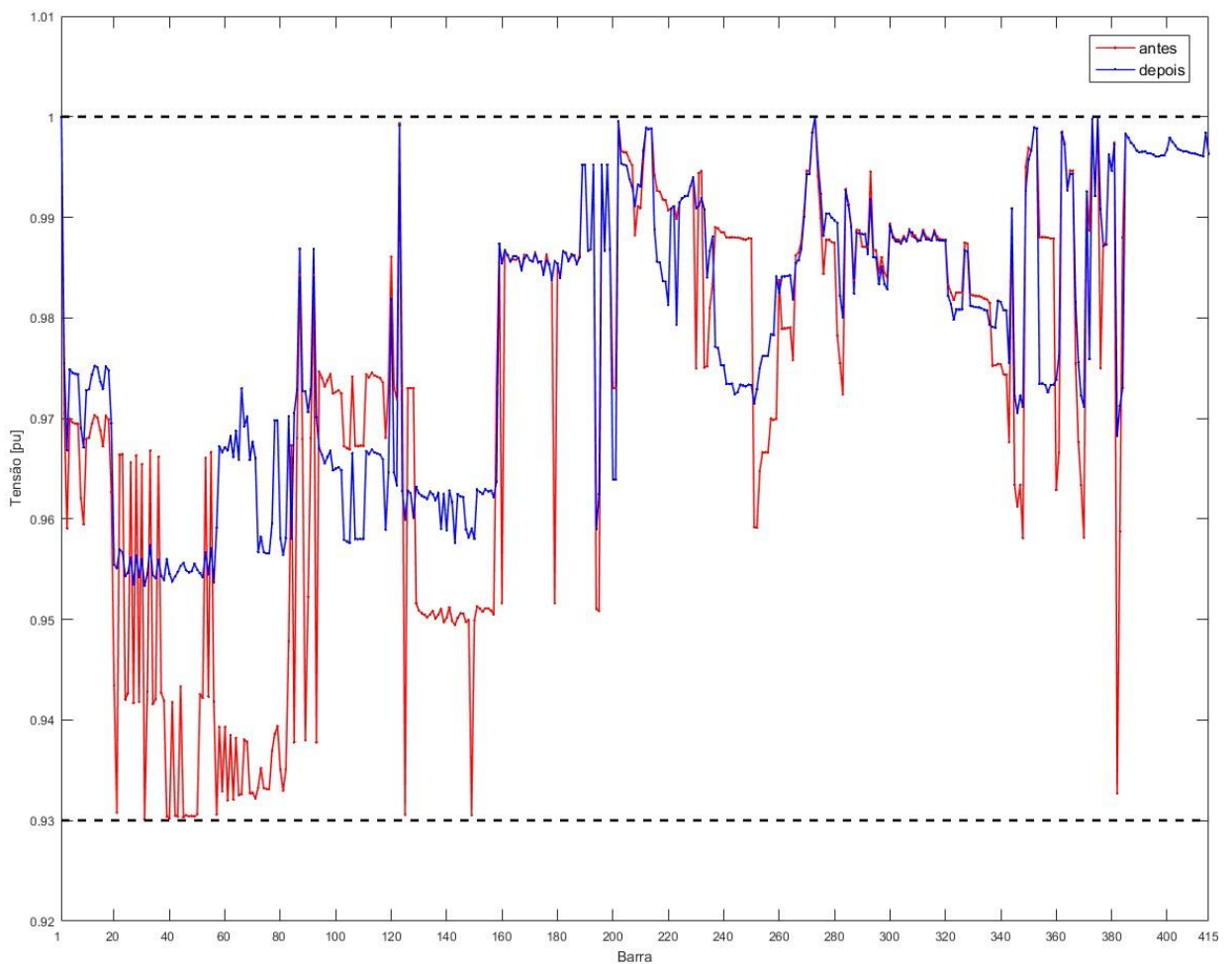
Método e parâmetro α	Circuitos abertos	Perdas [kW]	Nº de cálculos de FC	Tempo [s]
Inicial	1, 5, 15, 16, 26, 31, 53, 54, 55, 75, 82, 94, 96, 97, 106, 107, 119, 136, 138, 154, 155, 156, 168, 169, 177, 179, 194, 195, 201, 207, 211, 214, 219, 241, 256, 258, 282, 297, 302, 314, 321, 354, 359, 362, 364, 385, 388, 395, 396, 404, 407, 423, 424, 426, 431, 436, 445, 446, 449	708,9417	-	-
GRASP ($\alpha=0$)	1, 2, 13, 15, 16, 26, 31, 37, 40, 50, 59, 73, 82, 87, 94, 96, 97, 107, 119, 136, 142, 150, 155, 156, 158, 163, 168, 169, 178, 179, 191, 195, 199, 213, 214, 250, 256, 270, 282, 317, 322, 325, 358, 362, 363, 385, 389, 392, 395, 403, 404, 416, 426, 427, 433, 436, 446, 449, 472	585,1309	29768	2950,06
GRASP ($\alpha=0,2$)	1, 4, 13, 15, 16, 30, 31, 40, 49, 50, 59, 73, 82, 94, 96, 97, 111, 115, 136, 142, 150, 155, 156, 158, 163, 168, 169, 173, 179, 195, 209, 214, 230, 254, 256, 267, 270, 282, 314, 317, 325, 354, 362, 385, 389, 392, 395, 396, 400, 407, 423, 424, 426, 436, 437, 443, 446, 449, 466	585,9231	18170	1624,27
GRASP ($\alpha=0,4$)	1, 2, 13, 15, 16, 30, 31, 40, 41, 50, 59, 73, 75, 82, 94, 96, 97, 111, 115, 136, 142, 150, 155, 156, 158, 163, 168, 169, 178, 179, 191, 195, 209, 214, 230, 254, 256, 270, 294, 314, 317, 325, 358, 362, 385, 389, 392, 395, 403, 404, 423, 424, 426, 436, 437, 439, 446, 449, 466	582,9837	17843	1527,07
GRASP ($\alpha=0,6$)	2, 4, 5, 13, 15, 16, 21, 26, 31, 33, 40, 50, 59, 73, 82, 94, 96, 97, 107, 119, 136, 142, 150, 155, 156, 158, 168, 169, 179, 191, 194, 195, 209, 214, 225, 230, 254, 256, 267, 270, 282, 314, 321, 362, 364, 385, 392, 395, 402, 403, 404, 423, 424, 433, 436, 443, 446, 449, 466	586,9225	16875	1453,38
GRASP ($\alpha=0,8$)	2, 4, 5, 13, 15, 16, 21, 26, 31, 33, 40, 50, 59, 73, 82, 94, 96, 97, 111, 115, 136, 142, 150, 154, 155, 156, 163, 168, 169, 179, 191, 194, 195, 209, 214, 230, 256, 258, 267, 270, 282, 314, 321, 354, 362, 385, 392, 395, 400, 403, 423, 424, 426, 436, 437, 443, 446, 449, 466	586,1408	13282	1140,59
GRASP ($\alpha=1$)	2, 4, 5, 13, 15, 16, 21, 26, 31, 33, 40, 50, 59, 73, 82, 94, 96, 97, 111, 115, 136, 142, 150, 154, 155, 156, 163, 168, 169, 179, 194, 195, 209, 214, 230, 254, 256, 267, 270, 282, 314, 321, 354, 362, 385, 392, 395, 396, 403, 404, 423, 424, 426, 436, 437, 443, 446, 449, 466	586,1567	8680	730,83

Fonte: Elaborado pela autora.

Para este sistema o valor ótimo de perda é igual a 581,5494kW, porém o mínimo atingido pelo algoritmo proposto foi de 582,9837kW ($\alpha = 0,4$) representando melhoria de 17,3516% em relação às perdas da configuração inicial.

Na solução final para $\alpha = 0,4$ a tensão mínima do sistema obtida foi de 0,9533 pu e o perfil de tensão é demonstrado na Figura 16, já em comparação com o perfil inicial.

Figura 16 – Perfis de tensão no sistema de 415 barras antes e depois da reconfiguração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Notando as resoluções identificadas, entende-se que para sistemas de grande porte seria aconselhável, na fase de melhoria local, explorar as demais estruturas de vizinhança afim de aperfeiçoar a solução até obter a melhor solução conhecida na literatura.

Para avaliar o impacto do parâmetro de aleatoriedade (α) no algoritmo proposto neste trabalho, além das resoluções descritas acima, será comparada a quantidade de fluxo de carga rodados até encontrar a melhor solução. Este critério é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Avaliação de impacto do parâmetro de aleatoriedade.

Parâmetro de aleatoriedade	Sistema de 33 barras	Sistema de 84 barras	Sistema de 136 barras	Sistema de 415 barras
$\alpha=0$	524	1273	3033	28800
$\alpha=0,2$	551	1238	3018	18069
$\alpha=0,4$	380	1240	2909	16902
$\alpha=0,6$	339	1231	2633	16062
$\alpha=0,8$	336	1211	2616	12457
$\alpha=1$	326	1211	2607	8506

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o caso do problema de RSDEE utilizando a meta-heurística GRASP em conjunto com a estratégia VND na fase de melhoria local, observando as soluções propostas em relação ao parâmetro de aleatoriedade (α) é notório que, no geral, quanto mais o α for próximo de 1, mais gulosa a fase construtiva é e mais rapidamente a solução é encontrada e, paralelamente, menor seu esforço computacional analisando a quantidade de cálculos de fluxo de carga. Porém isto não foi constatado para o sistema de grande porte testado, 415 barras, visto que a melhor solução encontrada foi para $\alpha = 0,4$. Este evento demonstra que para sistemas de grande porte a característica aleatória se torna significativa trazendo melhores respostas.

Esta correlação entre o parâmetro α e as respostas obtidas foi citada por Resende (2007) para o problema MAXSAT, em que é dito, “[...] a distância entre a solução encontrada pelo algoritmo e a melhor solução conhecida aumenta à medida que a fase construtiva passa de mais gulosa para mais aleatória”.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho propõe-se um algoritmo utilizando a meta-heurística GRASP especializada para resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, usando diferentes estratégias para redução de espaço de busca, para construção de soluções radiais e para melhoria local, feita por meio da aplicação da meta-heurística VND. O algoritmo proposto possui objetivo de estabelecer uma topologia radial que minimize o valor de perdas do sistema, despendendo de pouco esforço computacional e com menor tempo de resposta possível.

A partir dos valores obtidos nos sistemas elétricos testados pode-se constatar que o algoritmo apresenta um bom desempenho, encontrando os melhores valores disponíveis na literatura especializada, com exceção do sistema de grande porte de 415 barras o qual apresentou uma diferença de 1,4337kW da melhor solução conhecida na literatura.

Adicionalmente, em relação ao impacto do parâmetro alfa na resolução do problema foi analisado que no geral, quanto mais a fase construtiva tiver característica gulosa, melhores os resultados obtidos. Porém para o sistema de grande porte testado, 415 barras, percebe-se que característica aleatória se torna significativa.

A proposta deste trabalho pode ser aperfeiçoada e as sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Explorar as demais estruturas de vizinhança do algoritmo VND, visando melhoria em sistemas de grande porte;
- Considerar geração distribuída no sistema de distribuição.

7. REFERÊNCIAS

BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p.1401-1407, 1989.

BERNAL-AGUSTIN, J. L. **Application of genetic algorithms to the optimal design of power distribution systems**. 1998. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – University of Zaragoza, Zaragoza, 1998.

CARREÑO, E. M., ROMERO, R. PADILHA-FELTRIN, A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. **IEEE Transactions on Power Systems**. New York, v. 23, n. 4, p. 1542-1551, 2008.

CHIOU, J.; CHANG, C.; SU, C. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p.668-674, 2005.

CIVANLAR, S., GRAINGER, J. J., YIN, H., LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 3, No. 3, July, p. 1217-1223, 1988.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; BRETAS, N. G. Main Chain representation for evolutionary algorithms Applied to distribution system reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol. 20, No. 1, p. 425-436, 2005.

FARIVAR, M.; LOW, S. H. Branch flow model: relaxations and convexification – part I. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28 n. 3, p.2554-2564, 2013.

FEO, T. A., RESENDE, M. G. C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. **Journal of Global Optimization**, Boston, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995.

FRANCO, J., LAVORATO, M., RIDER, M. J., ROMERO, R. An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING*, 15, 2012, San Diego. Proceeding... San Diego: PESGM, 2012. p.1-8.

GOMES, F. V., CARNEIRO, S., PEREIRA, J. L. R., VINAGRE, M. P., GARCIA, P. A. N., ARAUJO, L. R. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol. 20, No. 3, p. 1373-1378. 2005.

GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v. 2, n. 3, p. 1484-1491, 1992.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search: principles and applications. *In: EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 130, 2001, p. 449-467.

JABR, R. A. Radial distribution load flow using conic programming. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 3, p.1458-1459, 2006.

JABR, R. A.; SINGH, R.; PAL, B. C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27 n. 3, p.1106-1115, 2012.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. Constituição dos sistemas elétricos de potência. *In: KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C. B., ROBBA, E. J. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2000. p. 1-20.

LAPSEE – Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica: banco de dados. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>. Acesso em: 05 fevereiro 2019.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 1, p.172-180, 2012.

POSSAGNOLO, L. H. F. M. **Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2015.

MANTOVANI, F. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **SBA Controle & Automação**. Vol. 11, n. 03, p. 150-159. 2000.

MENDOZA, J.; LÓPEZ, R.; MORALES, D.; LÓPEZ, E.; DESSANTE, P.; MORANGA, R. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 21, n. 2, p. 948-954, 2006.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal loss operating spanning tree configuration in na urban power distribution system. In: **POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE**, 5., 1975, Cambridge. *Proceedings...* Zurich: PSCC, 1975, p. 1-18.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sistemas Isolados**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>. Acesso em: 17 de março de 2021.

PESSOA, A. L. S. **A localização de faltas em um sistema de distribuição radial baseada na aplicação de árvores de decisão e redes neurais artificiais**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

RESENDE, M. G. C. An introduction to GRASP. (Material fornecido no XXXIX Simpósio de Pesquisa Operacional, 39, 2007, Fortaleza), p. 3-38, 2007.

RITTER, D. **Análise crítica da operação radial dos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2014. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2014.

RITTER, D., FRANCO, J. F., ROMERO, R. Analysis of the radial operation of distribution systems considering operation with minimal losses. *In: ELECTRICAL POWER AND ENERGY SYSTEMS*, 67, 2015. p. 453-461.

ROMERO, R., LAVORATO, M. Meta-heurísticas em sistemas elétricos de potência: introdução ao estudo e aplicações. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE*, 4., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBSE, 2012. p. 1-52. Minicurso.

SALAZAR, H.; GALLEGU, R.; ROMERO, R. Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 21, n. 3, p. 1735-1742, 2006.

SCHIMIDT, H. P.; IDA, N., KAGAN, N.; GUARALDO, J. C. Fast reconfiguration of distribution systems considering loss minimization. **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol. 20, No. 3, p. 1311-1319, 2005.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission network. **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol. 3, No. 2, p. 1311-1319, 1988.

SOUZA, F. A. **Deteção de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica usando dispositivos programáveis**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2008.

SOUZA, S. S. F. **Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2013.

ANEXOS

A DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS

A.1 Sistema de 33 barras

Os dados do sistema de 33 barras são demonstrados na Tabela 6. Além destes, temos:

(I) Barra referente à subestação: 1; (II) Tensão na subestação (base de tensão): 12,66 kV.

Tabela 6 – Dados do sistema de 33 barras.

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Nº do Ramo	Barra Inicial	Barra Final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Nº da Barra	Demanda Ativa [kW]	Demanda Reativa [kVA]
1	1	2	0,0922	0,0470	1	0,00	0,00
2	2	3	0,4930	0,2511	2	100,00	60,00
3	3	4	0,3660	0,1864	3	90,00	40,00
4	4	5	0,3811	0,1941	4	120,00	80,00
5	5	6	0,8190	0,7070	5	60,00	30,00
6	6	7	0,1872	0,6188	6	60,00	20,00
7	7	8	0,7114	0,2351	7	200,00	100,00
8	8	9	1,0300	0,7400	8	200,00	100,00
9	9	10	1,0440	0,7400	9	60,00	20,00
10	10	11	0,1966	0,0650	10	60,00	20,00
11	11	12	0,3744	0,1238	11	45,00	30,00
12	12	13	1,4680	1,1550	12	60,00	35,00
13	13	14	0,5416	0,7129	13	60,00	35,00
14	14	15	0,5910	0,5260	14	120,00	80,00
15	15	16	0,7463	0,5450	15	60,00	10,00
16	16	17	1,2890	1,7210	16	60,00	20,00
17	17	18	0,7320	0,5740	17	60,00	20,00
18	2	19	1,1640	0,1565	18	90,00	40,00
19	19	20	1,5042	1,3554	19	90,00	40,00
20	20	21	0,4095	0,4781	20	90,00	40,00
21	21	22	0,7089	0,9373	21	90,00	40,00
22	3	23	0,4512	0,3083	22	90,00	40,00
23	23	24	0,8980	0,7091	23	90,00	50,00
24	24	25	0,8960	0,7011	24	420,00	200,00
25	6	26	0,2030	0,1034	25	420,00	200,00
26	26	27	0,2842	0,1447	26	60,00	25,00
27	27	28	1,0590	0,9337	27	60,00	25,00
28	28	29	0,8042	0,7006	28	60,00	20,00
29	29	30	0,5075	0,2585	29	120,00	70,00
30	30	31	0,9744	0,9630	30	200,00	600,00
31	31	32	0,3105	0,3619	31	150,00	70,00
32	32	33	0,3410	0,5302	32	210,00	100,00
33	8	21	2,0000	2,0000	33	60,00	
34	9	15	2,0000	2,0000			
35	12	22	2,0000	2,0000			
36	18	33	0,5000	0,5000			
37	25	29	0,5000	0,5000			

Fonte: Baran e Wu, (1989)

A.2 Sistema de 84 barras

Os dados do sistema de 84 barras aparecem na Tabela 7, além destes, temos: (I) Barra referente à subestação: 84; (II) Tensão na subestação (base de tensão): 11,40 kV;

Tabela 7 – Dados do sistema de 84 barras (continua).

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	84	0,1944	0,6624	1	0,00	0,00
2	1	2	0,2096	0,4304	2	100,00	50,00
3	2	3	0,2358	0,4842	3	300,00	200,00
4	3	4	0,0917	0,1883	4	350,00	250,00
5	4	5	0,2096	0,4304	5	220,00	100,00
6	5	6	0,0393	0,0807	6	1100,00	800,00
7	6	7	0,0405	0,1380	7	400,00	320,00
8	7	8	0,1048	0,2152	8	300,00	200,00
9	7	9	0,2358	0,4842	9	300,00	230,00
10	7	10	0,1048	0,2152	10	300,00	260,00
11	11	84	0,0786	0,1614	11	0,00	0,00
12	11	12	0,3406	0,6944	12	1200,00	800,00
13	12	13	0,0262	0,0538	13	800,00	600,00
14	12	14	0,0786	0,1614	14	700,00	500,00
15	15	84	0,1134	0,3864	15	0,00	0,00
16	15	16	0,0524	0,1076	16	300,00	150,00
17	16	17	0,0524	0,1076	17	500,00	350,00
18	17	18	0,1572	0,3228	18	700,00	400,00
19	18	19	0,0393	0,0807	19	1200,00	1000,00
20	19	20	0,1703	0,3497	20	300,00	300,00
21	20	21	0,2358	0,4842	21	400,00	350,00
22	21	22	0,1572	0,3228	22	50,00	20,00
23	21	23	0,1965	0,4035	23	50,00	20,00
24	23	24	0,1310	0,2690	24	50,00	10,00
25	25	84	0,0567	0,1932	25	50,00	30,00
26	25	26	0,1048	0,2152	26	100,00	60,00
27	26	27	0,2489	0,5111	27	100,00	70,00
28	27	28	0,0486	0,1656	28	1800,00	1300,00
29	28	29	0,1310	0,2690	29	200,00	120,00
30	30	84	0,1965	0,3960	30	0,00	0,00
31	30	31	0,1310	0,2690	31	1800,00	1600,00
32	31	32	0,1310	0,2690	32	200,00	150,00
33	32	33	0,0262	0,0538	33	200,00	100,00
34	33	34	0,1703	0,3497	34	800,00	600,00
35	34	35	0,0524	0,1076	35	100,00	60,00
36	35	36	0,4978	1,0222	36	100,00	60,00
37	36	37	0,0393	0,0807	37	20,00	10,00
38	37	38	0,0393	0,0807	38	20,00	10,00
39	38	39	0,0786	0,1614	39	20,00	10,00
40	39	40	0,2096	0,4304	40	20,00	10,00
41	38	41	0,1965	0,4035	41	200,00	160,00
42	41	42	0,2096	0,4304	42	50,00	30,00
43	43	84	0,0486	0,1656	43	0,00	0,00
44	43	44	0,0393	0,0807	44	30,00	20,00
45	44	45	0,1310	0,2690	45	800,00	700,00
46	45	46	0,2358	0,4842	46	200,00	150,00
47	47	84	0,2430	0,8280	47	0,00	0,00
48	47	48	0,0655	0,1345	48	0,00	0,00
49	48	49	0,0655	0,1345	49	0,00	0,00
50	49	50	0,0393	0,0807	50	200,00	160,00

Tabela 7 – Dados do sistema de 84 barras (continuação).

51	50	51	0,0786	0,1614	51	800,00	600,00
52	51	52	0,0393	0,0807	52	500,00	300,00
53	52	53	0,0786	0,1614	53	500,00	350,00
54	53	54	0,0524	0,1076	54	500,00	300,00
55	54	55	0,1310	0,2690	55	200,00	80,00
56	56	84	0,2268	0,7728	56	0,00	0,00
57	56	57	0,5371	1,1029	57	30,00	20,00
58	57	58	0,0524	0,1076	58	600,00	420,00
59	58	59	0,0405	0,1380	59	0,00	0,00
60	59	60	0,0393	0,0807	60	20,00	10,00
61	60	61	0,0262	0,0538	61	20,00	10,00
62	61	62	0,1048	0,2152	62	200,00	130,00
63	62	63	0,2358	0,4842	63	300,00	240,00
64	63	64	0,0243	0,0828	64	300,00	200,00
65	65	84	0,0486	0,1656	65	0,00	0,00
66	65	66	0,1703	0,3497	66	50,00	30,00
67	66	67	0,1215	0,4140	67	0,00	0,00
68	67	68	0,2187	0,7452	68	400,00	360,00
69	68	69	0,0486	0,1656	69	0,00	0,00
70	69	70	0,0729	0,2484	70	0,00	0,00
71	70	71	0,0567	0,1932	71	2000,00	1500,00
72	71	72	0,0262	0,0528	72	200,00	150,00
73	73	84	0,3240	1,1040	73	0,00	0,00
74	73	74	0,0324	0,1104	74	0,00	0,00
75	74	75	0,0567	0,1932	75	1200,00	950,00
76	75	76	0,0486	0,1656	76	300,00	180,00
77	77	84	0,2511	0,8556	77	0,00	0,00
78	77	78	0,1296	0,4416	78	400,00	360,00
79	78	79	0,0486	0,1656	79	2000,00	1300,00
80	79	80	0,1310	0,2640	80	200,00	140,00
81	80	81	0,1310	0,2640	81	500,00	360,00
82	81	82	0,0917	0,1883	82	100,00	30,00
83	82	83	0,3144	0,6456	83	400,00	360,00
84	5	55	0,1310	0,2690	84	0,00	0,00
85	7	60	0,1310	0,2690			
86	11	43	0,1310	0,2690			
87	12	72	0,3406	0,6994			
88	13	76	0,4585	0,9415			
89	14	18	0,5371	1,0824			
90	16	26	0,0917	0,1883			
91	20	83	0,0786	0,1614			
92	28	32	0,0524	0,1076			
93	29	39	0,0786	0,1614			
94	34	46	0,0262	0,0538			
95	40	42	0,1965	0,4035			
96	53	64	0,0393	0,0807			

Fonte: Chiou, Chang e Su, (2000)

A.3 Sistema de 136 barras

Os dados do sistema de 136 barras estão demonstrados na Tabela 8, além destes, temos: (I) barra referente à subestação: 136; (II) tensão na subestação (base de tensão): 13,80 kV;

Tabela 8 – Dados do sistema de 136 barras (continua).

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	136	1	0,33205	0,76653	1	0,000	0,000
2	1	2	0,00188	0,00433	2	47,780	19,009
3	2	3	0,22324	0,51535	3	42,551	16,929
4	3	4	0,09943	0,22953	4	87,022	34,622
5	4	5	0,15571	0,35945	5	311,310	123,855
6	5	6	0,16321	0,37677	6	148,869	59,228
7	6	7	0,11444	0,26417	7	238,672	94,956
8	6	8	0,05675	0,05666	8	62,299	24,786
9	8	9	0,52124	0,27418	9	124,598	49,571
10	8	10	0,10877	0,10860	10	140,175	55,768
11	10	11	0,39803	0,20937	11	116,813	46,474
12	10	12	0,91744	0,31469	12	249,203	99,145
13	10	13	0,11823	0,11805	13	291,447	115,952
14	13	14	0,50228	0,26421	14	303,720	120,835
15	13	15	0,05675	0,05666	15	215,396	85,695
16	15	16	0,29379	0,15454	16	198,586	79,007
17	136	17	0,33205	0,76653	17	0,000	0,000
18	17	18	0,00188	0,00433	18	0,000	0,000
19	18	19	0,22324	0,51535	19	0,000	0,000
20	19	20	0,10881	0,25118	20	30,127	14,729
21	20	21	0,71078	0,37388	21	230,972	112,920
22	20	22	0,18197	0,42008	22	60,256	29,458
23	22	23	0,30326	0,15952	23	230,972	112,920
24	22	24	0,02439	0,05630	24	120,507	58,915
25	24	25	0,04502	0,10394	25	0,000	0,000
26	25	26	0,01876	0,04331	26	56,981	27,857
27	26	27	0,11823	0,11805	27	364,665	178,281
28	27	28	0,02365	0,02361	28	0,000	0,000
29	28	29	0,18954	0,09970	29	124,647	60,939
30	29	30	0,39803	0,20937	30	56,981	27,857
31	28	31	0,05675	0,05666	31	0,000	0,000
32	31	32	0,09477	0,04985	32	85,473	41,787
33	32	33	0,41699	0,21934	33	0,000	0,000
34	33	34	0,11372	0,05982	34	396,735	193,960
35	31	35	0,07566	0,07555	35	0,000	0,000
36	35	36	0,36960	0,19442	36	181,152	88,563
37	36	37	0,26536	0,13958	37	242,172	118,395
38	35	38	0,05675	0,05666	38	75,316	36,821
39	136	39	0,33205	0,76653	39	0,000	0,000
40	39	40	0,11819	0,27283	40	1,254	0,531
41	40	41	2,96288	1,01628	41	6,274	2,660
42	40	42	0,00188	0,00433	42	0,000	0,000
43	42	43	0,06941	0,16024	43	117,880	49,971
44	43	44	0,81502	0,42872	44	62,668	26,566
45	43	45	0,06378	0,14724	45	172,285	73,034
46	45	46	0,13132	0,30315	46	458,556	194,388
47	46	47	0,06191	0,14291	47	262,962	111,473
48	47	48	0,11444	0,26417	48	235,761	99,942
49	48	49	0,28374	0,28331	49	0,000	0,000
50	49	50	0,28374	0,28331	50	109,215	46,298
51	48	51	0,04502	0,10394	51	0,000	0,000
52	51	52	0,02626	0,06063	52	72,809	30,865
53	52	53	0,06003	0,13858	53	258,473	109,570
54	53	54	0,03002	0,06929	54	69,169	29,322
55	54	55	0,02064	0,04764	55	21,843	9,260
56	52	56	0,10881	0,25118	56	0,000	0,000
57	56	57	0,25588	0,13460	57	20,527	8,702
58	57	58	0,41699	0,21934	58	150,548	63,819
59	58	59	0,50228	0,26421	59	220,687	93,552

Tabela 8 – Dados do sistema de 136 barras (continuação).

60	59	60	0,33170	0,17448	60	92,384	39,163
61	60	61	0,20849	0,10967	61	0,000	0,000
62	47	62	0,13882	0,32047	62	226,693	96,098
63	136	63	0,00750	0,01732	63	0,000	0,000
64	63	64	0,27014	0,62362	64	294,016	116,974
65	64	65	0,38270	0,88346	65	83,015	33,028
66	65	66	0,33018	0,76220	66	83,015	33,028
67	66	67	0,32830	0,75787	67	103,770	41,285
68	67	68	0,17072	0,39409	68	176,408	70,184
69	68	69	0,55914	0,29412	69	83,015	33,028
70	68	70	0,05816	0,13425	70	217,917	86,698
71	70	71	0,70130	0,36890	71	23,294	9,267
72	71	72	1,02352	0,53839	72	5,075	2,019
73	70	73	0,06754	0,15591	73	72,638	28,899
74	73	74	1,32352	0,45397	74	405,990	161,524
75	136	75	0,01126	0,02598	75	0,000	0,000
76	75	76	0,72976	1,68464	76	100,182	42,468
77	76	77	0,22512	0,51968	77	142,523	60,417
78	77	78	0,20824	0,48071	78	96,042	40,713
79	78	79	0,04690	0,10827	79	300,454	127,366
80	79	80	0,61950	0,61857	80	141,238	59,873
81	80	81	0,34049	0,33998	81	279,847	118,631
82	81	82	0,56862	0,29911	82	87,312	37,013
83	81	83	0,10877	0,10860	83	243,849	103,371
84	83	84	0,56862	0,29911	84	247,750	105,025
85	136	85	0,01126	0,02598	85	0,000	0,000
86	85	86	0,41835	0,96575	86	89,878	38,101
87	86	87	0,10499	0,13641	87	1137,280	482,108
88	86	88	0,43898	1,01338	88	458,339	194,296
89	88	89	0,07520	0,02579	89	358,197	163,290
90	89	90	0,07692	0,17756	90	0,000	0,000
91	90	91	0,33205	0,76653	91	79,608	33,747
92	91	92	0,08442	0,19488	92	87,312	37,013
93	92	93	0,13320	0,30748	93	0,000	0,000
94	93	94	0,29320	0,29276	94	74,001	31,370
95	94	95	0,21753	0,21721	95	232,050	98,369
96	95	96	0,26482	0,26443	96	141,819	60,119
97	93	97	0,10318	0,23819	97	0,000	0,000
98	97	98	0,13507	0,31181	98	76,449	32,408
99	136	99	0,00938	0,02165	99	0,000	0,000
100	99	100	0,16884	0,38976	100	51,322	21,756
101	100	101	0,11819	0,27283	101	58,874	25,381
102	101	102	2,28608	0,78414	102	9,065	3,843
103	101	103	0,45587	1,05236	103	2,092	0,887
104	103	104	0,69600	1,60669	104	16,735	7,094
105	104	105	0,45774	1,05669	105	1506,522	638,634
106	105	106	0,20298	0,26373	106	313,023	132,694
107	106	107	0,21348	0,27737	107	79,831	33,842
108	107	108	0,54967	0,28914	108	51,322	21,756
109	108	109	0,54019	0,28415	109	0,000	0,000
110	107	110	0,04550	0,05911	110	202,435	85,815
111	110	111	0,47385	0,24926	111	60,823	25,784
112	111	112	0,86241	0,45364	112	45,618	19,338
113	112	113	0,56862	0,29911	113	0,000	0,000
114	108	114	0,77711	0,40878	114	157,070	66,584
115	114	115	1,08038	0,56830	115	0,000	0,000
116	109	116	1,09933	0,57827	116	250,148	106,041
117	116	117	0,47385	0,24926	117	0,000	0,000
118	104	118	0,32267	0,74488	118	69,809	29,593
119	118	119	0,14633	0,33779	119	32,072	13,596
120	119	120	0,12382	0,28583	120	61,084	25,894

Tabela 8 – Dados do sistema de 136 barras (continuação).

121	136	121	0,01126	0,02598	121	0,000	0,000
122	121	122	0,64910	1,49842	122	94,622	46,260
123	122	123	0,04502	0,10394	123	49,858	24,375
124	123	124	0,52640	0,18056	124	123,164	60,214
125	123	125	0,02064	0,04764	125	78,350	38,304
126	125	126	0,53071	0,27917	126	145,475	71,121
127	125	127	0,09755	0,22520	127	21,369	10,447
128	127	128	0,11819	0,27283	128	74,789	36,564
129	127	129	0,13882	0,32047	129	227,926	111,431
130	129	130	0,04315	0,09961	130	35,614	14,411
131	130	131	0,09192	0,21220	131	249,295	121,877
132	131	132	0,16134	0,37244	132	316,722	154,842
133	132	133	0,37832	0,37775	133	333,817	163,199
134	133	134	0,93724	0,93664	134	249,295	121,877
135	134	135	0,29320	0,29276	135	0,000	0,000
136	7	73	0,13132	0,30315	136	0,000	0,000
137	9	24	0,26536	0,13958			
138	15	83	0,14187	0,14166			
139	38	135	0,08512	0,08499			
140	25	51	0,04502	0,10394			
141	50	96	0,14187	0,14166			
142	55	98	0,14187	0,14166			
143	62	120	0,03940	0,09094			
144	66	79	0,12994	0,29882			
145	79	131	0,01688	0,03898			
146	84	135	0,33170	0,17448			
147	91	104	0,14187	0,14166			
148	30	129	0,07692	0,17756			
149	90	103	0,07692	0,17756			
150	92	104	0,07692	0,17756			
151	92	132	0,07692	0,17756			
152	96	120	0,26482	0,26443			
153	110	47	0,49696	0,64567			
154	126	76	0,17059	0,08973			
155	128	77	0,05253	0,12126			
156	135	98	0,29320	0,29276			

Fonte: Mantovani; Casari; Romero, (2000)

A.4 Sistema de 415 barras

Os dados do sistema de 415 barras aparecem na Tabela 9, além destes, temos: (I) Barra referente à subestação: 1; (II) Tensão na subestação (base de tensão): 10,00 kV;

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continua).

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	384	68	0,0310675	0,0214200	1	0,1	0,0
2	89	67	0,1078225	0,0743400	2	0,1	0,0
3	225	224	0,0694450	0,0478800	3	122,0	59,0
4	21	72	0,1937150	0,1335600	4	0,1	0,0
5	66	384	0,0347225	0,0239400	5	0,1	0,0
6	3	20	0,6103850	0,4208400	6	114	55
7	224	222	0,0694450	0,0478800	7	51	25

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

8	72	74	0,0219300	0,0151200	8	83	40
9	70	382	0,0310675	0,0214200	9	0,1	0,0
10	20	51	0,0877200	0,0604800	10	122	59
11	222	221	0,0877200	0,0604800	11	122	59
12	76	72	0,0548250	0,0378000	12	77	37
13	382	66	0,0328950	0,0226800	13	0,1	0,0
14	51	52	0,0694450	0,0478800	14	68	33
15	221	220	0,0840650	0,0579600	15	71	34
16	75	81	0,0840650	0,0579600	16	0,1	0,0
17	59	70	0,0537285	0,0370440	17	0,1	0,0
18	52	56	0,1169600	0,0806400	18	77	37
19	1	273	0,0142545	0,0098280	19	30	14
20	81	76	0,0529975	0,0365400	20	13	6
21	68	85	0,0292400	0,0201600	21	1	0
22	56	27	0,0950300	0,0655200	22	194	94
23	1	274	0,1154980	0,0796320	23	77	37
24	74	75	0,1059950	0,0730800	24	77	37
25	68	93	0,0840650	0,0579600	25	77	37
26	27	31	0,1023400	0,0705600	26	122	59
27	274	275	0,0836995	0,0577080	27	104	51
28	72	73	0,0986850	0,0680400	28	0,1	0,0
29	60	58	0,0109650	0,0075600	29	77	37
30	31	40	0,1059950	0,0730800	30	243	118
31	275	209	0,1396210	0,0962640	31	77	37
32	73	80	0,0731000	0,0504000	32	77	37
33	65	71	0,0712725	0,0491400	33	0,1	0,0
34	40	47	0,0913750	0,0630000	34	121	58
35	275	276	0,1158635	0,0798840	35	194	94
36	73	77	0,0767550	0,0529200	36	122	59
37	69	65	0,0310675	0,0214200	37	77	37
38	51	54	0,0548250	0,0378000	38	0,1	0,0
39	276	264	0,1151325	0,0793800	39	0,1	0,0
40	77	78	0,0511700	0,0352800	40	96	47
41	59	69	0,0211990	0,0146160	41	122	59
42	54	24	0,0731000	0,0504000	42	70	34
43	263	264	0,0687140	0,0473760	43	58	28
44	79	83	0,2412300	0,1663200	44	0,1	0,0
45	63	61	0,1096500	0,0756000	45	122	59
46	24	29	0,0950300	0,0655200	46	122	59
47	262	263	0,0630936	0,0532656	47	122	59
48	82	80	0,0731000	0,0504000	48	86	42
49	71	63	0,0226610	0,0156240	49	77	37
50	29	34	0,1151325	0,0793800	50	0,1	0,0
51	261	262	0,0379730	0,0320580	51	122	59
52	78	79	0,0219300	0,0151200	52	122	59
53	61	60	0,0438600	0,0302400	53	122	59
54	34	47	0,1736125	0,1197000	54	0,1	0,0
55	259	261	0,0511175	0,0431550	55	42	20
56	83	90	0,1209805	0,0834120	56	122	59
57	58	62	0,1293870	0,0892080	57	13	6
58	47	21	0,0840650	0,0579600	58	77	37
59	257	259	0,0687140	0,0473760	59	50	24
60	77	59	0,3874300	0,2671200	60	0,1	0,0
61	64	67	0,0449565	0,0309960	61	60	29
62	20	44	0,146200	0,0100800	62	71	34
63	372	239	0,0265811	0,0224406	63	122	59
64	123	1	0,0135240	0,0159530	64	77	37
65	67	68	0,0862580	0,0594720	65	95	46
66	44	25	0,1276250	0,0882000	66	121	58
67	264	0265	0,0723690	0,0498960	67	77	37
68	120	94	0,2538284	0,2584552	68	103	50
69	62	64	0,06063075	0,0415800	69	52	25

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

70	25	35	0,1279250	0,0882000	70	57	27
71	369	347	0,1315800	0,0907200	71	171	83
72	120	123	0,2948750	0,3002500	72	121	58
73	58	20	0,5921100	0,4082400	73	39	19
74	35	38	0,0804100	0,0554400	74	119	58
75	369	370	0,2083350	0,1436400	75	49	24
76	114	115	0,0475150	0,0327600	76	0,1	0,0
77	1	92	0,3888920	0,2681280	77	50	24
78	38	41	0,1041674	0,0718200	78	44	21
79	370	348	0,1187875	0,0819000	79	82	40
80	115	112	0,0402050	0,0277200	80	132	64
81	92	2	0,3410115	0,2351160	81	194	94
82	41	43	0,1169600	0,0806400	82	0,1	0,0
83	383	251	0,0109650	0,0075600	83	122	59
84	94	113	0,0328950	0,0226800	84	3	1
85	92	87	0,0128524	0,0108504	85	52	25
86	43	48	0,0804100	0,0554400	86	103	50
87	383	370	0,0182750	0,0126000	87	21	10
88	113	114	0,0767550	0,0529200	88	21	10
89	2	17	0,0877200	0,0604800	89	21	10
90	48	50	0,0731000	0,0504000	90	5	3
91	208	277	0,0672520	0,0463680	91	0,1	0,0
92	106	95	0,0840650	0,0579600	92	0,1	0,0
93	6	7	0,0402050	0,0277200	93	21	10
94	20	33	0,0657900	0,0453600	94	18	9
95	277	278	0,0328950	0,0226800	95	122	59
96	95	112	0,0328950	0,0226800	96	116	56
97	7	3	0,0519010	0,0357840	97	7	3
98	84	33	0,0420325	0,0289800	98	64	31
99	277	279	0,0482460	0,0332640	99	49	24
100	94	111	0,0657900	0,0453600	100	16	8
101	18	5	0,1224425	0,0844200	101	77	37
102	28	36	0,0913750	0,0630000	102	119	58
103	279	280	0,0343570	0,0236880	103	71	34
104	111	106	0,0657900	0,0453600	104	77	37
105	5	6	0,0493425	0,0340200	105	194	94
106	36	45	0,1315800	0,0907200	106	122	59
107	280	281	0,0621350	0,0428400	107	55	27
108	119	121	0,0102235	0,0086310	108	38	18
109	17	18	0,1169600	0,0806400	109	22	10
110	49	45	0,0438600	0,0302400	110	0,1	0,0
111	281	235	0,0493425	0,0340200	111	77	37
112	94	119	0,0560280	0,0660910	112	122	59
113	2	14	0,0164475	0,0113400	113	38	18
114	55	23	0,0767550	0,0529200	114	122	59
115	281	282	0,0537285	0,0370440	115	27	13
116	118	84	0,0402050	0,0277200	116	64	31
117	8	9	0,0950300	0,0655200	117	0,1	0,0
118	23	28	0,0694450	0,0478800	118	0,1	0,0
119	235	234	0,0833340	0,0574560	119	0,1	0,0
120	119	122	0,0511700	0,0352800	120	0,1	0,0
121	9	3	0,0146200	0,0100800	121	79	38
122	33	55	0,0438600	0,0302400	122	247	119
123	235	236	0,0420325	0,0289800	123	0,1	0,0
124	122	118	0,2010250	0,1386000	124	0,1	0,0
125	16	19	0,1571650	0,1083600	125	0,1	0,0
126	21	50	0,0365500	0,0252000	126	0,1	0,0
127	208	236	0,0767550	0,0529200	127	0,1	0,0
128	104	105	0,0496570	0,0419220	128	0,1	0,0
129	19	8	0,0219300	0,0151200	129	77	37
130	32	44	0,2558500	0,1764000	130	122	59
131	232	349	0,0759460	0,0641160	131	62	30

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

132	84	104	0,0731000	0,0504000	132	105	51
133	14	16	0,0986850	0,0680400	133	122	59
134	37	32	0,1059950	0,0730800	134	77	37
135	349	207	0,0321310	0,0271260	135	77	37
136	105	108	0,0657900	0,0453600	136	0,1	0,0
137	2	13	0,0321310	0,0271260	137	85	41
138	42	37	0,0676175	0,0466200	138	8	4
139	380	229	0,0411861	0,0347706	139	122	59
140	109	108	0,0496570	0,0419220	140	35	17
141	4	12	0,0671830	0,0567180	141	55	27
142	46	42	0,0255850	0,0176400	142	153	74
143	229	228	0,0630936	0,0532656	143	316	153
144	84	109	0,0475150	0,0327600	144	105	51
145	12	15	0,1051560	0,0887760	145	20	10
146	46	50	0,0365500	0,0252000	146	95	46
147	232	231	0,0968575	0,0667800	147	38	18
148	110	84	0,0438600	0,0302400	148	93	40
149	15	11	0,1329055	0,1122030	149	50	24
150	21	49	0,1352350	0,0932400	150	77	37
151	232	293	0,0749175	0,0516600	151	122	59
152	103	110	0,0767550	0,0529200	152	102	49
153	13	4	0,0452755	0,0382230	153	60	29
154	39	30	0,1169600	0,0806400	154	77	37
155	293	236	0,0694450	0,0478800	155	194	94
156	107	103	0,0547250	0,0378000	156	56	27
157	11	86	0,0350520	0,0295920	157	122	59
158	49	39	0,0877200	0,0604800	158	0,1	0,0
159	221	344	0,0292400	0,0201600	159	3	1
160	84	107	0,0657900	0,0453600	160	1	0
161	86	91	0,0950300	0,0655200	161	52	25
162	86	91	0,0950300	0,0655200	162	194	94
163	53	22	0,0402050	0,0277200	163	10	5
164	304	306	0,0694450	0,0478800	164	128	62
165	97	116	0,0438600	0,0302400	165	16	8
166	10	11	0,0467360	0,0394560	166	37	18
167	30	26	0,0548250	0,0378000	167	154	75
168	378	377	0,1114775	0,0768600	168	0,1	0,0
169	84	99	0,1315800	0,0907200	169	0,1	0,0
170	3	10	0,1078225	0,0743400	170	78	38
171	26	53	0,1005125	0,0693000	171	0,1	0,0
172	304	378	0,0588455	0,0405720	172	27	13
173	101	96	0,1059950	0,0730800	173	103	50
174	10	88	0,1095375	0,0924750	174	122	59
175	22	33	0,0438600	0,0302400	175	72	35
176	309	307	0,0986850	0,0680400	176	0,1	0,0
177	100	101	0,0584800	0,0403200	177	122	59
178	88	89	0,0804100	0,0554400	178	194	94
179	21	57	0,2156450	0,1486800	179	0,1	0,0
180	314	317	0,0815065	0,0561960	180	77	37
181	102	100	0,0548250	0,0378000	181	82	40
182	99	102	0,0511700	0,0352800	182	53	26
183	187	167	0,0847090	0,0715140	183	122	59
184	314	318	0,0723690	0,0498960	184	64	31
185	138	194	0,0127925	0,0088200	185	86	42
186	96	117	0,0785825	0,0541800	186	82	40
187	167	175	0,0905510	0,0764460	187	0,1	0,0
188	301	305	0,0438600	0,0302400	188	167	81
189	155	151	0,0694450	0,0478800	189	0,1	0,0
190	117	97	0,0402050	0,0277200	190	0,1	0,0
191	175	181	0,0847090	0,0715140	191	131	64
192	310	315	0,0614040	0,0423360	192	21	10
193	126	124	0,0292400	0,0201600	193	21	10

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

194	98	94	0,0402050	0,0277200	194	21	10
195	160	180	0,0438600	0,0302400	195	21	10
196	310	305	0,0826030	0,0569520	196	0,1	0,0
197	1	351	0,2266100	0,1562400	197	0,1	0,0
198	116	98	0,0621350	0,0428400	198	0,1	0,0
199	180	177	0,0548250	0,0378000	199	0,1	0,0
200	129	346	0,2616980	0,1804320	200	0,1	0,0
201	1	350	0,2266100	0,1562400	201	52	25
202	57	147	0,1571650	0,1083600	202	202	98
203	169	162	0,0767550	0,0529200	203	202	98
204	90	370	0,1578960	0,1088640	204	73	35
205	350	203	0,0233920	0,0161280	205	81	39
206	153	141	0,0730250	0,0616500	206	115	56
207	162	183	0,0840650	0,0579600	207	118	57
208	382	383	0,1502205	0,1035720	208	318	154
209	351	379	0,0233920	0,0161280	209	161	78
210	147	142	0,1059950	0,0730800	210	126	61
211	183	182	0,0328950	0,0226800	211	59	29
212	66	252	0,1929840	0,1330560	212	24	12
213	203	201	0,0511175	0,0431550	213	24	12
214	142	136	0,0804100	0,0554400	214	5	2
215	160	181	0,0913750	0,0630000	215	126	61
216	384	243	0,2273410	0,1567440	216	56	27
217	204	205	0,0621350	0,0428400	217	62	30
218	132	153	0,0877200	0,0604800	218	0,1	0,0
219	181	178	0,0584800	0,0403200	219	32	15
220	85	244	0,1399865	0,0965160	220	158	77
221	203	206	0,1034034	0,0872964	221	126	61
222	136	132	0,1498550	0,1033200	222	202	98
223	171	163	0,0642620	0,0542520	223	41	20
224	352	414	0,0705415	0,0486360	224	81	39
225	379	380	0,1034034	0,0872964	225	126	61
226	57	149	0,0694450	0,0478800	226	202	98
227	163	184	0,0759460	0,0641160	227	18	9
228	414	385	0,0720035	0,0496440	228	202	98
229	206	207	0,0598805	0,0505530	229	106	51
230	57	125	0,0913750	0,0630000	230	175	85
231	160	129	0,2279380	0,1923480	231	174	84
232	414	401	0,0727345	0,0501480	232	113	55
233	1	375	0,0109650	0,0075600	233	202	98
234	127	124	0,0292400	0,0201600	234	0,1	0,0
235	129	141	0,0321310	0,0271260	235	202	98
236	401	386	0,0592110	0,0408240	236	403	195
237	208	209	0,0383775	0,0264600	237	202	98
238	128	127	0,2704700	0,1865800	238	126	61
239	131	157	0,0365500	0,0252000	239	0,1	0,0
240	401	402	0,0709070	0,0488880	240	29	14
241	209	210	0,1169600	0,0806500	241	9	4
242	125	128	0,0219300	0,0151200	242	5	2
243	130	131	0,0548250	0,0378000	243	0,1	0,0
244	402	387	0,0566525	0,0390600	244	18	9
245	209	211	0,0559215	0,0385560	245	45	22
246	200	119	0,0767550	0,0529200	246	32	16
247	141	130	0,0467360	0,0394560	247	61	30
248	402	403	0,0595765	0,0410760	248	81	39
249	211	1	0,0561870	0,0388080	249	126	61
250	200	201	0,073100	0,0050400	250	23	11
251	157	133	0,1133050	0,0781200	251	14	7
252	403	388	0,0833340	0,0574560	252	18	9
253	375	202	0,1498550	0,1033200	253	126	61
254	158	200	0,0219300	0,0151200	254	5	3
255	133	140	0,1059950	0,0730800	255	26	13

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

256	403	404	0,0683485	0,0471240	256	18	9
257	202	1	0,4824600	0,3326400	257	126	61
258	124	158	0,1023400	0,0705600	258	81	39
259	140	147	0,1535100	0,1058400	259	0,1	0,0
260	368	345	0,1151325	0,0793800	260	126	61
261	373	352	0,1041675	0,0718200	261	41	20
262	199	192	0,0146200	0,0100800	262	0,1	0,0
263	129	154	0,0340520	0,0295920	263	28	14
264	345	346	0,0584800	0,0403200	264	30	14
265	352	212	0,1136705	0,0783720	265	81	39
266	199	197	0,0694450	0,0478800	266	202	98
267	137	144	0,0950300	0,0655200	267	318	154
268	345	369	0,0529975	0,0365400	268	176	85
269	352	353	0,2138175	0,1474200	269	126	61
270	159	199	0,2704700	0,1864800	270	6	3
271	144	148	0,0950300	0,0655200	271	31	15
272	400	404	0,0475150	0,0327600	272	60	29
273	353	213	0,2010250	0,1386000	273	56	27
274	197	191	0,0109650	0,0075600	274	126	61
275	154	156	0,0321310	0,0271260	275	118	57
276	404	405	0,0402050	0,0277200	276	126	61
277	353	214	0,0500735	0,0345240	277	202	98
278	159	190	0,235900	0,2402000	278	10	5
279	156	137	0,0840650	0,0579600	279	126	61
280	405	389	0,0588455	0,0405720	280	202	98
281	1	215	0,3475905	0,2396520	281	318	154
282	159	161	0,0840650	0,0579600	282	82	40
283	143	150	0,0986850	0,0680400	283	126	61
284	405	406	0,0716380	0,0493920	284	22	10
285	215	216	0,1059950	0,0730800	285	13	6
286	161	172	0,0877200	0,0604800	286	71	34
287	150	148	0,0219300	0,0151200	287	101	49
288	406	390	0,0453220	0,0312480	288	113	54
289	216	217	0,0993140	0,0838440	289	126	61
290	172	188	0,0913750	0,0630000	290	0,1	0,0
291	134	139	0,1194610	0,1011060	291	34	17
292	406	391	0,0731000	0,0504000	292	83	40
293	216	218	0,0657900	0,0453600	293	59	29
294	188	168	0,0913750	0,0630000	294	126	61
295	139	143	0,0621350	0,0428400	295	145	70
296	404	407	0,0833340	0,0574560	296	202	98
297	218	219	0,0029240	0,0020160	297	50	24
298	176	179	0,0647900	0,0453600	298	41	20
299	154	134	0,0788670	0,0665820	299	202	98
300	407	392	0,0785825	0,0541800	300	77	37
301	219	220	0,0804100	0,0554400	301	161	78
302	168	176	0,1133050	0,0781200	302	477	231
303	148	57	0,1462000	0,1008000	303	68	33
304	407	408	0,0489770	0,0337680	304	14	7
305	220	223	0,0709803	0,0599238	305	4	2
306	161	185	0,1315800	0,0907200	306	0,1	0,0
307	129	151	0,0328950	0,0226800	307	66	32
308	408	409	0,0668865	0,0461160	308	0,1	0,0
309	223	237	0,0817880	0,0690480	309	60	29
310	185	164	0,0913750	0,0630000	310	95	46
311	145	146	0,0328950	0,0226800	311	0,1	0,0
312	409	393	0,0738310	0,0509040	312	19	9
313	237	238	0,0622173	0,0525258	313	67	32
314	164	165	0,0328950	0,0226800	314	18	9
315	146	149	0,0548250	0,0378000	315	33	16
316	409	394	0,0690795	0,0476280	316	21	10
317	237	372	0,0537464	0,0453744	317	33	16

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

318	165	173	0,1388900	0,0957600	318	42	20
319	152	135	0,1767550	0,0529200	319	52	25
320	408	410	0,0551905	0,0380520	320	43	21
321	239	240	0,0058420	0,0049320	321	126	61
322	173	179	0,1133050	0,0781200	322	107	52
323	135	145	0,1425450	0,0982800	323	202	98
324	410	415	0,0657900	0,0453600	324	126	61
325	239	243	0,0835406	0,0705276	325	24	12
326	179	160	0,0694450	0,0478800	326	101	49
327	135	195	0,0091375	0,0063000	327	81	39
328	410	411	0,0643280	0,0443520	328	155	75
329	243	355	0,0054825	0,0037800	329	23	11
330	159	182	0,0540960	0,0638120	330	31	15
331	151	152	0,0548250	0,0378000	331	126	61
332	411	395	0,0595765	0,0410760	332	13	6
333	355	354	0,1279250	0,0882000	333	56	27
334	182	186	0,0483000	0,0569750	334	120	58
335	1	190	0,1415400	0,1441200	335	126	61
336	411	412	0,0646175	0,0466200	336	403	195
337	354	242	0,0182750	0,0126000	337	81	39
338	186	166	0,0377440	0,0384320	338	177	86
339	190	189	0,0731000	0,0504000	339	151	73
340	412	399	0,0566525	0,0390600	340	9	4
341	354	241	0,0731000	0,0504000	341	29	14
342	166	170	0,0377440	0,0384320	342	14	7
343	189	198	0,1096500	0,0756000	343	23	11
344	412	398	0,0716380	0,0493920	344	45	22
345	243	356	0,0091385	0,0063000	345	0,1	0,0
346	170	174	0,0292100	0,0246600	346	36	17
347	198	196	0,0365500	0,0252000	347	5	2
348	412	413	0,0873545	0,0602280	348	9	4
349	356	357	0,0511700	0,0352800	349	80	39
350	174	180	0,0636930	0,0648540	350	0,1	0,0
351	189	193	0,0233920	0,0161280	351	0,1	0,0
352	413	397	0,0705415	0,0486360	352	0,1	0,0
353	357	244	0,0127925	0,0088200	353	0,1	0,0
354	159	184	0,2266100	0,1562400	354	0,1	0,0
355	149	138	0,1279250	0,0882000	355	0,1	0,0
356	413	396	0,0694450	0,0478800	356	0,1	0,0
357	357	245	0,0054825	0,0037800	357	0,1	0,0
358	184	187	0,0350520	0,0295920	358	0,1	0,0
359	138	155	0,1059950	0,0730800	359	0,1	0,0
360	290	289	0,0628660	0,0433440	360	0,1	0,0
361	243	246	0,0365125	0,0308250	361	0,1	0,0
362	246	247	0,0526320	0,0362880	362	0,1	0,0
363	265	266	0,1078225	0,0743400	363	0,1	0,0
364	289	288	0,0467840	0,0322560	364	0,1	0,0
365	306	310	0,1265630	0,0871920	365	0,1	0,0
366	247	248	0,0727945	0,0501480	366	0,1	0,0
367	266	267	0,0994160	0,0685440	367	0,1	0,0
368	288	300	0,1867705	0,1287720	368	0,1	0,0
369	310	320	0,0127925	0,0088200	369	0,1	0,0
370	243	249	0,0487807	0,0411822	370	0,1	0,0
371	267	268	0,1564340	0,1078560	371	0,1	0,0
372	300	286	0,1096500	0,0756000	372	0,1	0,0
373	310	314	0,0723690	0,0498960	373	0,1	0,0
374	249	358	0,0431290	0,0297360	374	0,1	0,0
375	268	269	0,0549647	0,0559666	375	0,1	0,0
376	1	373	0,0277780	0,0191520	376	0,1	0,0
377	314	309	0,0697105	0,0481320	377	46	41
378	358	359	0,0054825	0,0037800	378	86	41
379	269	365	0,0707700	0,0720600	379	0,1	0,0

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

380	300	285	0,0811410	0,0559440	380	0,1	0,0
381	309	313	0,0785825	0,0541800	381	0,1	0,0
382	359	250	0,0201025	0,0138600	382	0,1	0,0
383	365	366	0,0255850	0,0176400	383	0,1	0,0
384	300	301	0,0932025	0,0642600	384	0,1	0,0
385	313	317	0,0693485	0,0471240	385	68	33
386	359	251	0,1407175	0,0970200	386	15	7
387	366	270	0,1005125	0,0693000	387	56	27
388	301	302	0,0555560	0,0383040	388	12	6
389	317	319	0,1235390	0,0851760	389	50	24
390	251	252	0,1882325	0,1297800	390	115	56
391	366	271	0,0164475	0,0113400	391	14	7
392	302	303	0,0453220	0,0312480	392	5	2
393	319	318	0,0665210	0,0458640	393	19	9
394	251	360	0,0986850	0,0680400	394	34	17
395	365	363	0,0483595	0,0492410	395	10	5
396	303	304	0,1951770	0,1345680	396	40	19
397	318	315	0,0694450	0,0478800	397	28	14
398	360	253	0,0497080	0,0342720	398	14	7
399	363	362	0,0188720	0,0192160	399	17	8
400	304	305	0,2083350	0,1436400	400	41	20
401	315	311	0,0833340	0,0574560	401	0,1	0,0
402	253	254	0,0458597	0,0387162	402	0,1	0,0
403	363	381	0,2631600	0,1814400	403	0,1	0,0
404	305	308	0,0504390	0,0347760	404	0,1	0,0
405	311	304	0,1052640	0,0725760	405	0,1	0,0
406	254	361	0,0588455	0,0405720	406	0,1	0,0
407	362	272	0,0164475	0,0113400	407	0,1	0,0
408	308	316	0,2218585	0,1529640	408	0,1	0,0
409	296	260	0,0478805	0,0330420	409	0,1	0,0
410	361	256	0,0402050	0,0177200	410	0,1	0,0
411	362	1	0,0241500	0,0284875	411	0,1	0,0
412	316	312	0,1052640	0,0725760	412	0,1	0,0
413	260	287	0,0358190	0,0246960	413	0,1	0,0
414	254	255	0,0274125	0,0189000	414	0,1	0,0
415	1	364	0,2850900	0,1965600	415	19	9
416	312	307	0,0723690	0,0498960			
417	260	324	0,1078225	0,0743400			
418	254	257	0,0788670	0,0665820			
419	364	284	0,1041675	0,0718200			
420	307	300	0,0782170	0,0539280			
421	324	326	0,0054825	0,0037800			
422	257	258	0,1059950	0,0730800			
423	364	285	0,0584800	0,0403200			
424	334	336	0,0712725	0,0491400			
425	324	266	0,1038020	0,0715680			
426	257	283	0,0537464	0,0453744			
427	381	268	0,3094785	0,2134440			
428	336	323	0,0548250	0,0378000			
429	324	325	0,0482460	0,0332640			
430	283	282	0,0663067	0,0559782			
431	268	327	0,0383775	0,0264600			
432	336	337	0,0646935	0,0446040			
433	324	323	0,0877200	0,0604800			
434	282	234	0,0554990	0,0468540			
435	327	328	0,0548250	0,0378000			
436	337	338	0,0292400	0,0201600			
437	323	322	0,0676175	0,0466200			
438	234	233	0,0277495	0,0234270			
439	268	297	0,0504390	0,0347760			
440	338	339	0,0420325	0,0289800			
441	322	321	0,0950300	0,0655200			

Tabela 9 – Dados do sistema de 415 barras (continuação).

442	233	376	0,0116840	0,0098640
443	297	296	0,0504390	0,0347760
444	339	265	0,0679830	0,0468720
445	321	299	0,0701760	0,0483840
446	230	231	0,0455676	0,0384696
447	296	295	0,0741965	0,0511560
448	265	367	0,0087720	0,0060480
449	299	296	0,038120	0,0262080
450	230	228	0,0262890	0,0221940
451	296	298	0,0376465	0,0259560
452	367	340	0,0010965	0,0007560
453	322	329	0,0314330	0,0216720
454	228	371	0,0467360	0,0394560
455	295	294	0,0226610	0,0156240
456	340	341	0,0274125	0,0189000
457	329	330	0,0266815	0,0183960
458	371	374	0,0394335	0,0332910
459	294	292	0,0917405	0,0632520
460	341	342	0,1133050	0,0781200
461	330	331	0,0416670	0,0287280
462	374	227	0,0036550	0,0025200
463	268	292	0,0986850	0,0680400
464	334	335	0,0559215	0,0385560
465	331	332	0,0274125	0,0189000
466	374	226	0,0023368	0,0019728
467	292	290	0,0168130	0,0115920
468	341	368	0,1790950	0,1234800
469	329	333	0,0584800	0,0403200
470	226	225	0,0274125	0,0189000
471	290	291	0,0054825	0,0037800
472	376	230	0,0277495	0,0234270
473	333	3334	0,0416670	0,0287280
474	368	343	0,0091375	0,0063000

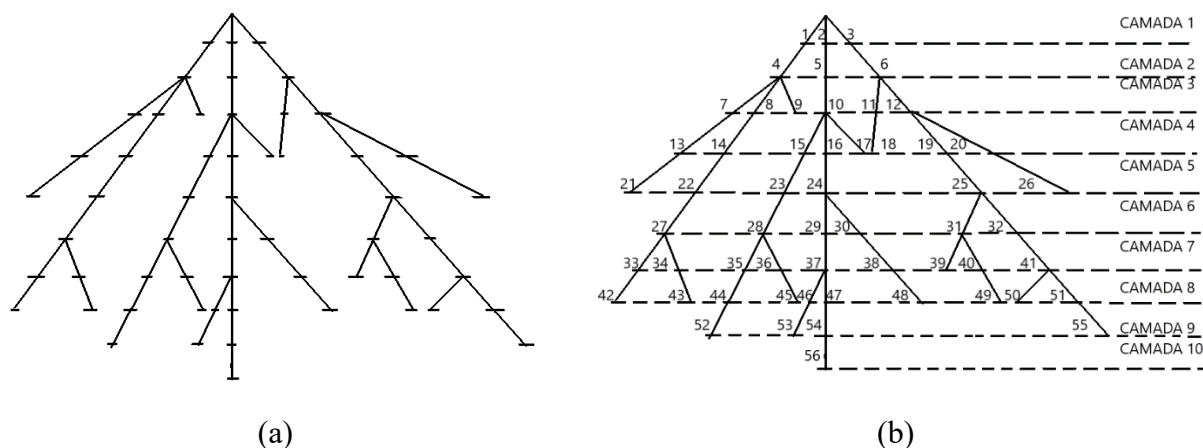
Fonte: Bernal-Agustin (1998)

B ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL DE VARREDURA

Nesta seção será apresentado o funcionamento de um algoritmo de fluxo de carga radial de varredura apresentado por Shirmohammadi et al. (1988). O algoritmo é classificado como de varredura pois é realizado por um processo iterativo que pode ser feito num percurso das barras extremas em direção à subestação ou vice-versa.

Antes da resolução do fluxo de carga radial é preciso renumerar o sistema por camadas, para orientação do algoritmo, sendo que a primeira camada é composta pelos ramos ligados diretamente à subestação, a segunda camada é composta pelos ramos que estão ligados à primeira e assim por diante. A Figura 17 (b) demonstra esta renumeração.

Figura 17 – (a) sistema exemplo original (b) sistema exemplo renumerado.



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

O processo de resolução se inicia com a escolha de um valor para os módulos de tensão nas barras, sendo que tipicamente é escolhido o valor da tensão na subestação. Com este valor definido e sabendo o valor da impedância de cada ramo do sistema, pode-se calcular os valores de corrente de carga em cada barra e as correntes nos ramos do sistema. E por fim, com os valores das correntes nos ramos é possível obter o valor aproximado das perdas ativas do sistema, o qual é a função objetivo do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

O processo utilizado neste trabalho foi implementado com início nas barras extremas e percorrendo o sistema em direção à subestação, chamado de processo ‘backward’. Encontradas as correntes nos ramos no primeiro processo é possível saber a corrente que está saindo da subestação e iniciando um processo ‘forward’ (processo inverso do ‘backward’) encontra-se os novos valores de tensão em cada uma das barras e a partir destes valores repete-se o passo um (processo das barras extremas à subestação) calculando os novos valores de perdas ativas.

Este processo iterativo possui como critério de parada a mínima variação, com uma tolerância especificada, do valor de perdas ativas em duas iterações consecutivas. De maneira equivalente, o algoritmo pode ser resumido da seguinte forma, segundo Shirmohammadi et al. (1988):

- I. Fixar as tensões nas barras, equivalente ao valor da barra de subestação. Escolher a tolerância ξ .
- II. Num procedimento 'backward' calcular as correntes de carga nas barras e as correntes nos ramos do sistema.
- III. Calcular as perdas ativas dos sistemas.
- IV. Se a diferença dos valores de perdas ativas em duas iterações consecutivas for menor que ξ , parar o processo. Caso contrário passar para o próximo passo.
- V. Com os valores de correntes nos ramos calcular os novos valores dos módulos de tensão nas barras e voltar ao passo II.