

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

RODOLFO VILAR BUCK

**ANÁLISE DA TÉCNICA DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE
ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS TRADICIONAIS DE
CONTROLE DE TENSÃO E REATIVOS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Ilha Solteira – SP
2023

PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODOLFO VILAR BUCK

**ANÁLISE DA TÉCNICA DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE
ALOCÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS TRADICIONAIS DE
CONTROLE DE TENSÃO E REATIVOS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

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

Jonatas Boas Leite
Orientador

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B922a Buck, Rodolfo Vilar.
Análise da técnica de solução para o problema de alocação ótima de dispositivos tradicionais de controle de tensão e reativos em redes de distribuição de energia elétrica / Rodolfo Vilar Buck. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023 43 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Jonatas Boas Leite

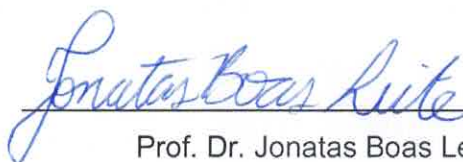
Inclui bibliografia

1. Alocação ótima de transformadores Oltc e reguladores de tensão. 2. Alocação ótima de Banco de capacitores. 3. Fluxo de potência. 4. Metaheurística GRASP. 5. Sistema de distribuição de energia elétrica.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Setor Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CEB/8 - 9999

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos cinco dias do mês de Maio do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Rodolfo Vilar Buck**, matriculado sob o nº 162053665, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. **Jonatas Boas Leite**, o Doutorando **Brian Daniel Jaramillo León** e o Doutorando **Lucas do Carmo Yamaguti**, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Análise da Técnica de Solução para o Problema de Alocação ótima de Dispositivos Tradicionais de Controle de Tensão e Reativos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**", obtendo a nota 9,5 (NOVE E MEIO) e conceito APROVADO.



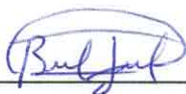
Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



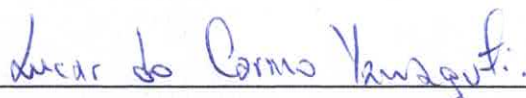
Rodolfo Vilar Buck

- Discente -



Doutorando Brian Daniel Jaramillo León

- Membro da Banca -



Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti

- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pela sabedoria concedida durante esses anos de graduação. Aos meus pais, Ligia e Ednei, e seus respectivos cônjuges, pelo apoio incondicional e o constante incentivo. Aos meus irmãos, Vitor e Pedro, que mesmo com a distância, sempre estiveram presentes, me apoiando.

Aos meus amigos de turma, que compartilharam comigo os mais diversos desafios e horas de estudos, sempre contribuindo de forma mútua. Aos meus amigos da república Kilombo, os quais foram minha família em Ilha Solteira.

Ao meu orientador, Jonatas, que mesmo em meio a pandemia, sempre esteve disponível para sanar dúvidas e auxiliar na construção deste trabalho. À todos os professores do curso de Engenharia Elétrica da UNESP, por dividirem seus conhecimentos, sempre com excelência técnica.

Por fim, agradeço a instituição UNESP da cidade de Ilha Solteira, por me proporcionar momentos inesquecíveis, por trazer grande crescimento pessoal e por levar conhecimento gratuito e de qualidade a milhares de estudantes, como eu. Tenho orgulho de carregar o nome desta universidade por onde for.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal a alocação ótima de transformadores com comutadores de tap sob carga (OLTC), reguladores de tensão e banco de capacitores (BC) na rede de distribuição, para minimizar as perdas elétricas mantendo a magnitude de tensão sob os limites operacionais em todas as barras. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo que resolve o problema de fluxo de potência, considerando as variáveis de controle de tensão e reativos, e os dispositivos (OLTC, reguladores de tensão e BC) que influenciam na qualidade de energia entregue aos consumidores no sistema elétrico de distribuição. As propostas de solução são geradas com base na técnica de otimização combinatória, a meta-heurística GRASP. As análises das instâncias do algoritmo desenvolvido incluem a determinação dos parâmetros de controle, bem como a avaliação de seu desempenho frente aos diferentes cenários propostos. Para tanto, utilizou-se uma rede de distribuição com 136 barras, inserindo um transformador e dois bancos de capacitores, utilizando esta variação como base para análise da influência destes equipamentos nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Por fim, variando os parâmetros de controle no GRASP, pode-se melhor verificar sua influência na resolução deste tipo de problema, encontrando padrões e limites ótimos que convergem nas melhores soluções para problemas de minimização.

Palavras-chave: Alocação ótima de Transformadores OLTC e reguladores de tensão. Alocação ótima de Banco de capacitores. Fluxo de potência. Metaheurística GRASP. Sistema de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

This paper has, as main goal, the optimized allocation of On-load tap changer (OLTC) transformers, voltage regulators and capacitors banks, in the electric distribution network, to minimize the electrical losses of voltage under the operational limits on all buses. For that, an algorithm was developed, which solves the power flow problem, considering the voltage and reactive control variables, in addition to all these devices that influence the quality of energy delivered to consumers in the electric distribution system. Solution proposals are generated based on combinatorial optimization techniques, specifically the GRASP meta-heuristic. The analyzes of the developed algorithm instances include the determination of the control parameters, as well as the evaluation of its performance against the different scenarios proposed. For this purpose, a distribution network with 136 buses was used, inserting a transformer and two capacitor banks, using this variation as a basis for analyzing the influence of these equipments in the electric power distribution systems. Finally, by varying the control parameters in GRASP, it's possible to better verify their influence in solving this type of problem, finding optimal patterns and limits that converge into the best solutions for minimization problems.

Keywords: Optimal allocation of OLTC Transformers and voltage regulators. Optimal allocation of capacitor banks. Power flow. GRASP metaheuristic. Electric power distribution system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relé regulador de tensão.....	16
Figura 2 – Reguladores de Tensão (RT) instalados na rede de distribuição.....	16
Figura 3 – Alocação dos bancos de capacitores em um sistema de distribuição.....	19
Figura 4 – Topologia da rede com seis barras.....	21
Figura 5 – Diagrama de Classes do modelo de dados para redes de distribuição.....	23
Figura 6 – Distribuição de valores de procedimentos aleatórios e gulosos, para um problema de maximização.....	28
Figura 7 – Topologia da rede de 136 barras.....	30
Figura 8 – Diagrama de classes de distribuição.....	31
Figura 9 - Distribuição dos valores de solução obtidos após busca local em função parâmetro α , sem alocação de capacitor na rede.....	33
Figura 10 – Distribuição dos valores de solução obtidos após busca local em função parâmetro α , para um capacitor na rede.....	35
Figura 11 – Valor médio e melhor valor da solução, para um capacitor na rede.....	36
Figura 12 – Distribuição dos valores de solução obtidos após busca local em função parâmetro α , para dois capacitores na rede.....	37
Figura 13 – Valor médio e melhor valor da solução, para dois capacitores na rede.....	38
Figura 14 – Perfis de tensão para as diversas configurações.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV.....	13
Tabela 2 – Matriz de deslocamento de fase para vários tipos de conexão.....	17
Tabela 3 - Relação de transformação para vários tipos de conexão.....	17
Tabela 4 – Lista de adjacências para a rede de seis barras.....	21
Tabela 5 – Melhores arranjos sem alocação de capacitores.....	32
Tabela 6 – Melhores arranjos com alocação de um capacitor.....	34
Tabela 7 – Melhores arranjos com alocação de dois capacitores.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	14
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2. DISPOSITIVOS REGULADORES DE TENSÃO	15
2.1. TRANSFORMADORES OLTC.....	15
2.2. AUTOTRANSFORMADORES REGULADORES DE TENSÃO (RT)	15
2.3. BANCO DE CAPACITORES.....	18
3. CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA	20
3.1. TOPOLOGIA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO E LISTA DE ADJACÊNCIAS.....	21
3.2. BUSCA EM PROFUNDIDADE.....	22
4. GRASP	25
4.1. CONSTRUÇÃO DA SOLUÇÃO INICIAL.....	26
4.2. BUSCA LOCAL	28
5. RESULTADOS	30
5.1. SEM ALOCAÇÃO DE CAPACITORES.....	32
5.2. RESULTADOS COM UM CAPACITOR INSERIDO NA REDE	34
5.3. RESULTADOS COM DOIS CAPACITORES INSTALADOS NA REDE.....	36
5.4. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO	39
6. CONCLUSÃO.....	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

A legislação do sistema elétrico brasileiro foi se formando ao longo do tempo, baseada em artigos, leis complementares, resoluções normativas, entre outras formas de aplicação jurídica, as quais surgiram de acordo com a necessidade de regulamentar, normatizar e padronizar os serviços relacionados a distribuição da energia elétrica em território nacional. Para tanto, por meio da Lei nº 9.247/1996 e do Decreto nº 2.335/1997, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), justamente com a função de regular o setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2022).

Dentre suas principais atividades, iniciadas em 1997, destacam-se: a regulação da geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica; a fiscalização, concessões e permissões relacionadas ao setor; estabelecimento de tarifas; entre outras.

Levando ao foco do presente trabalho, no âmbito da distribuição de energia elétrica, diversas resoluções foram lançadas pela ANEEL, destacando-se a Resolução 456/2000, a qual estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, e a Resolução 024/2000, a qual estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras. Entretanto, de forma a reunir as principais normativas e regulamentações que impactam diretamente na distribuição, a partir da Resolução 956/2021, estabeleceu-se os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2022), que são documentos elaborados com a participação conjunta dos agentes de distribuição e de entidades e associações do setor elétrico brasileiro (MATTAR, 2010).

O PRODIST, por sua vez, é dividido em 11 módulos, conforme está listado a seguir:

- Módulo 1 – Glossário de Termos Técnicos do PRODIST;
- Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição;
- Módulo 3 – Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica;
- Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição;
- Módulo 5 – Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura;
- Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações;
- Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição;
- Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica;

- Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos;
- Módulo 10 – Sistema de Informação Geográfica Regulatório; e
- Módulo 11 – Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares.

O módulo 8 do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição, referindo-se à qualidade do produto e a qualidade do serviço. Em relação a qualidade do produto, define seus indicadores, valores de referência e metodologia de medição. Para a qualidade do serviço, entendido como aquilo que se relaciona com a continuidade do serviço, estabelece metodologia de apuração dos indicadores de continuidade, definindo padrões e responsabilidades (ANEEL – PRODIST MÓDULO 8, 2022).

Os fenômenos associados à qualidade do produto, descritos no módulo 8 do PRODIST, são divididos entre fenômenos de regime permanente e de regime transitório. Neste, tem-se as variações de tensão de curta duração; naquele, tem-se fator de potência, harmônicos, variação de frequência, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e, destacando-se para o presente trabalho, variações de tensão em regime permanente.

A tensão, em regime permanente, deve ser acompanhada em todo o sistema de distribuição e sua conformidade é referida pela comparação do valor de tensão obtido, através de medição adequada e no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão nominal ou contratado para aquele ponto de conexão. Após a leitura e comparação, classifica-se a tensão em três categoriais: adequada; precária; ou crítica. Tal classificação baseia-se no distanciamento do valor lido em relação ao valor de referência.

Com relação a tensão contratada junto à distribuidora, o PRODIST dispõe que para os usuários com conexões em tensão nominal igual ou superior a 2,3 kV, a tensão deve situar-se de 93% a 105% da tensão nominal de operação (referência), naquele determinado ponto de conexão. Sendo assim, com base na classificação supra citada e nos valores estipulados, tem-se as faixas definidas conforme a Tabela 1.

Os indicadores individuais de tensão em regime permanente são: a Duração Relativa de Transgressão (DRP) e a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC). Estes indicadores estão associados a um mês civil. A composição destes é baseada através de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, totalizando 168 horas de leitura. Desta forma, após os devidos cálculos, tem-se

que os limites de 3% para a DRP e 0,5% para a DRC. A distribuidora deve compensar os titulares das unidades consumidoras que, conforme as medições, estiverem submetidos a tensões de atendimento com DRP ou DRC, superiores aos limites estipulados. O valor da compensação deve ser creditado na fatura emitida no prazo máximo de 2 meses subsequentes ao mês de referência para as leituras em que se constatou a violação (ANEEL – PRODIST MÓDULO 8, 2022).

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TL$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TL$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $T > 1,05TR$

Fonte: PRODIST – módulo 8

Logo, do ponto de vista do consumidor, a qualidade de energia reside no recebimento da tensão o mais estável possível e sem perturbações, de modo que este fornecimento prolongue a vida útil dos equipamentos elétricos conforme suas especificações técnicas. De acordo com os requisitos técnicos, descritos nos contratos de concessão, as concessionárias distribuidoras de energia elétrica têm, por obrigação, segui-los, sendo regulamentados pelos índices de qualidade definidos pela ANEEL. O não cumprimento de tais requisitos, vulnerabiliza a concessionária a aplicação de multas.

Portanto, para que se mantenham os níveis de tensão nos limites, para a distribuição adequada, há alguns equipamentos que, quando instalados na rede de distribuição, auxiliam na correção do perfil de tensão e manutenção dos indicadores, de modo a fornecer energia elétrica com qualidade aos consumidores finais. Estes equipamentos são os transformadores com comutação de tap em carga (OLTC), autotransformadores de tensão e os bancos de capacitores (BC). A alocação otimizada destes equipamentos, por sua vez, tem como objetivo a minimização das perdas elétricas mantendo a magnitude de tensão sob os limites estipulados no módulo 8 do PRODIST.

1.1. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Neste trabalho de graduação, tem-se como objetivo principal a alocação otimizada de transformadores com OLTC e reguladores de tensão e banco de capacitores na rede de distribuição, para minimizar as perdas elétricas mantendo a magnitude de tensão sob os limites operacionais em todas as barras. Para isso deve-se desenvolver um algoritmo que resolva o fluxo de potência que considere os dispositivos de controle de tensão e reativos (VVC), os quais influenciam na qualidade de energia entregue aos consumidores finais no sistema elétrico de distribuição.

As propostas de solução devem ser geradas por técnicas de otimização combinatória, particularmente através da metaheurística GRASP. As análises de testes utilizando a implementação desta metaheurística devem ser efetuadas para alimentadores de distribuição típicos da literatura especializada e o seu desempenho computacional deve ser criteriosamente comparado, determinando os parâmetros de controle, sistema de codificação e avaliação da função objetivo que sejam eficientes para a solução do problema em estudo.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Referente à estrutura deste trabalho, no capítulo 2, serão abordados os dispositivos reguladores de tensão, que são aplicados ao presente trabalho, dentre os quais destacam-se os transformadores OLTC, os autotransformadores reguladores de tensão e os bancos de capacitores. No capítulo 3, explica-se sobre o fluxo de potência e seu cálculo e, também, a aplicação de algoritmos de busca em profundidade, fomentando a base para o desenvolvimento da pesquisa. O capítulo 4 traz uma revisão bibliográfica sobre a metaheurística GRASP e suas fases: construção da solução inicial e busca local. Por fim, nos capítulos 5 e 6, apresentam-se os resultados, discussão e conclusão daquilo que foi abordado.

2. DISPOSITIVOS REGULADORES DE TENSÃO

2.1. TRANSFORMADORES OLTC

Transformadores com OLTC (do inglês *On Load Tap Changer*) são usados para contornar as flutuações de tensão conforme o carregamento da rede de distribuição. Tais dispositivos, por regularem a magnitude de tensão, são importantes no sistema de potência ajudando a prevenir sobre- e sub-tensão não admitidas pelos consumidores e agentes regulatórios de energia elétrica. Sua função é ajustar o perfil de tensão entre dois circuitos, através do ajuste da quantidade de espiras que, por sua vez, alteram o nível de regulação de tensão, permitindo que se controle o nível de tensão no secundário do transformador. Podem ser encontrados com a função de abaixar o nível de tensão de alta para média tensão, ou também de média para baixa (no caso de transformadores de distribuição), obtendo uma rede secundária com magnitudes de tensão adequadas para os consumidores finais (residenciais e/ou comerciais).

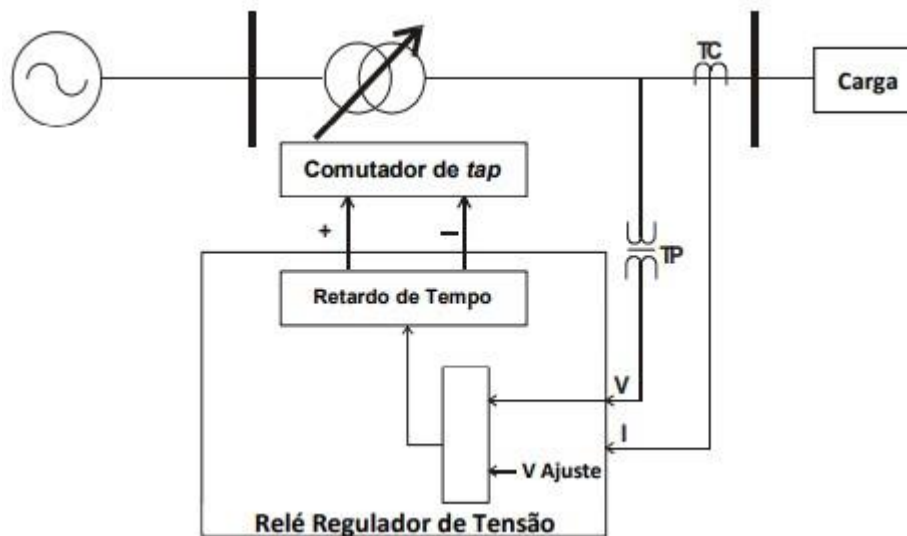
Por meio de uma chave rotatória, com esquema de passo frente/reverso, o tap varia a relação entre o número de espiras dos enrolamentos do lado primário e secundário do transformador. Este controle se dá através de um relé regulador de tensão, o qual monitora a tensão do lado do secundário do transformador e comanda as operações de comutação, conforme configurações pré-programadas, de tal forma a manter constante e mais próximo da referência, o nível de tensão (PADILHA, 2010). A comutação é operada por motores que respondem ao comando do relé, de modo que ajustam a tensão dentro dos níveis especificados.

Um arranjo do controle de tensão é apresentado na Figura 1.

2.2. AUTOTRANSFORMADORES REGULADORES DE TENSÃO (RT)

Os autotransformadores regulares de tensão (RT) são autotransformadores que possuem ajuste automático de tap, os quais permitem elevar ou reduzir o nível de tensão no secundário, mantendo a tensão dentro da faixa de valores adequada para os consumidores. Tal como o transformador da subestação com OLTC, este ajuste é realizado por uma chave rotatória.

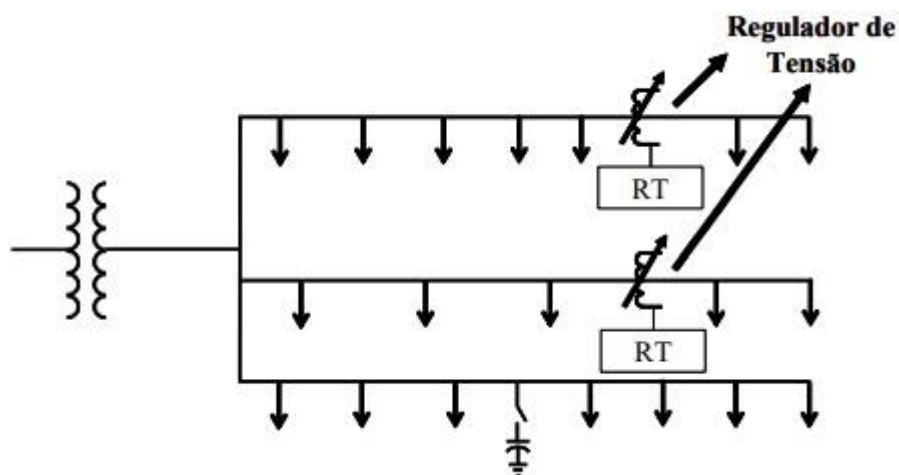
Figura 1 – Relé regulador de tensão



Fonte: Padilha (2010)

Tais equipamentos são normalmente instalados em pontos entre alimentadores em que a tensão não é possível de ser regulada pela subestação, onde através da compensação entre lado primário e secundário, mantem-se a tensão dentro dos limites aceitáveis. A figura 2, a seguir, exemplifica a instalação de RTs na rede de distribuição.

Figura 2 – Reguladores de tensão (RT) instalados na rede de distribuição



Fonte: Padilha (2010)

É importante ressaltar que a alocação dos RTs, fruto do estudo atual, influenciam enormemente na qualidade dos serviços de manutenção dos níveis de tensão da energia elétrica na rede de distribuição.

No cálculo do fluxo de potência, alguns dos valores de entrada são a injeção de potência, S_i , dos equipamentos em derivação, e um modelo, $[M_i]_{6 \times 6}$, representando a parte dos equipamentos em série. Através dos transformadores flui energia do terminal primário para o secundário caracterizando-os como equipamentos conectados em série cujo modelo pode ser representado por (01), conforme (LEITE; MANTOVANI, 2014).

$$[M_i]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} [A_i]_{3 \times 3} & [\bar{B}_i]_{3 \times 3} \\ [\bar{C}_i]_{3 \times 3} & [D_i]_{3 \times 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n^{-1}[\Phi]_{3 \times 3}^T & [\bar{Y}_m]_{3 \times 3} \\ -[\bar{Z}_D]_{3 \times 3} & K_n^{-1}[\Phi]_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (01)$$

As matrizes $[\bar{Y}_m]_{3 \times 3}$ e $[\bar{Z}_D]_{3 \times 3}$ representam matrizes diagonais das admitâncias de magnetização e impedâncias de dispersão. Assim, K_n^{-1} é a relação de transformação e $[\Phi]_{3 \times 3}$ a matriz de deslocamento angular para as diferentes conexões existentes no transformador, resultantes da análise de incidência nodal nos terminais do transformador. Na Tabela 2 são apresentados os valores de cada elemento da matriz de deslocamento de fase para os principais tipos de conexão dos transformadores. Na Tabela 3 são resumidos os valores de K_n para os principais tipos de conexão do transformador de distribuição, considerando que V_{PL} é a tensão linha e V_{SL} é a tensão de fase.

Tabela 2 - Matriz de deslocamento de fase para vários tipos de conexão.

Conexão	φ_{11}	φ_{12}	φ_{13}	φ_{21}	φ_{22}	φ_{23}	φ_{31}	φ_{32}	φ_{33}
Yg-Yg	1	0	0	0	1	0	0	0	1
Yg-Δ	1	0	-1	-1	1	0	0	-1	1
Δ-Yg	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1
Δ-Δ	1	0	0	0	1	0	0	0	1

Fonte: Leite e Mantovani (2014)

Tabela 3 - Relação de transformação para vários tipos de conexão.

Conexão	K_n	Conexão	K_n
Yg-Yg	V_{PL}/V_{SL}	Δ-Yg	$\sqrt{3}V_{PL}/V_{SL}$
Yg-Δ	$V_{PL}/\sqrt{3}V_{SL}$	Δ-Δ	V_{PL}/V_{SL}

Fonte: Leite e Mantovani (2014)

De forma a melhor exemplificar, os reguladores de tensão funcionam como autotransformadores que possuem uma bobina primária que tem uma conexão em derivação com as bobinas do secundário. Um bom exemplo é um autotransformador com bobinas 1:1. O primário possui N espiras e o secundário possui bobinas com vários taps com espiras adicionais, as quais, conforme a variação de tensão, o regulador comuta automaticamente para taps com mais ou menos espiras, de modo a estabilizar a tensão dentro dos padrões nominais de tensão pré-definidos pela ANEEL.

É importante ressaltar que os transformadores com comutação OLTC são, geralmente, utilizados na subestação e são responsáveis por abaixar a tensão para níveis de distribuição. Já os autotransformadores reguladores de tensão são utilizados em qualquer ponto da rede. No caso, este trabalho visa alocar, de maneira ótima, tais equipamentos, de forma a obter a melhor correção no perfil de tensão e manutenção deste, nos limites de tensão anteriormente citados.

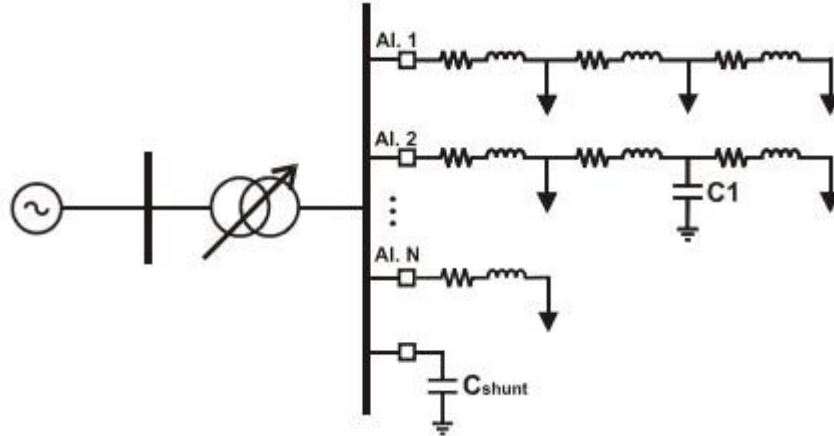
2.3. BANCO DE CAPACITORES

Por se tratarem de equipamentos de custo acessível, fácil instalação, pouca manutenção e ocasionar perdas menores quando comparados aos transformadores, os capacitores são demasiadamente utilizados nos sistemas de distribuição. Em geral, são instalados em conjuntos, uma vez que sua construção se dá com pequenas capacidades (por motivos econômicos) e, quando combinados em conjuntos, proveem as demandas operacionais, recebendo o nome de banco de capacitores.

Os capacitores, conforme a tensão aplicada em seus terminais, carregam e descarregam rapidamente, em ciclos rápidos. Desta forma, dentre suas diversas funções estão a redução na queda de tensão nas linhas de distribuição e a correção do fator de potência. Logo, são muito utilizados justamente para garantir que os limites estabelecidos pela ANEEL sejam respeitados, evitando pagamentos adicionais na fatura da energia elétrica. Portanto, é de suma importância que sua alocação seja bem estudada e analisada, uma vez que alocações errôneas podem acarretar diversos problemas, como sobretensões e maiores perdas nas linhas. Nos sistemas de distribuição, o emprego dos bancos de capacitores pode ocorrer tanto na barra da

subestação (C_{shunt}) quanto ao longo dos alimentadores, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Alocação dos bancos de capacitores em um sistema de distribuição



Fonte: Padilha (2010)

Os bancos de capacitores podem ser instalados em série ou paralelo. Quando em série com a carga, funcionam como reguladores de tensão comandados pela corrente e compensando a reatância da linha; quando em paralelo, compensam a potência reativa elevando a tensão no alimentador e ajustando o perfil de tensão.

No presente trabalho assumem-se os bancos de capacitores conectados em paralelo, ou em derivação. Assim, na análise de fluxo de potência, a expressão (02) representa a injeção de potência, $S_i^p(s)$, do banco de capacitores que está definida para cada fase p e controlado pela variável s de chaveamento, como definido em LEITE; MANTOVANI (2014).

$$S_i^p(s) = 0 - \frac{jsQ}{3S_{MAX}}, \quad p = a, b, c \quad (02)$$

3. CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA

A rede de distribuição é representada por ramos e barras, os primeiros constituem equipamentos elétricos conectados em série como linhas, reguladores de tensão e chaves, similarmente, as barras são equipamentos elétricos em derivação como cargas, capacitores e geradores. Nesta representação, o transformador de distribuição também está em série e conecta a rede primária à secundária causando, frequentemente, deslocamentos nos ângulos de fase devido ao tipo de conexão dos seus terminais.

No cálculo do fluxo de potência, as barras e ramos são primeiramente organizados seguindo a topologia da rede de distribuição onde os elementos que são mais periféricos possuem uma maior numeração, i , que os elementos mais próximos da subestação, assim o elemento mais periférico possui um valor de numeração igual à n_{BR} . Além disso, os valores de entrada são a injeção de potência, $\dot{S}_i$, dos equipamentos em derivação, e um modelo, M_i , representando a parte dos equipamentos em série. Após os cálculos do fluxo de potência, obtêm-se a tensão das barras, $\dot{V}_i$, e as correntes dos ramos, j_i . Para um algoritmo iterativo de varredura do tipo *backward/forward* (LEITE & MANTOVANI, 2015) então a tensão na barra da subestação é igual à tensão de operação da rede de distribuição.

$$\begin{bmatrix} [j_i]_{3 \times 1} \\ [\dot{V}_i]_{3 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_i]_{3 \times 3} & [\bar{B}_i]_{3 \times 3} \\ [\bar{C}_i]_{3 \times 3} & [D_i]_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum [j_d]_{3 \times 1} + \left[\left(\frac{\dot{S}_i}{\dot{V}_i} \right)^* \right]_{3 \times 1} \\ [\dot{V}_u]_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (03)$$

A equação (03) é uma representação matricial compacta com todas as variáveis de entrada e saída do fluxo de potência trifásico. O modelo do ramo, $[M_i]_{6 \times 6}$, corresponde à justaposição das matrizes: $[A_i]_{3 \times 3}$ e $[D_i]_{3 \times 3}$ adimensionais, $[\bar{B}_i]_{3 \times 3}$ de admitância e $[\bar{C}_i]_{3 \times 3}$ de impedância. No procedimento de varredura *backward*, o algoritmo calcula as correntes nos ramos, $[j_i]_{3 \times 1}$, usando valores conhecidos das correntes adjacentes à jusante que são identificadas pelo índice d e, na varredura *forward*, o algoritmo calcula as tensões nas barras, $[\dot{V}_i]_{3 \times 1}$, usando valores conhecidos das tensões adjacentes à montante que são identificadas pelo índice u .

Usualmente, armazena-se a informação da topologia das redes de distribuição em uma lista de adjacências, em que as barras e ramos (linhas) são organizadas sistematicamente. Desta forma, a varredura *forward* percorre a lista do primeiro elemento em direção ao último. Já a varredura *backward* percorre o caminho reverso. A seguir, na Figura 4, tem-se um exemplo de topologia da rede com seis barras.

Diagrama de um sistema de energia elétrica com as seguintes características:

- Barras:** #0, #1, #2, #3, #4, #5, #6, #7.
- Ramos:** ramos[1], ramos[2], ramos[3], ramos[4], ramos[5].
- Fontes:** SE (Fonte Estática) conectada à barra #0.
- Cargas:** li (carga indutiva) conectada à barra #2.
- Parâmetros:**
 - $V_{SE} = 13,8 \text{ kV de linha}$
 - V_u (tensão na barra #1)
 - V_i (tensão na barra #2)
 - J_u (corrente na barra #1)
 - J_i (corrente na barra #2)
- Outros elementos:** sw1 (interruptor) entre as barras #0 e #1; barraDe (barra de distribuição) na barra #1; barraPara (barra para distribuição) na barra #2; ramoMontante (ramo montante) entre as barras #0 e #1; ramo de referência (ramo de referência) entre as barras #1 e #2.

Para este exemplo, temos a Tabela 4, a seguir, em que a lista de adjacências é determinada:

i	barras[i]	Backward ↑	J_i	Forward ↓	V_i
1	#1		$J_1 = J_2 + I_{\#1}$		$V_{\#1} = V_{\#0} - Z_1 * J_1$
2	#2		$J_2 = J_6 + J_3 + J_7 + I_{\#2}$		$V_{\#2} = V_{\#1} - Z_2 * J_2$
3	#7		$J_7 = I_{\#7}$		$V_{\#7} = V_{\#2} - Z_7 * J_7$
4	#3		$J_3 = I_{\#3}$		$V_{\#3} = V_{\#2} - Z_3 * J_3$
5	#6		$J_6 = I_{\#6}$		$V_{\#6} = V_{\#2} - Z_6 * J_6$

21

A primeira coluna indica a ordem de organização de cada elemento. A coluna 'barras[i]' é responsável pela identificação de cada barra. Na varredura *forward*, inicia-se o valor em $i=1$, incrementando-o de uma unidade até $i=6$, permitindo que as tensões nas barras sejam atualizadas, uma vez que as tensões à montante são sempre calculadas primeiro. Na varredura *backward*, inicia-se o valor em $i=6$, decrementando-o de uma unidade até $i=1$, permitindo que o fluxo de corrente seja atualizado, haja vista que as correntes à jusante são sempre calculadas primeiro.

3.2. BUSCA EM PROFUNDIDADE

Partindo para definições matemáticas, representa-se a topologia das redes de distribuição através de grafos, em que as barras correspondem ao conjunto de vértices ($\mathbf{v}$) e os ramos, ao conjunto de arestas ($\mathbf{e}$). Sendo assim, a rede de distribuição pode ser representada por um grafo $G(\mathbf{v}, \mathbf{e})$, onde sua travessia ocorre por algoritmos de busca em profundidade (*deep first search*).

Neste tipo de algoritmo, cada vértice v é visitado e, na sequência, cada vértice adjacente a v , é visitado. Se um vértice v não tem adjacentes ou todos seus vértices adjacentes já foram visitados, retorna-se ao vértice predecessor de v . Conclui-se a busca quando o processo de visita e retorno retroceder até o primeiro vértice de onde a busca iniciou. No caso de haver vértices não visitados, a busca segue, reiniciando em um dos vértices não visitados (DROZDEK, 2012). No Algoritmo 1, há uma exemplificação, na forma de pseudocódigo, do método explicado anteriormente.

Algoritmo 1 – Pseudocódigo do método de busca em profundidade.

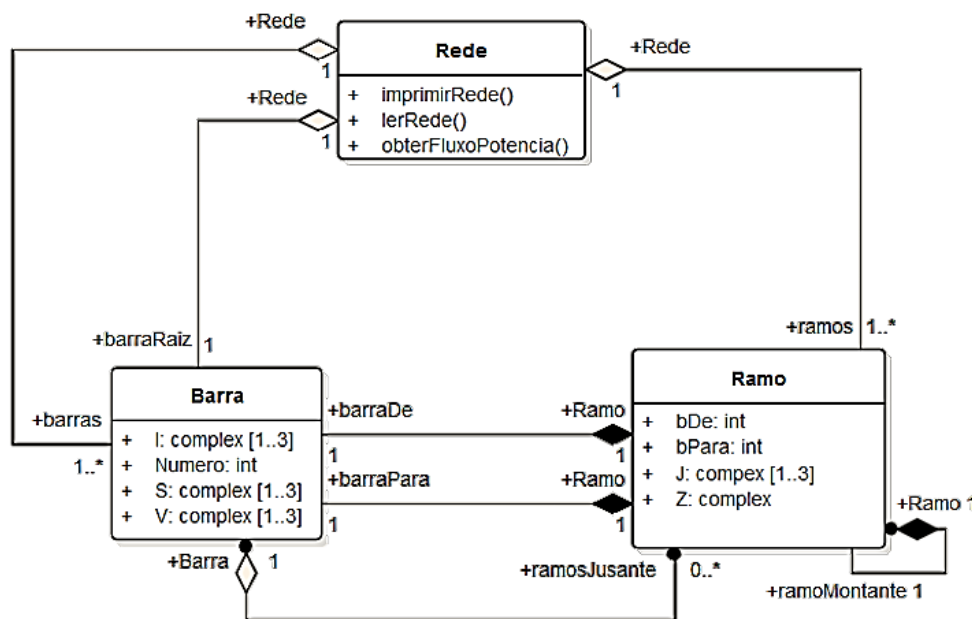
1- BEP(v)	10- BuscaEmProfundidade(v)
2- num(v) = i+1;	11- para todos vértices v
3- para todos vértices u adjacentes à v	12- num(v) = 0
4- se num(u) é igual a 0	13- fim para
5- Adicionar a aresta (uv) em arestas	14- arestas = vazio
6- BEP(u)	15- i = 1
7- fim se	16- enquanto existir v tal que num(v) é 0
8- fim para	17- BEP(v)
9- fim BEP()	18- fim enquanto
	19- fim BuscaEmProfundidade()

Fonte: Drozdek (2012)

Através deste algoritmo, tem-se a garantia da criação de uma árvore, a qual inclui e se estende por todos os vértices do grafo original. Neste caso, não há a inclusão, na árvore resultante, de nenhuma aresta que conduza do vértice em análise para um vértice previamente analisado. A adição de arestas é condicionada ao atendimento da condição descrita na linha 4: “se $num(u)$ é igual a 0”, ou seja, se o vértice u alcançável através do vértice v não foi analisado. Desta forma, têm-se arestas do grafo original que não aparecem na árvore resultante.

Este algoritmo recursivo tem sua implementação facilitada quando os dados das redes de distribuição são modelados seguindo os conceitos de classes e relações definidos pela linguagem de modelagem unificada UML (do inglês, *Unified Modeling Language*). Conforme a Figura 5, a seguir, está exemplificado o diagrama de classes que define um modelo de dados da rede de distribuição.

Figura 5 - Diagrama de Classes do modelo de dados para redes de distribuição



Fonte: Adaptado de Ferreira (2021)

Partindo do modelo de dados, tem-se uma outra forma para melhor compreender o processo de busca em profundidade. Na Figura 5, verifica-se a existência de três classes: *Rede*, *Barra* e *Ramo*. Uma rede de distribuição está agregada a um número finito de barras e ramos, em que um ramo é composto por uma barra de origem (*barraDe*) e outra de destino (*barraPara*); e uma barra é composta por nenhum ou um número finito

de ramos à jusante (*ramosJusante*). Na Figura 4, apontando para o ramos[2], tem-se a *barraDe*=barras[1] e *barraPara*=barras[2]. Os ramos à jusante vem do vetor em barras[2] que é igual à *ramosJusante* = {ramos[3], ramos[4] e ramos[5]}. A utilização do modelo de dados da rede de distribuição em UML facilita a implementação do algoritmo de busca em profundidade no cálculo das grandezas elétricas, conforme mostrado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2 – Pseudocódigo de fluxo de potência com busca em profundidade.

```

1- Início FPcBEP(rede)
2-   Enquanto erro menor que a tolerância Faça //Critério de parada do FP
3-     Para Cada ramoJusante de rede.barraRaiz Faça //FP partindo da SE
4-       BEP(ramosJusante)
5-     Fim Para Cada
6-   Fim Enquanto

7-   Início BEP(ramo) //algoritmo de busca em profundidade
8-     ramo.barraPara.V= ramo.barraDe.V-ramo.Z*ramo.J
9-     ramo.barraPara.I=( ramo.barraPara.S/ramo.barraPara.V)*
10-    ramo.J=ramo.I
11-    Para Cada ramoJusante de ramo.barraPara Faça
12-      BEP(ramosJusante) //recursão
13-      ramo.J=ramo.J+ramoJusante.J
14-    Fim Para cada
15-  Fim BEP
16-  imprimir(rede) //gera arquivo de saída de dados
17- Fim FPcBEP

```

Fonte: Próprio autor

Para o cálculo do fluxo de potência, o algoritmo *BEP(.)* faz a atualização da tensão na barra no início da sequência de cálculos e, somente faz a atualização do fluxo de corrente nos ramos após a função *BEP(.)* ser chamada recursivamente. Devido à topologia radial da rede, ao partir-se da barra da subestação (barra raiz), tem-se a garantia de que toda a rede é percorrida no cálculo do fluxo de potência.

4. GRASP

Metaheurísticas são procedimentos de busca com capacidade de escapar de ótimos locais, focando na eficiência e maior exploração do espaço de busca, destinados a resolver problemas de otimização. Dentre as principais características deste procedimento, têm-se: a utilização de estratégias para guiar o processo de busca; a exploração, de maneira eficiente, do espaço de busca, com o objetivo de encontrar uma solução de boa qualidade próxima ao ponto atual; e a utilização de técnicas de buscas locais.

O GRASP (do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) é uma metaheurística multipartida para otimização combinatória, constituída pelas fases construtiva gulosa aleatória e de busca local, consistindo de múltiplas aplicações de busca local, cada qual iniciando de uma solução diferente. As soluções iniciais são geradas por algum tipo de construção randômica gulosa. Em outras palavras, sua aplicação consiste em criar uma solução inicial e depois efetuar uma busca local para melhorar a qualidade da solução. Outra característica que atrai para a utilização do GRASP é a facilidade de ser implementado, uma vez que poucos parâmetros precisam ser definidos e ajustados (RESENDE & RIBEIRO, 2019). Qualquer uma das duas fases pode ser implementada de forma independente e melhor desenvolvida a fim de construir propostas de soluções mais eficazes, seja na técnica de intensificação ou de pós-otimização.

Um algoritmo guloso é aquele que, a cada passo do algoritmo, escolhe o candidato com o melhor impacto para a função avaliada, isto é, retorna o melhor resultado na solução do problema de otimização. Devido ao conceito de construção gulosa aleatória, a construção de soluções viáveis é facilitada. Ao utilizar a heurística construtiva aleatorizada em conjunto com a busca local, tem-se a combinação de mecanismos de diversificação e intensificação.

Em resumo, GRASP é uma metaheurística em que, na etapa de construção, se gera uma solução inicial através de heurística construtiva gulosa aleatorizada; na etapa de busca local, investiga-se a vizinhança da solução inicial gerada. Ambas as etapas são repetidas por um número máximo de iterações (sendo este um parâmetro do GRASP), até que, ao final do processo, retorna-se a melhor solução obtida na busca. No Algoritmo 3, descreve-se um pseudocódigo básico do GRASP, destacando suas duas fases.

Algoritmo 3 – Pseudocódigo básico do GRASP.

```
1-Procedimento GRASP()  
2-   Para (k=1,..., até MAX_ITER) Faça  
3-       solução ← construção  
4-       Se solução não for factível Então  
5-           solução ← ajuste(solução)  
6-       Fim Se  
7-       Solução ← busca local(solução)  
8-       Atualiza_solução(solução, melhor_solução)  
9-   Fim Para  
10-  Retorna Melhor_solução  
11-Fim GRASP
```

Fonte: Resende e Ribeiro (2019)

4.1. CONSTRUÇÃO DA SOLUÇÃO INICIAL

Nesta fase, são geradas soluções iniciais elemento a elemento, através de algum tipo de construção. Todos os elementos candidatos a solução são avaliados por uma função, a qual mede o benefício da inserção deste elemento para a construção da solução, criando-se uma lista de candidatos (LC). A mensuração deste benefício para a solução é dita míope devido a imprecisão de como a inserção de tal elemento pode colaborar para a obtenção de uma solução de melhor qualidade. A partir da LC, é construída a lista restrita de candidatos RCL (do inglês, *Restricted Candidate List*), sendo uma lista contendo os elementos de melhor valor na solução, em que a quantidade de elementos é definida através de um parâmetro absoluto, $\alpha \in (0, 1)$.

$$cardinalidadeRCL = \alpha * cardinalidadeLC \quad (04)$$

Em um problema de minimização, o valor $\alpha=1$ leva a uma construção puramente gulosa, uma vez que coloca todos os elementos da LC na RCL para os quais o custo associado à sua inclusão na solução, é mínimo. Por outro lado, o valor $\alpha=0$ leva a uma construção aleatória, uma vez que coloca todos os elementos possíveis da LC estão na RCL. De tal forma que, valores de $0 < \alpha < 1$ misturam gulosidade e aleatoriedade, tornando o GRASP semi-guloso. Repete-se a construção até não haver mais candidatos, o que pode ser observado através do pseudocódigo no Algoritmo 4.

Algoritmo 4 – Pseudocódigo da fase de construção do GRASP.

```
1-Procedimento Construção (Função_gulosa(.),  $\alpha$ ,  $s_0$ )
2-    $s_0 \leftarrow \emptyset$  // sendo  $s_0$  a solução inicial
3-   Inicializar o conjunto LC de candidatos
4-   Enquanto  $LC \neq \emptyset$  Faça
5-        $g(c)_{min} = \min\{g(c)|c \in LC\}$ 
6-        $g(c)_{max} = \max\{g(c)|c \in LC\}$ 
7-        $RLC = \{t \in LC | g(t) \geq g(c)_{min} + \alpha(g(c)_{max} - g(c)_{min})\}$ 
8-        $\{c\} \leftarrow \text{Escolha\_aleatória}(RLC)$ 
9-        $s_0 \leftarrow s_0 \cup \{c\}$ 
10-      Atualizar o conjunto LC de candidatos
11-      Reavaliar o custo do incremento  $g(c) \forall c \in LC$ 
12-   Fim Enquanto
13-   Retorna  $s_0$ 
14-Fim Construção
```

Fonte: Resende e Ribeiro (2019)

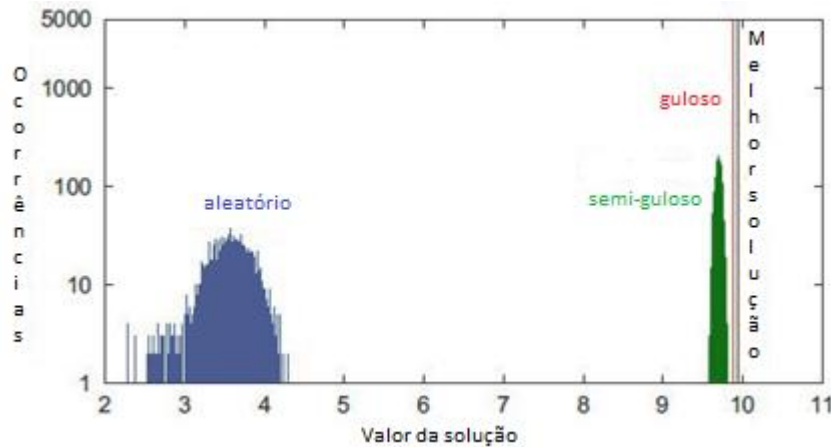
A partir deste algoritmo, fica evidente que a solução inicial do problema é um conjunto vazio e o parâmetro α determina o tamanho da lista de candidatos. Assim, novos elementos são agregados a solução inicial, sendo avaliados, por uma função gulosa, de acordo com seu benefício para a solução. Os melhores elementos formam uma lista restrita, cuja quantidade é definida conforme o valor de α , entre 0 e 1. Destes, um elemento é escolhido aleatoriamente, terminando com uma solução aceitável ao problema, a partir da qual será analisada a vizinhança na próxima fase do GRASP.

O oposto se aplica quando tratamos de um problema de maximização. O valor de $\alpha=1$ leva a construção aleatória, uma vez que coloca todos os elementos possíveis da LC na RCL. Por outro lado, o valor $\alpha=0$ leva a uma construção puramente gulosa, uma vez que coloca todos os elementos da LC na RCL.

A Figura 6 apresenta a distribuição de valores de solução produzidos por uma metaheurística multipartida aleatória e por outra metaheurística semi-gulosa, com parâmetro $\alpha=0,85$, em um problema de maximização:

- Soluções semi-gulosas se aproximam mais da melhor solução do que soluções aleatórias;
- Há mais variação na produção de valores em um método aleatório do que em um método semi-guloso;
- A solução puramente gulosa, em média, é melhor que ambas as soluções (aleatória e semi-gulosa), porém possui a menor diversidade de soluções.

Figura 6 – Distribuição de valores de procedimentos aleatórios e gulosos, para um problema de maximização.



Fonte: Resende e Ribeiro (2019)

4.2. BUSCA LOCAL

Depois de terminada a fase de construção, a busca local é iniciada para refinar a solução encontrada aplicando um método de busca local para fazer pequenas alterações na solução corrente. As soluções geradas por uma construção aleatória gulosa não são, necessariamente, ótimas, sendo a busca local uma fase onde pode-se melhorar a solução construída.

Um algoritmo de busca local funciona de forma iterativa, substituindo sucessivamente a solução atual por uma solução melhor na vizinhança da solução atual, isto é, a solução geral é atualizada sempre que a fase de busca local encontra uma solução melhor que todas as outras já encontradas. Tal busca se encerra quando nenhuma solução melhor é encontrada na vizinhança. Para um problema de minimização, entende-se como melhor solução aquela cujo custo é menor, por exemplo.

A eficácia de um procedimento de busca local depende de vários aspectos, tais como a estrutura da vizinhança, a técnica de busca na vizinhança, a avaliação rápida da função de custo dos vizinhos e da própria solução inicial. A fase de construção desempenha um papel muito importante no que diz respeito a este último aspecto, construindo soluções iniciais de alta qualidade para a busca local. Quanto melhor for a qualidade da solução gerada na etapa de construção, maior será a velocidade para encontrar um ótimo local pela fase de busca local.

Conforme o pseudocódigo no Algoritmo 5, fica evidente que a busca local se utiliza de movimentos sucessivos para substituir a solução atual por outra solução visitada que seja melhor.

Algoritmo 5 – Pseudocódigo da fase de busca local do GRASP.

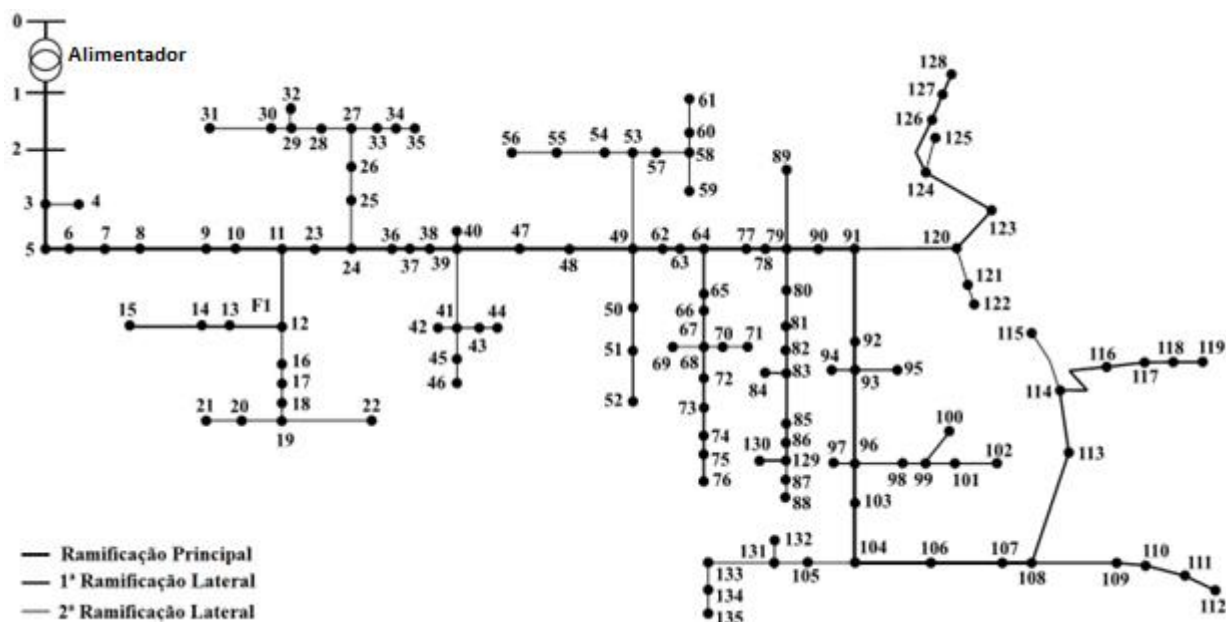
```
1-Procedimento Busca_Local( $F, N, s$ )  
2-    $V \leftarrow \{s' \in N(s) | f(s') < f(s)\}$   
3-   Enquanto  $|V| > 0$  Faça  
4-       Selecionar  $s' \in V$   
5-        $s \leftarrow s'$   
6-        $V \leftarrow \{s' \in N(s) | f(s') < f(s)\}$   
7-   Fim Enquanto  
8-   Retorna  $s$   
9-Fim Busca_Local
```

Fonte: Resende e Ribeiro (2019)

5. RESULTADOS

De forma a encontrar uma boa solução, próxima à ótima, para a alocação dos dispositivos de controle de tensão e reativos, implementou-se um algoritmo GRASP, foi escolhida uma rede de 136 barras, considerando-a alimentada por um transformador de 13,8kV de linha com topologia conforme a Figura 7.

Figura 7 – Topologia da rede de 136 barras



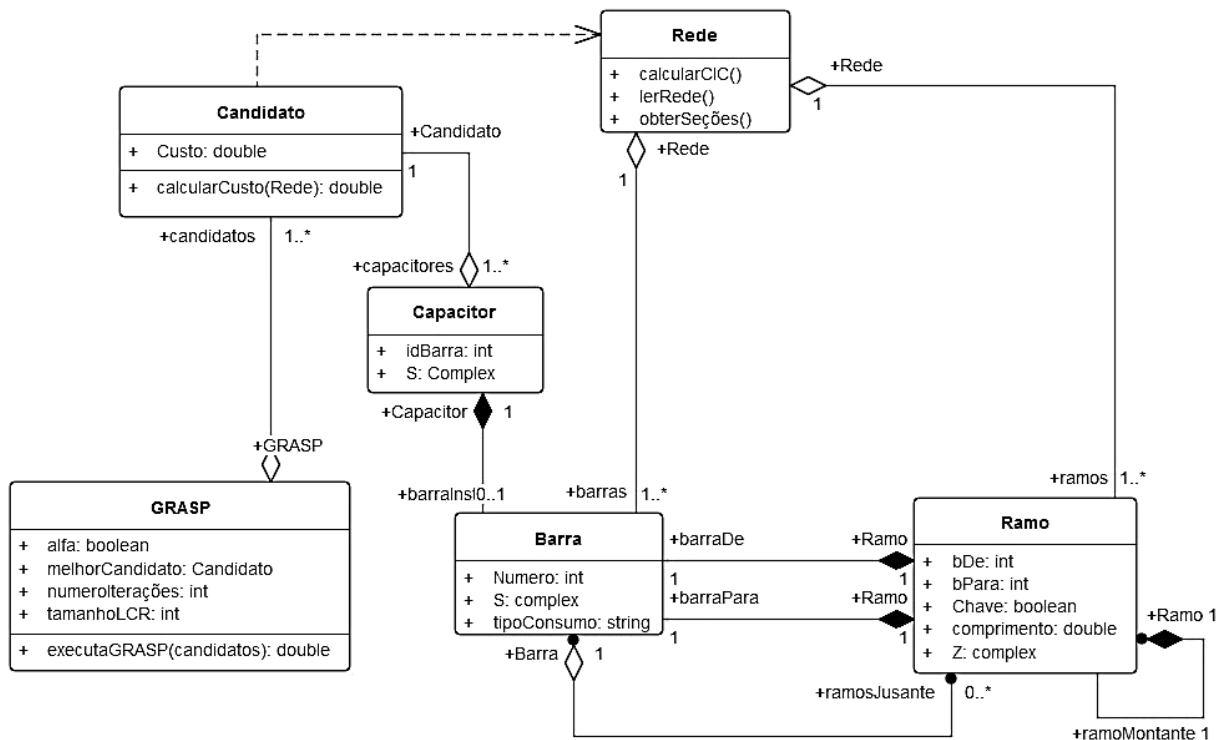
Fonte: LAPSEE (2020)

Na implementação do algoritmo para solução do problema, utilizou-se o software Microsoft Visual Studio®. Nele, foi possível a implementação de toda a programação e desenvolvimento da análise das instâncias do problema em questão, em linguagem C#, com máquina de processador Intel Celeron 4205U e 4 GB de RAM. Além disso, utilizou-se a descrição em diagramas de classe, como forma de visualizar todos os passos necessários para desenvolver na linguagem de programação, conforme apresentado na Figura 8.

Para os dispositivos de controle de tensão e reativos descritos no Capítulo 2, se considerou a instalação de um transformador atuando como regulador de tensão e dois bancos de capacitores ao longo da rede de distribuição. Os melhores resultados considerados foram aqueles que apresentaram o menor custo das perdas para uma faixa

de tensão de operação, uma vez que o problema em questão se trata de minimização das perdas de energia na rede.

Figura 8 – Diagrama de classes de distribuição



Fonte: Próprio autor

Inicialmente, após a leitura dos dados da rede, sem considerar nenhum equipamento controlador de tensão e reativo instalado, realizou-se o cálculo do fluxo de potência, para obtenção das correntes e tensões. Desta forma, estes valores serviram de base comparativa para a busca de melhorar o perfil de tensão da rede. Após, foram alocados os equipamentos.

Durante a execução, o algoritmo varre todas as barras, verificando se a inserção dos equipamentos traz ou não benefícios ao perfil de tensão da rede, através da função de custo. Ou seja, quanto menor o valor das perdas na rede, mais eficaz é a presença do equipamento em determinada barra. A varredura completa foi realizada utilizando-se a busca em profundidade. Após, variaram-se as barras nas quais os equipamentos podem ser inseridos, bem como a relação de transformação para o transformador e a capacidade do banco de capacitores. Conforme a execução do GRASP, a partir da fase de construção, foi obtido a solução com os equipamentos presentes na rede e, a partir

disso, partindo para a busca local, variaram-se suas localizações na vizinhança, em busca de melhorar a solução.

5.1. SEM ALOCAÇÃO DE CAPACITORES

Como forma de análise dos resultados, gerou-se 1000 soluções construídas através do algoritmo semiguloso, em função do parâmetro α . Ou seja, para cada valor de α , definido entre 0 e 1,0, 1000 execuções do GRASP foram realizadas, cada qual com 10 iterações. Destas, é possível elencar as melhores soluções obtidas, sendo estas definidas como as de menores perdas totais. A Tabela 5, resume as dez melhores soluções encontradas.

Tabela 5 – Melhores arranjos sem alocação de capacitores

Barra de alocação do regulador de tensão	Relação de transformação	Perdas (kW)
24	0,925957569	372,6
36	0,927085112	373,8
37	0,927246579	373,9
38	0,927408995	374,1
39	0,928511388	374,9
47	0,928803731	375,2
49	0,911259589	376,2
62	0,911379739	376,3
48	0,93054919	376,4
78	0,913301866	377,6

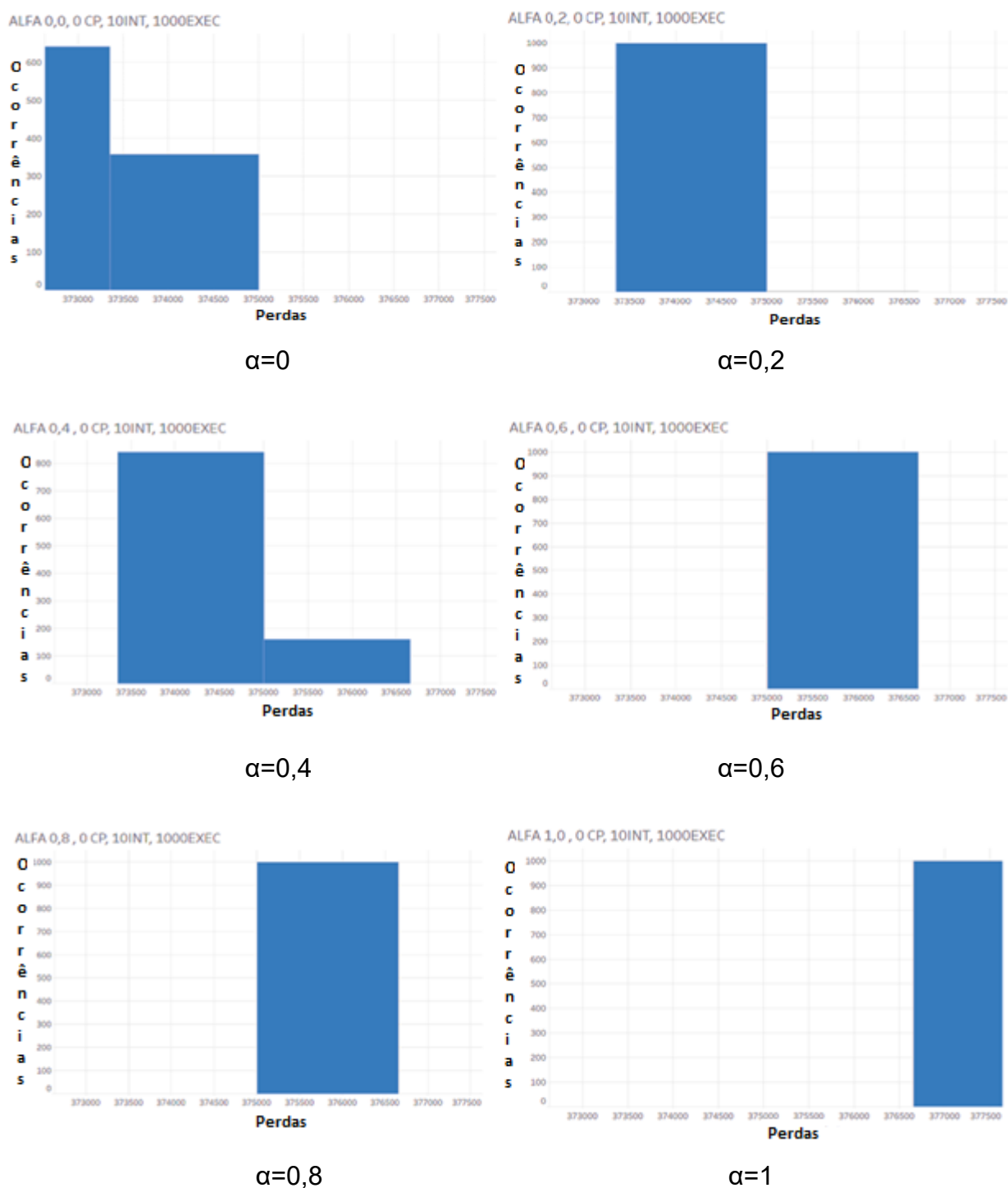
Fonte: Próprio autor

Para melhor avaliar os resultados e a convergência do GRASP, traçou-se os histogramas para visualizar as perdas de potência na rede obtidas nas execuções do algoritmo, de acordo com a variação de α , conforme a Figura 9.

Os histogramas mostram que o algoritmo limitou as perdas em um intervalo de 372,6 a 377,6 kW, verificando que as melhores soluções residem nos valores de alfa mais próximos de 0. Além disso, dos resultados apresentados na Tabela 5, é possível observar também que o regulador de tensão sempre está alocado mais próximo a

subestação, isto é, nas barras de menor índice, sendo o melhor resultado aquele cujo regulador se encontra na barra 24.

Figura 9 - Distribuição dos valores de solução obtidos após busca local em função parâmetro α , sem alocação de capacitor na rede.



Fonte: Próprio autor

5.2. RESULTADOS COM UM CAPACITOR INSERIDO NA REDE

Da mesma forma como descrito na subseção 5.1, realizou-se a execução do algoritmo, porém adicionando um capacitor na rede. A Tabela 6, apresenta de forma resumida as melhores soluções encontradas.

Tabela 6 – Melhores arranjos com alocação de um capacitor

Barra de alocação do regulador de tensão	Relação de transformação	Barra de alocação do capacitor 1	Potência do capacitor 1 (VAR)	Perdas (kW)
37	0,927246579	64	900000	310,2
38	0,927408995	64	900000	310,3
36	0,927085112	64	800000	311,0
39	0,928511388	64	900000	311,1
37	0,927246579	64	800000	311,2
47	0,928803731	64	900000	311,3
39	0,928511388	64	800000	311,9
47	0,928803731	64	800000	312,1
48	0,93054919	64	900000	312,2
48	0,93054919	77	900000	312,3

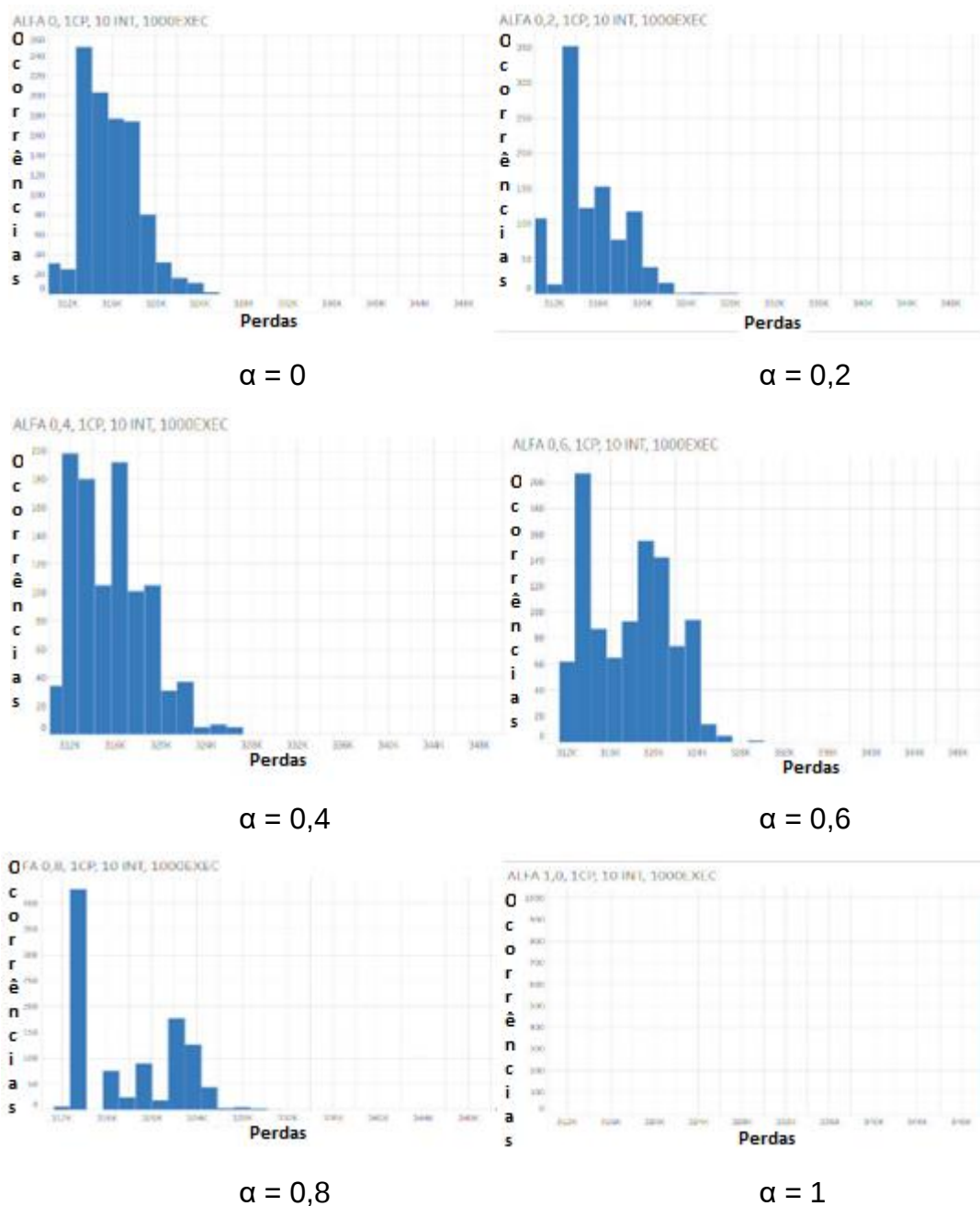
Fonte: Próprio autor

Comparando-se as melhores soluções encontradas, através de suas perdas de potência, obtidas sem alocação de capacitores e com a alocação de um capacitor, pode-se observar uma redução de 16,74%, uma vez que para este temos 310,24 kW de perdas e, para aquele, 372,63 kW.

Para melhor avaliar os resultados, traçaram-se os histogramas para visualizar as perdas de potência obtidas nas execuções do algoritmo, conforme a Figura 10. Como pode-se observar, a maior frequência de valores mais próximo ao menor custo foi com os valores de $0,2 < \alpha < 0,4$, representando que a mescla entre aleatoriedade e gulosidade é eficaz na busca da melhor solução. Entretanto, mesmo que menos frequentes, as melhores soluções encontradas utilizaram o parâmetro $\alpha=0$, demonstrando que quanto mais amplo o processo de execução for, mais opções são passíveis de se encontrar, gerando melhores soluções, isto é, de menor custo. O parâmetro $\alpha=1$ leva a obtenção do mesmo resultado sempre, o que demonstra que a falta de aleatoriedade no processo,

caminha sempre para a mesma solução, a qual é distante da melhor solução, apresentando os maiores custos. Além disso, vale ressaltar que a variância dos valores aumenta conforme o aumento do parâmetro α , sendo possível observar que quanto maior o α , maior a faixa de frequência dos custos encontrados na solução, com exceção para $\alpha=1$.

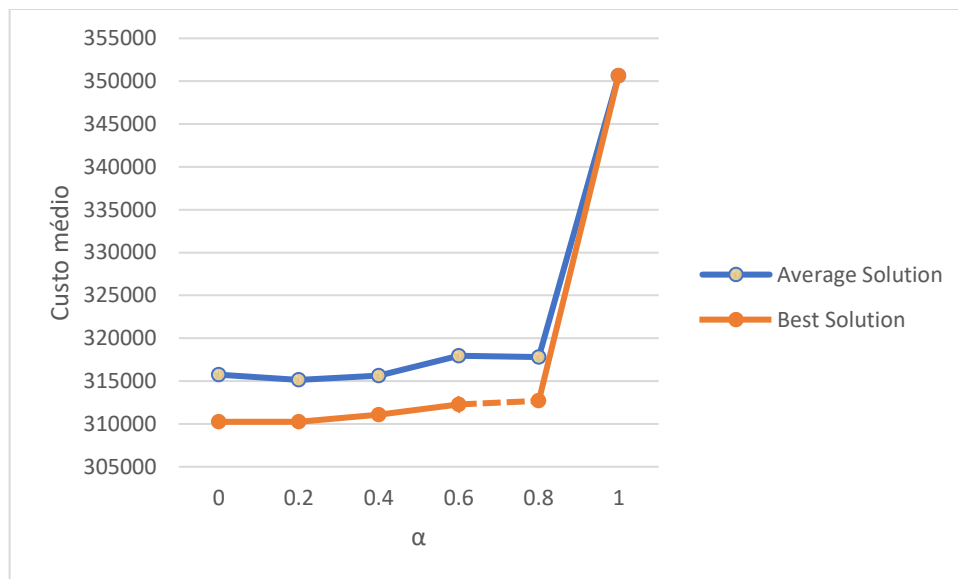
Figura 10 - Distribuição dos valores de solução obtidos após busca local em função parâmetro α , para um capacitor na rede.



Fonte: Próprio autor

A melhor solução encontrada, em todas as 1000 execuções, melhora à medida que passamos de construção aleatória para semi-gulosa (até que algum valor de parâmetro α), e então se deteriora conforme α se aproxima de 1. Isso é melhor ilustrado na Figura 11, onde há dois gráficos sobrepostos: um para o valor médio da solução e o outro para o melhor valor de solução, ambos exibidos em função de α .

Figura 11 – Valores médio e melhor da solução, para um capacitor na rede



Fonte: Próprio autor.

5.3. RESULTADOS COM DOIS CAPACITORES INSTALADOS NA REDE

Da mesma forma como descrito na subseção 5.1, realizou-se a execução do algoritmo, porém adicionando dois capacitores na rede. A Tabela 7 resume as melhores soluções encontradas.

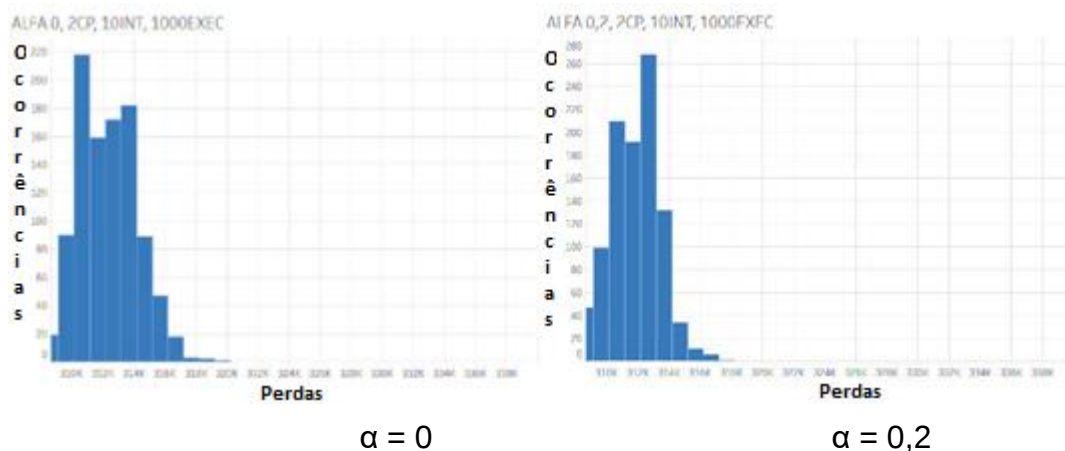
Tabela 7 – Melhores arranjos com alocação de dois capacitores

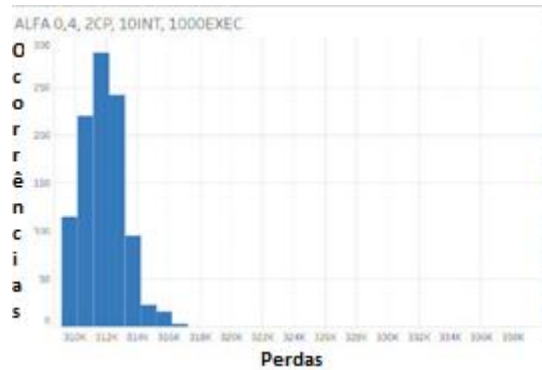
Barra de alocação do regulador de tensão	Relação de transformação	Barra de alocação do capacitor 1	Potência do capacitor 1 (VAR)	Barra de alocação do capacitor 2	Potência do capacitor 2 (VAR)	Perdas (W)
37	0,927246579	91	500000	36	400000	308,6
37	0,927246579	93	500000	36	400000	308,8
36	0,927085112	79	700000	27	200000	308,9
37	0,927246579	91	500000	26	400000	308,9
36	0,927085112	79	700000	33	200000	308,9
36	0,927085112	103	500000	25	400000	309,0
36	0,927085112	79	700000	29	200000	309,0
37	0,927246579	64	700000	108	200000	309,0
37	0,92724658	79	700000	27	200000	309,0
37	0,927246579	79	700000	24	200000	309,1

Fonte: Próprio autor

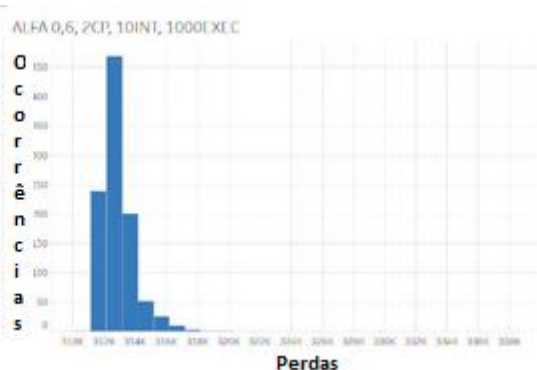
Para melhor avaliar os resultados, traçaram-se os histogramas para visualizar as perdas de potência obtidas nas execuções do algoritmo, conforme a Figura 12. Através desta, pode-se observar a repetição do mesmo comportamento do resultado da subseção 5.2, onde a frequência de soluções melhores se dá para valores de $0,2 < \alpha < 0,4$.

Figura 12 - Distribuição dos valores de solução obtidos após busca local em função parâmetro α , para dois capacitores na rede.

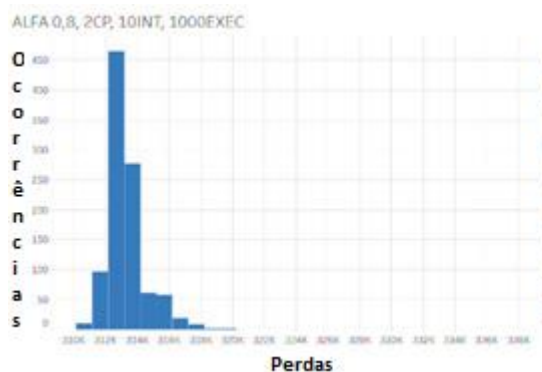




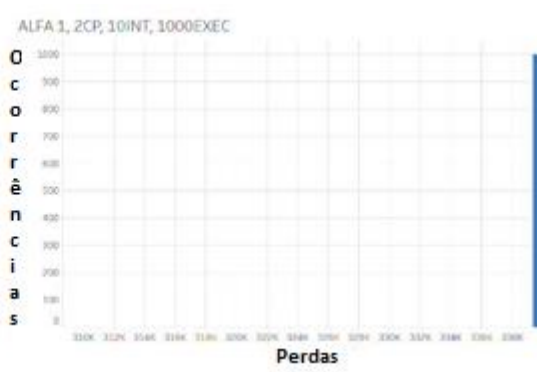
$\alpha = 0,4$



$\alpha = 0,6$



$\alpha = 0,8$



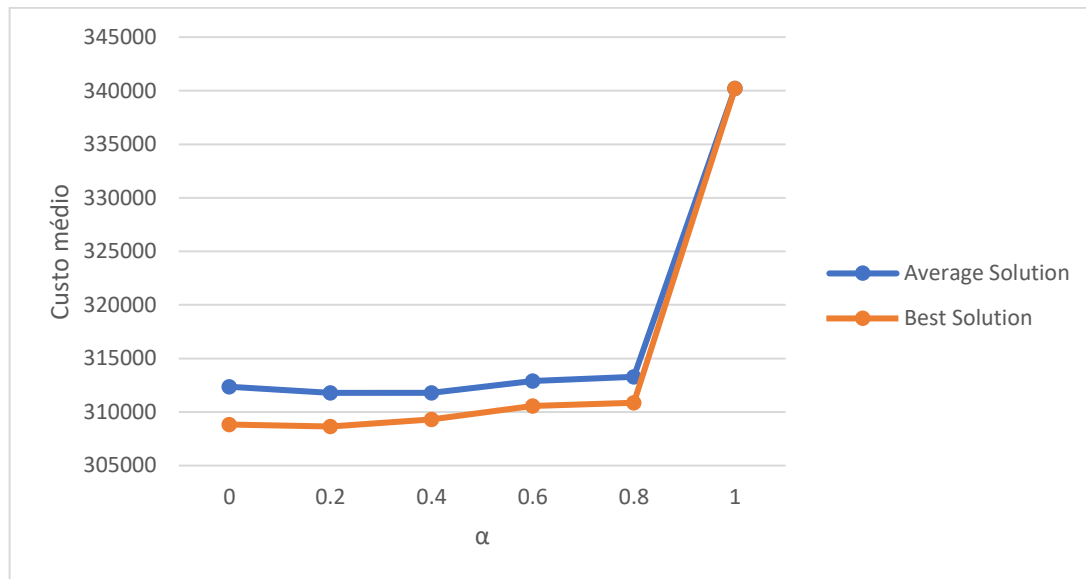
$\alpha = 1$

Fonte: Próprio autor

Comparando-se as melhores soluções encontradas, através de suas perdas de potência, obtidas com alocação de um capacitor e com a alocação de dois capacitores, pode-se observar uma redução de 0,52%, uma vez que para este temos 308,65 kW de perdas e, para aquele, 310,24 kW. Isto demonstra que, dentre todos os cenários avaliados, a alocação de dois capacitores na rede proporciona as melhores soluções. Outro ponto que fomenta tal conclusão, reside no fato de as dez melhores soluções encontradas com a alocação de dois capacitores apresentam menos perdas quando comparadas com a melhor solução encontrada com a alocação de apenas um capacitor.

Além disso, o mesmo padrão do valor médio e melhor valor da solução, se repetem, conforme é verificado na Figura 13.

Figura 13 – Valor médio e melhor valor da solução, para dois capacitores na rede

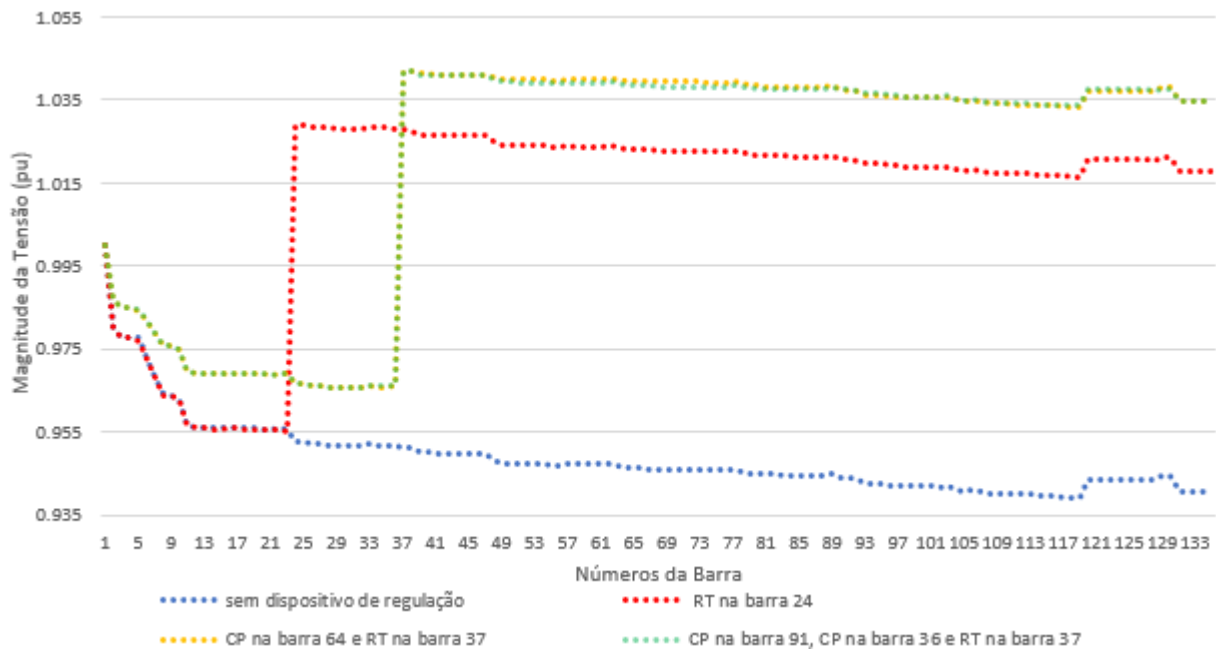


Fonte: Próprio autor

5.4. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO

Analisando os histogramas das Figuras 9, 10 e 12 verifica-se que conforme aumenta-se o número de capacitores, há uma redução nas perdas obtidas pelo algoritmo. O algoritmo foi implementado com o objetivo de reduzir as perdas na rede elétrica e, por consequência, minimizar os afundamentos de tensão conforme se distância da subestação. Com isso, utilizando a configuração de menor perdas das Tabelas 5, 6 e 7, executou-se o cálculo do fluxo de potência para o circuito configurados das três formas e foram traçados os perfis de tensão ilustrados na Figura 14.

Figura 14 – Perfis de tensão para as diversas configurações



Fonte: Próprio autor.

6. CONCLUSÃO

Conforme observado nas Figuras de 9 a 13, para o problema da alocação ótima dos equipamentos controladores de tensão e reativo, tem-se um algoritmo semi-guloso com parâmetro α entre 0,2 e 0,4, como a calibração onde as melhores soluções são encontradas. É importante ressaltar que, mesmo com a inserção de mais um equipamento, o padrão se manteve, fomentando que os parâmetros estabelecidos e aplicados no algoritmo estão ressonantes ao proposto como solução. Tal resultado encontrou-se dentro do esperado, uma vez que, em termos do parâmetro α , ambos os extremos estão distantes do ideal.

Isto é, para valores de $\alpha=1$, tem-se o processo estritamente guloso, onde as soluções obtidas são sempre as mesmas e sempre com o maior custo dentre todos os demais valores de α , o que não é ideal para a solução do problema; para valores de $\alpha=0$, tem-se o processo estritamente aleatório, onde as soluções ainda são mais próximas das melhores, porém se tem menor controle sobre a solução do problema, justamente pela carga de aleatoriedade intrínseca ao processo. Desta forma, devido a possibilidade de mescla destes processos, fica evidente a eficiência na adoção de processos aleatórios gulosos na solução da alocação ótima de dispositivos de controle de tensão e reativos em redes de distribuição de energia elétrica.

Além disso, observando os resultados pelo viés dos equipamentos, também pode-se observar que, sob as mesmas condições, a inserção de dois capacitores na rede produz soluções mais eficazes quando comparadas com a inserção de apenas um capacitor. A evidência disto reside no fato de que as perdas calculadas para dois capacitores são menores do que para um. Tão pouco pode-se afirmar que sempre a inserção de mais capacitores trará melhores resultados, pois observando-se os perfis de tensão da Figura 14, mesmo havendo redução nas perdas, a inserção de dois capacitores não altera significativamente o perfil de tensão apresentado com a alocação de um capacitor e, além disso, também se deve analisar não só a quantidade do equipamento, mas também as potências disponíveis no mercado, bem como os custos de fabricação, instalação e manutenção, sendo este um ponto aberto para análises futuras, em continuação ao exposto no presente trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica”. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: agosto de 2022.
- BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa n. 956, de 07 de dezembro de 2021. Diário Oficial da União. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>. Acesso em: agosto de 2022.
- BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa n. 024, de 27 de janeiro de 2000. Diário Oficial da União. Disponível em: http://www.zonaeletrica.com.br/legislacao/resolucoes/res_aneel/2000/2000_RE_SOLUCAO_ANEEL_N024.pdf. Acesso em: agosto de 2022.
- BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa n. 456, de 29 de novembro de 2000. Diário Oficial da União. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=F7F6D20CD7A367BBE41C7AA06221479C.node1?codteor=222832&filename=LegislacaoCitada+-PL+3641/2004. Acesso em: agosto de 2022.
- A ANEEL. Governo Federal. Ministério de Minas e Energia. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/a-aneel>. Acesso em: novembro de 2022.
- MATTAR, CARLOS ALBERTO CALIXTO, Da gênese à implantação dos procedimentos de distribuição – PRODIST: desafios e oportunidades. 2010.
- PADILHA, L. N. Análise comparativa de estratégias para regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica na presença de geradores distribuídos. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 123p. 2010.
- DROZDEK, A. Estrutura de dados e algoritmos em C++, f. 290. 2012. 579 p.
- LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S., Development of a Smart Grid Simulation Environment, Part I: Project of the Electrical Devices Simulator. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 26, p. 80-95, 2014a.
- RESENDE, M. G. C.; RIBEIRO, C. C. Greedy randomized adaptive search procedures: Advances and extensions. In: Handbook of Metaheuristics. [s.l.] Springer, Cham, 2019. v. 272p. 169–220.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. Journal of Global Optimization, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.

FREDDO, A. R.; BRITO, R. C. Implementação da Meta-heurística GRASP para o Problema do Caixeiro Viajante Simétrico. Trabalho de graduação – Universidade Federal do Paraná. 14p. 2015.

LABORATÓRIO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA - LAPSEE. Sistema de distribuição para testes – 135 barras. Ilha Solteira: LAPSEE, 2020. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/lapsee>.