



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Visando Aumento da Carga Frente à Estabilidade de Tensão Aplicando Seleção Clonal

Daniela Cristina da Silva Santos

**João Monlevade
2020**

Daniela Cristina da Silva Santos

**Reconfiguração de Sistemas de Distribuição
Visando Aumento da Carga Frente à
Estabilidade de Tensão Aplicando Seleção
Clonal**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovic

Coorientador: Prof. Wendy Yadira Eras Herrera

**João Monlevade
2020**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237r Santos, Daniela Cristina da Silva .
Reconfiguração de sistemas de distribuição visando aumento da carga frente à estabilidade de tensão aplicando seleção clonal.
[manuscrito] / Daniela Cristina da Silva Santos. - 2020.
67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Wilington Guerra Zvietcovic.
Coorientadora: Profa. Dra. Wendy Yadira Eras Herrera.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Engenharia elétrica. 2. Redes elétricas. 3. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. 4. Energia elétrica - Distribuição. I. Herrera, Wendy Yadira Eras. II. Zvietcovic, Wilington Guerra. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia C. M. Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Daniela Cristina da Silva Santos

Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Visando Aumento da Carga Frente à Estabilidade de Tensão Aplicando Seleção Clonal

Conforme previsto no § 3º do artigo 5º da Resolução Coee nº11/2018, a defesa da monografia foi substituída por publicação de artigo em evento científico.

Versão final

Aprovado em 05 de março de 2020

De acordo

Professor Orientador **Wilingthon Guerra Zvietcovich**



Documento assinado eletronicamente por **Wilingthon Guerra Zvietcovich, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/03/2020, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0044611** e o código CRC **1297E21F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002667/2020-96

SEI nº 0044611

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

Criado por **23135519899**, versão 2 por **23135519899** em 19/03/2020 10:41:42.

Agradecimentos

À Deus, por ser a minha “Pedra Angular” e meu refúgio nesta caminhada, longa e difícil, mas da qual saí vitoriosa.

Aos meus pais – Celso e Maria e irmãos – Tiago, Isabela e Daniel, pelo amor, incentivo, apoio incondicional e por serem o motivo desta conquista.

À minha família do coração – “Família Luiz e Souza”, pelo amor, companheirismo e ajuda em todos os sentidos.

Às minhas avós – Almerinda e Antônia, que apesar de não estarem presentes, fizeram parte da minha educação e ajudaram a moldar a mulher que sou hoje.

Aos tios e aos primos, que de uma forma direta ou indireta me ajudaram.

Aos colegas da Faculdade, em especial Lucas e Wallace, por estarem comigo em todos os momentos.

Aos meus professores, por contribuírem para minha formação profissional.

Aos irmãos em Cristo, pelas orações feitas em favor dos meus estudos.

A todos o meu muito obrigado.

Resumo

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) vem operando cada vez mais próximo à sua máxima capacidade, sobretudo no patamar pesado (hora pico) devido a vários motivos, principalmente a falta de recursos para investimentos. Neste cenário, a rede pode entrar em colapso de tensão, operando em situações de instabilidade. Uma medida técnico/econômica viável é a reconfiguração das redes de distribuição para gerar topologias que suportem maior carregamento. Este trabalho tratou o problema de reconfiguração de duas redes de um SDEE, 33 e 135 barras do IEEE. A técnica de otimização utilizada para gerar as configurações foi a Seleção Clonal que se baseia no Sistema Imunológico e para avaliar a estabilidade de tensão do sistema, utilizou-se um índice de estabilidade de tensão, o TPSI. Constatou-se que a metodologia utilizada foi eficiente, gerando topologias radiais capazes de suportar maior demanda, mantendo os níveis de tensão dentro do valor esperado.

Palavras-chave: Otimização, Reconfiguração, Seleção Clonal, Sistemas de Distribuição.

Abstract

The Electricity Distribution System (SDEE) has been operating ever closer to its maximum capacity, especially at the heavy level (peak hour) due to several reasons, mainly the lack of resources for investments. In this scenario, the network may collapse, operating in situations of instability. A viable technical / economic measure is the reconfiguration of distribution networks to generate topologies that support greater loading. This work addressed the problem of reconfiguring two networks of an SDEE, 33 and 135 IEEE buses. The optimization technique used to generate the configurations was Clonal Selection, which is based on the Immune System and to assess the system's voltage stability, a voltage stability index, TPSI, was used. It was found that the methodology used was efficient, generating radial topologies capable of withstanding higher demand, keeping the voltage levels within the expected value.

Keywords: Optimization, Reconfiguration, Clonal Selection, Distribution System.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Distribuição das camadas de um sistema radial de distribuição	20
Figura 2 – Representação da geração e elementos shunts de um nó	20
Figura 3 – Processo Backward sweep	21
Figura 4 – Processo Forward sweep	22
Figura 5 – Fluxograma do método Back-Forward sweep	24
Figura 6 – Representação dos tipos de estabilidade de um SEP	26
Figura 7 – Representação de uma curva P-V	28
Figura 8 – Representação de uma curva Q-V	29
Figura 9 – Diagrama Fasorial para um Sistema de 2 barras	30
Figura 10 – Caminho de transmissão	31
Figura 11 – Projeção das tensões ao longo do caminho de transmissão	31
Figura 12 – Sistema radial de 33 barras	33
Figura 13 – Estado da rede de 33 barras para dois patamares de carregamento	33
Figura 14 – Comportamento do índice Transmission Path Stability Index (TPSI) em um sistema de 33 barras	34
Figura 15 – Representação de uma linha de transmissão de duas barras do sistema de distribuição	35
Figura 16 – Sistema radial de 33 barras – Topologia 1	37
Figura 17 – Sistema radial de 33 barras – Topologia 2	38
Figura 18 – Comportamento do índice TPSI em um sistema de 33 barras após reconfiguração	39
Figura 19 – Fluxograma do Algoritmo Seleção Clonal	41
Figura 20 – Rede de 14 barras IEEE	44
Figura 21 – Perfil das tensões da rede de 33 barras da IEEE	48
Figura 22 – Perfil das tensões da rede de 135 barras da IEEE	50
Figura 23 – Desempenho da metodologia	50

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valor TPSI para fator de carregamento unitário	33
Tabela 2 – Valor TPSI para fator de carregamento igual a 3,6	33
Tabela 3 – Valor TPSI –Topologia 1	38
Tabela 4 – Valor TPSI –Topologia 2	38
Tabela 5 – Representação de uma solução	44
Tabela 6 – Representação da Avaliação de uma solução	44
Tabela 7 – Parâmetros próprios da metodologia	47
Tabela 8 – Resultados do Sistema de 33 barras	47
Tabela 9 – Resultados do Sistema de 135 barras	49

Lista de Abreviaturas e Siglas

AC Anticorpos

AINF Agentes Infecciosos

DEC Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

IEEE Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LFB Linfócitos B

LKC Lei das Correntes de Kirchoff

LKV Lei das Tensões de Kirchoff

LSF Fator de Sensibilidade a Perdas

MPSO Modified Particle Swarm Optimization

PRODIST Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional

PSO Particle swarm optimization

QEE Qualidade de Energia Elétrica

RNA Redes Neurais Artificiais

SC Seleção Clonal

SDEE Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SEP Sistema Elétrico de Potência

SI Sistema Imunológico

SIA Sistema Imunológico Adaptativo

SII Sistema Imunológico Inato

STEE Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

TPSI Transmission Path Stability Index

Sumário

	Sumário	11
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	Justificativa	14
1.3	Metodologia	15
1.4	Organização	16
2	ESTADO DA ARTE	17
3	CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DIS- TRIBUIÇÃO	19
3.1	Método Back-and-Forward sweep	19
3.1.1	Análise Matemática do Processo Back-and-Forward	20
4	ESTABILIDADE DE TENSÃO	25
4.1	Conceitos, Classificação e Análise	25
4.1.1	Estabilidade do Ângulo do Rotor	26
4.1.2	Estabilidade de Frequência	26
4.1.3	Estabilidade de Tensão	27
4.2	Índice de Proximidade ao Colapso de Tensão	29
4.2.1	Índice de estabilidade TPSI	29
4.2.1.1	Análise do índice TPSI para um sistema de 33 barras	32
4.2.2	Índice de estabilidade baseado na transferência de potência ativa e reativa	34
5	RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	37
5.1	Algoritmo Seleção Clonal	39
5.1.1	Sistema Imunológico	39
5.1.1.1	Sistema Imunológico Adaptativo	39
5.1.2	Princípio da Seleção Clonal	40
5.1.3	Pseudocódigo do Algoritmo Seleção Clonal	40
5.2	Modelagem matemática do problema	42
5.3	Aplicação da Seleção Clonal na reconfiguração dos Sistemas de Distribuição	43
5.3.1	Representação de uma solução	43

5.3.2	Avaliação de uma solução	44
5.3.3	População Inicial	44
5.3.4	Processo de Clonagem	45
5.3.5	Operadores de mutação	45
5.3.6	Escolha da próxima população	46
5.3.7	Critério de Parada	46
6	RESULTADOS	47
7	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
A	TOPOLOGIA DA REDE DE 33 BARRAS	54
B	TOPOLOGIA DA REDE DE 135 BARRAS	55
C	DADOS DA REDE DE 33 BARRAS	56
D	DADOS DA REDE DE 135 BARRAS	57
E	ARTIGO PUBLICADO	61

1 Introdução

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) representa um dos maiores componentes de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), entretanto, ele possuía menor número de equipamentos de automação e proteção quando comparado aos Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica (STEE). Em meados do século XX, com o aumento das usinas e redes interligadas, o projeto e operação da geração e transmissão de energia tornou-se um grande desafio aos pesquisadores e engenheiros da época, que tiveram que buscar técnicas mais elaboradas para análise e operação. Enquanto isso, o SDEE entregava potência com pouca ou nenhuma análise, além de estar superdimensionado (KERSTING, 2006).

Atualmente, o sistema de distribuição é composto por cargas industriais, residenciais, comerciais e de iluminação. A combinação dessas cargas gera um pico nos transformadores e geradores em momentos diferentes do dia, sendo que em alguns momentos o sistema fica levemente carregado e em outros momentos fortemente carregado (KASHEM; GANAPATHY; JASMON, 2000). Com o aumento contínuo da demanda de carga, o sistema pode vir a operar em seu carregamento máximo (KERSTING, 2006; CHAKRAVORTY; DAS, 2001).

Um aumento de carga (potência ativa e reativa) pode levar alguns consumidores (indústrias) a situações críticas, como o colapso de tensão (instabilidade de tensão). A instabilidade de tensão ocorre quando um sistema de energia elétrica é submetido a cargas pesadas e não se tem uma fonte reativa suficiente para fornecer esta demanda (CHAKRAVORTY; DAS, 2001; PAL, 1992). Para corrigir esse problema é utilizada a compensação reativa.

O avanço tecnológico na área da eletrônica e telecomunicação possibilitou a automação dos SDEE (LORENZETI et al., 2004). Os engenheiros contam hoje com a ajuda computacional para realizar testes e fazer análises dos mesmos, a fim de obter as características da rede. É possível saber se o sistema está sobrecarregado ou não, bem como calcular as perdas. Caso estas situações ocorram é possível reconfigurar os SDEE. Desta forma, esta atividade (reconfigurar) constitui uma ferramenta para melhorar a margem de segurança da distribuição de energia ou distanciar-se de uma operação instável de tensão. Isto pode ocorrer em instantes de maior demanda.

A reconfiguração consiste na abertura e fechamento de chaves, alterando a topologia do sistema, a fim de alcançar um determinado objetivo, por exemplo, reduzir as perdas, melhorar as tensões, melhorar indicadores de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), balancear cargas entre os alimentadores e melhorar a estabilidade de tensão. Este último assunto é o foco deste trabalho. Na literatura, encontram-se trabalhos de reconfiguração objetivando a minimização de perdas elétricas e balanceamento de cargas entre os alimentadores, porém,

poucos trabalhos falam em reconfiguração com o objetivo de aumentar a margem de segurança (LORENZETI et al., 2004). No capítulo 2 será exposto alguns destes trabalhos com mais detalhes.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático que represente o problema de reconfiguração e suas restrições e aplicar o algoritmo de otimização ‘Seleção Clonal (SC)’ para reconfiguração das redes do SDEE.

1.1.2 Objetivos Específicos

Além do objetivo principal, supracitado, objetiva-se com este trabalho:

- Realizar um estudo sobre a aplicação do Algoritmo SC em diferentes áreas do conhecimento;
- Realizar um estudo sobre índices de estabilidade de tensão em SDEE;
- Melhorar a estabilidade de tensão nas redes testadas e utilizar um índice de estabilidade proposto na literatura para avaliar esta condição.

1.2 Justificativa

A sociedade vem crescendo cada dia mais e junto com ela, a necessidade de maior demanda de energia elétrica. No entanto, devido a restrições econômicas e ambientais, o SDEE não tem conseguido expandir-se quanto a utilização de equipamentos de automação e proteção.

Décadas atrás, nos SDEE eram conectadas cargas resistivas e com o passar dos anos elas cresceram e a energia reativa também. Apareceram cargas indutivas como, por exemplo, eletrodomésticos, motores, entre outros. Isto levou a um crescimento do fluxo de energia reativa nas linhas dos SDEE. Sabe-se que a energia reativa impacta na tensão eficaz.

Conhecer a operação do SDEE faz parte dos estudos de operação e expansão destas redes. A partir dos valores estimados (tensões, correntes, fluxo de carga) é possível avaliar o estado da rede observando a estabilidade de tensão, com o propósito de determinar a proximidade da operação à instabilidade, ponto em que o sistema não possui mais o controle da tensão e ela decai rapidamente, visando desenvolver ferramentas que auxiliem

os operadores do sistema para tomada de decisões. Por exemplo, reconfigurar o SDEE procurando uma configuração na qual o sistema opere mais longe da instabilidade.

Uma instabilidade de tensão, se não corrigida em tempo adequado, aciona o sistema de proteção que corta o fluxo de energia, ocasionando um blackout. Perante um blackout, consumidores especiais como, por exemplo, hospitais, bombeiros, asilos, entre outros, poderiam ter prejuízos incalculáveis. O tempo em que esses consumidores permanecem sem energia, se relaciona aos índices de QEE, mais especificamente à Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e é regulamentada pela ANEEL (2017) através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional (PRODIST) 8.

Diante destes fatos, é necessário um planejamento para que a rede trabalhe em comum acordo com a demanda consumidora. Realizando a reconfiguração, melhora-se a distância entre o ponto de operação do sistema e o ponto de instabilidade, melhorando a margem de segurança do mesmo. Sendo assim, pesquisas contínuas sobre a modelagem deste tipo de problema são indispensáveis, bem como algoritmos que obtenham resultados eficientes e que sejam computacionalmente leves.

1.3 Metodologia

Com a finalidade de facilitar o desenvolvimento deste trabalho e atender todos os objetivos, decompôs-se o mesmo nas seguintes etapas:

1. Revisão Bibliográfica

Nesta etapa dedicou-se à pesquisa bibliográfica do tema abordado. Ela foi feita mediante trabalhos publicados na literatura. Foram procurados no google acadêmico e no Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE).

2. Estudo sobre a estabilidade de tensão

Nesta etapa foi estudada a estabilidade do SDEE, mais especificamente índices de estabilidade de tensão em SDEE. Assim, como um parâmetro de avaliação quantitativo da estabilidade do sistema, foi estudado o índice de análise *TPSI* e um índice baseado na transferência de potência ativa e reativa.

3. Estudo da técnica de otimização

Nessa etapa foi necessário entender como o problema poderia ser modelado matematicamente, o que seria a função custo e as restrições aplicáveis. Por conseguinte, foi estudado o algoritmo utilizado para reconfiguração da rede, SC.

4. Desenvolvimento da introdução, objetivos e estado da arte

A partir dos estudos realizados nas etapas acima, iniciou-se o processo da parte escrita do trabalho: introdução, objetivo, estado da arte, entre outros.

5. Implementação computacional da metodologia

Nesta etapa foi realizada a implementação do algoritmo utilizado na reconfiguração.

6. Testes e resultados

Nesta etapa foram realizados testes nas redes de estudo deste trabalho e análise dos resultados comparando-os com os resultados da literatura.

7. Conclusão

Nesta etapa dedicou-se à escrita da conclusão do trabalho.

1.4 Organização

O trabalho está organizado da seguinte maneira:

Capítulo 1: Introduz o tema do trabalho, objetivos, justificativa da pesquisa nesta área e da técnica de otimização adotada.

Capítulo 2: Estado da arte. Cita algumas pesquisas relacionadas ao tema deste trabalho, abordando a metodologia utilizada, seus resultados e conclusão.

Capítulo 3: Aborda o cálculo do fluxo de potência para sistemas de distribuição.

Capítulo 4: Trata sobre a estabilidade de tensão e o índice que avalia a situação dela no SEP.

Capítulo 5: Explica sobre a técnica de otimização para o problema de reconfiguração do SDEE.

Capítulo 6: Realiza testes em diferentes SDEE e ilustra seus resultados.

Capítulo 7: Conclui o trabalho.

2 Estado da Arte

O problema de reconfiguração é estudado na literatura como um problema combinatório, ou seja, sua análise é feita em um conjunto finito. Na bibliografia, existem alguns trabalhos na área da estabilidade de tensão e muitas técnicas são utilizadas para avaliação da mesma. Segue abaixo alguns destes trabalhos que apresentam técnicas distintas.

Kashem, Ganapathy e Jasmon (2000) propôs uma reconfiguração alterando a estrutura topológica dos geradores de distribuição. Realizou o teste em uma rede de 69 barras e os resultados obtidos indicam que o método é capaz de determinar as comutações apropriadas para encontrar a configuração ótima ou quase ótima para aprimoramento da estabilidade de tensão com menor uso computacional e, além disso, as perdas foram reduzidas.

Guimaraes, Lorenzetti e Castro (2004) propôs um algoritmo de reconfiguração baseado na busca tabu para maximizar a margem de segurança para o colapso da tensão. Foram realizados pequenos testes em sistemas realísticos. Tais testes comprovaram a eficiência do algoritmo, pois com a melhoria da margem de estabilidade de tensão, as perdas também foram reduzidas.

Kayal, Chanda e Chanda (2011) propôs a reconfiguração da rede baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) para melhorar a estabilidade de tensão. A metodologia foi testada em um sistema de 52 barras e os resultados alcançados foram promissores e encorajadores já que o perfil das tensões nos barramentos foi melhorado e houve redução nas perdas do sistema, isto, sem custo adicional para instalação de capacitores, transformadores de troca, cabos, dentre outros. no sistema de distribuição.

Mistry e Roy (2011) propuseram um algoritmo simples formulado para o aumento do índice de estabilidade de tensão através da reconfiguração da rede pelo método de redução de perdas. Testes foram realizados em redes de 16 e 33 barras, tendo uma ação de comutação horária durante o período de um dia. Os autores concluíram que o método proposto foi capaz de aumentar a estabilidade da tensão nos barramentos, sem qualquer custo adicional.

Kumar, Kumar e Kumar (2017) propôs um algoritmo para reconfiguração da rede baseado no Fator de Sensibilidade a Perdas (LSF) para identificar a configuração ótima, a fim de minimizar perdas ativas e reativas, bem como melhorar o perfil das tensões nos barramentos. O algoritmo foi testado em um sistema de 33 barras e a eficiência do mesmo foi comprovada, pois não teve nenhum custo adicional. Além disso, houve uma redução de perda ativa em 31,16% , perda reativa em 30,19 % e perda aparente em 30,75%.

Wu, Dong e Liu (2018) propôs uma reconfiguração baseado no método *Modified Particle Swarm Optimization (MPSO)*. Os testes foram feitos em redes de 25, 33, 69 e 109 barras. Os resultados mostraram que o método proposto teve um bom desempenho. O

tempo de CPU reduziu para 1/3 do Algoritmo Genético e *Particle swarm optimization (PSO)*, também teve um bom desempenho em pesquisa global e velocidade de convergência, além disso, reduziu a perda de energia e melhorou o perfil das tensões.

3 Cálculo do Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição

Existem vários métodos de cálculo de fluxo de potência para sistemas radiais, por exemplo, Fluxo de carga radial de Goswani-Basu e Análise comparativa, como ilustrado em Brandini (2000). Para este trabalho, optou-se por um método conceitualmente simples, porém rápido e preciso computacionalmente, o fluxo de carga radial ou simplesmente método back-and-forward sweep, baseado na aplicação direta das Lei das Tensões de Kircchoff (LKV) e Lei das Correntes de Kircchoff (LKC), proposto por Shirmohammadi et al. (1988). Ademais, é um método usado por vários pesquisadores que trabalham com sistemas de distribuição.

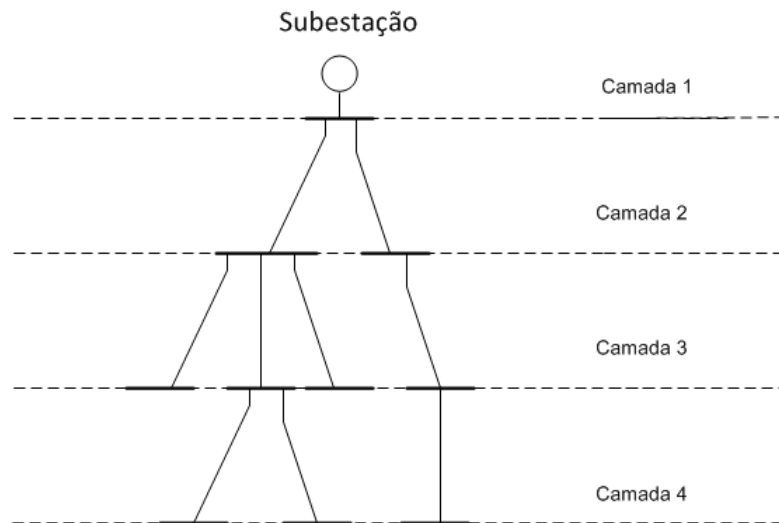
3.1 Método Back-and-Forward sweep

Neste método é importante organizar as barras, representadas pelos nós da Figura 1, em camadas, pois essa organização ajuda a encontrar o fluxo de carga de forma eficiente. As barras devem ser dispostas de modo que o nó raiz (subestação) se encontre na primeira camada e as outras sejam alocadas nas camadas de ordem superior de forma crescente.

Após a rede estar organizada, conforme esquema citado anteriormente, o processo se inicia escolhendo os valores de tensão em cada barra, que deve ser igual à tensão de referência (tensão da subestação). Escolhidas as tensões nas barras é possível calcular a corrente de carga em cada barra, bem como as correntes nos ramos, pois o valor da potência do sistema é conhecido. Este processo é implementado iniciando a partir das barras extremas e percorrendo as barras até à subestação (processo 'backward'). Com os valores de corrente nos ramos calculados é possível encontrar as perdas do sistema.

No processo 'backward' é possível calcular a corrente que flui da subestação, então, agora num processo reverso, utilizando as correntes dos ramos, calcula-se as novas tensões nas barras, partindo da subestação e indo em direção às barras extremas (processo 'forward'). Com os novos valores de corrente calculam-se novos valores de perdas do sistema e o processo reinicia até que um critério de parada seja atendido. Normalmente é escolhida a variação das perdas do sistema como critério de parada, entretanto, neste trabalho utilizará o critério de tensão.

Figura 1 – Distribuição das camadas de um sistema radial de distribuição



Fonte: Do autor

3.1.1 Análise Matemática do Processo Back-and-Forward

Considerando um sistema de distribuição radial com n nós e b ramos, onde $b = n - 1$, segue abaixo o método de resolução descrito em Shirmohammadi et al. (1988):

a) Cálculo das correntes nodais: As correntes nodais, na iteração k , podem ser calculadas a partir da equação 3.1:

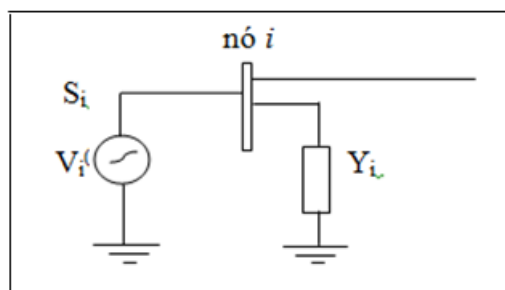
$$I_i^k = \left(\frac{S_i}{V_i^{k-1}} \right)^* - Y_i V_i^{k-1}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.1)$$

Em que:

- V_i^{k-1} é a tensão presente no nó i durante a iteração $(k - 1)$;
- S_i é a potência em VA injetada no nó i ;
- Y_i é o somatório de todos os elementos shunt ligados ao nó i .

A Figura 2 apresenta o que foi citado:

Figura 2 – Representação da geração e elementos shunts de um nó



Fonte: Do autor

b) **Backward sweep:** A corrente no ramo L , J_L , na iteração k , é calculada pela equação 3.2, partindo da barra mais extrema e indo em direção à subestação:

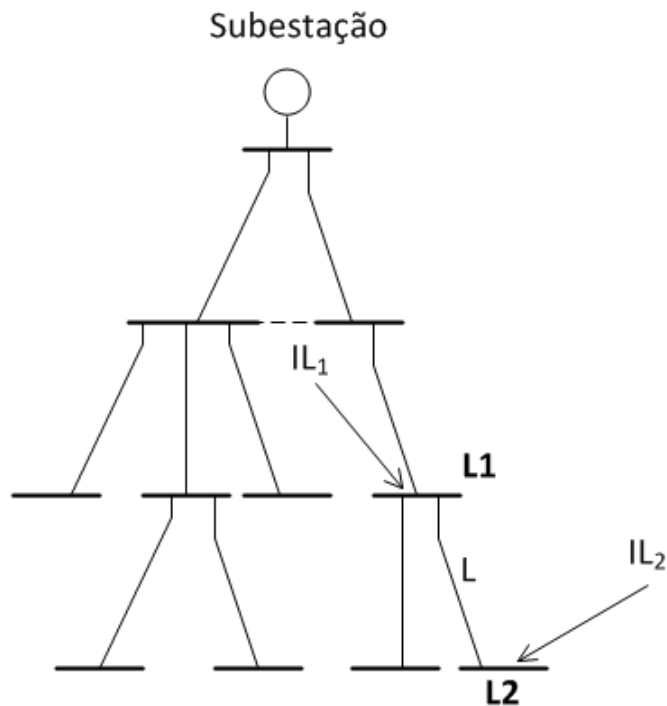
$$J_L^k = -I_{L2}^k + I_{S_{L2}}, L = b, b - 1, b - 2, \dots, 1 \quad (3.2)$$

Em que:

- I_{L2}^k é a injeção de corrente no nó L_2 , na iteração k ;
- $I_{S_{L2}}$ é a soma de todas as correntes de linha que emanam do nó L_2 ;
- J_L^k é a corrente no ramo L , na iteração k .

Esta é a aplicação direta da LKC, ou seja, as correntes que entram em um nó são iguais às correntes que saem dele. A Figura 3 ilustra este processo:

Figura 3 – Processo Backward sweep



Fonte: Do autor

c) **Forward sweep:** Com os valores das correntes nas linhas já conhecidos, encontra-se agora os valores de tensão nas barras a partir da equação 3.3, partindo da barra da subestação, que se encontra na primeira camada, e indo em direção às barras que se encontram na última camada:

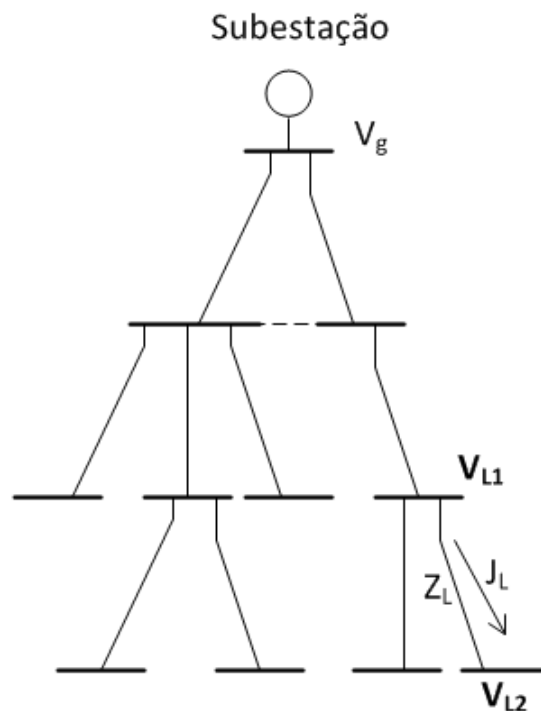
$$V_{L2}^k = V_{L1}^k - Z_L J_L^k, L = 1, 2, 3, \dots, b \quad (3.3)$$

Em que, para cada linha L , conforme indica Figura 4

- V_{L2} é a tensão no nó L_2 na iteração k ;
- V_{L1}^k é a tensão no nó L_1 na iteração k ;
- Z_L é a impedância na linha L ;
- J_L^k é a corrente no ramo L , na iteração k .

Esta é a aplicação direta da LKV.

Figura 4 – Processo Forward sweep



Fonte: Do autor

Os passos descritos em a, b e c são repetidos até que se encontre a convergência. Esta convergência é alcançada quando se obtém um valor para a variação de potência nas barras menor que uma tolerância pré-estabelecida, representada por ϵ_p .

Em cada iteração k , calcula-se as correntes e as tensões na barra i , portanto é possível saber a potência injetada em cada barra conforme a equação 3.4:

$$S_i^k = V_i^k (I_i^k)^* - Y_i |V_i^k|^2 \quad (3.4)$$

Em que:

- S_i^k é a potência em VA injetada no nó i ;
- V_i^k é a tensão presente no nó i durante a iteração k ;
- I_i^k é a injeção de corrente na barra i ;

- Y_i é o somatório de todos os elementos shunt ligados ao nó i .

Considerando a potência injetada em cada barra numa iteração $k-1$ e a potência calculada na iteração k , as diferenças de potência ativa e reativa na barra i podem ser calculadas na iteração k como mostrado nas equações 3.5 e 3.6:

$$\Delta P_i^k = \text{Re}[S_i^k - S_i], i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_i^k = \text{Im}[S_i^k - S_i], i = 1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

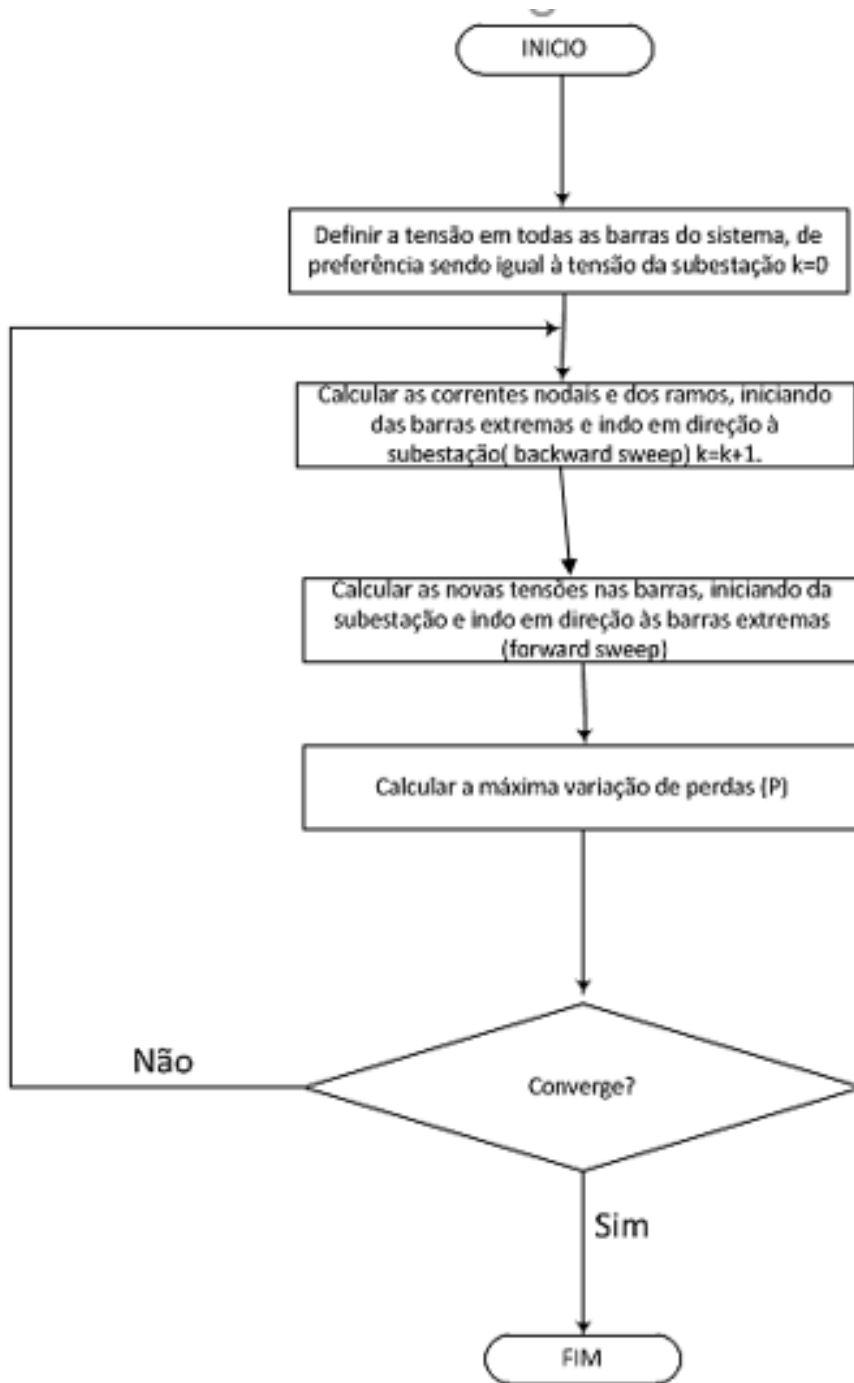
Se a máxima variação de potência ativa for menor que o resíduo ou tolerância, ϵ_p , o sistema converge e o algoritmo para conforme considerações abaixo:

$$\begin{aligned} [\max (\Delta P_i) \leq \epsilon_p] &\rightarrow \text{converge} \\ [\max (\Delta P_i) > \epsilon_p] &\rightarrow \text{passo a} \end{aligned}$$

O passo a passo do algoritmo back-and-forward sweep é descrito abaixo e o fluxograma para representação do mesmo encontra-se na Figura 5:

1. Fixar as tensões na barra como sendo iguais à tensão da barra de referência (subestação). Fazer a potência 1, que seria a perda1, igual a zero e escolher uma tolerância.
2. Iniciando das barras extremas, calcular as correntes de carga em todas as barras e em todos os ramos do sistema, conforme equação 3.1.
3. Com todos os valores de correntes nos ramos conhecidos, calcular novos valores de módulo de tensão nas barras do sistema, iniciando o processo a partir da subestação, conforme equação 3.3
4. Calcular as perdas ativas do sistema utilizando as correntes e tensões das barras e fazer a potência 2, perda2, igual a perda total, conforme equação 3.5
5. Se a variação da perda, ou seja, perda 2 menos perda 1 for menor que a tolerância, o processo para, caso contrário, fazer a perda 1 receber a perda 2. Voltar ao passo 2.

Figura 5 – Fluxograma do método Back-Forward sweep



Fonte: Do autor

4 Estabilidade de Tensão

4.1 Conceitos, Classificação e Análise

O estudo da estabilidade de tensão, nos tempos atuais, é um assunto que deve e tem obtido uma atenção especial quando se trata de um SEP, visto que, muitas vezes, o sistema não tem um suporte necessário para reagir a determinados distúrbios.

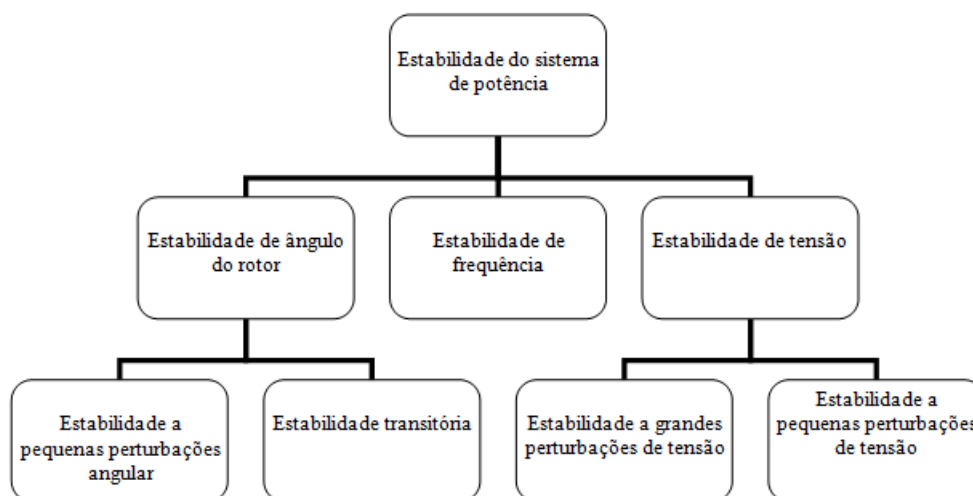
Os distúrbios podem ser de pequena ou de grande ordem. O primeiro está associado a pequenos desequilíbrios, como mudança de carga ou até mesmo ações de controle. O segundo se relaciona a perdas de linhas de transmissões, geradores, etc.

A estabilidade pode ser definida como sendo a capacidade que o sistema tem de permanecer em equilíbrio operando em condições normais e a habilidade do mesmo encontrar um novo ponto de equilíbrio após alguma perturbação física (CANTARINO et al., 2007; MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2011), por exemplo um curto circuito entre as fases.

Os SEPs atuais podem ser submetidos a distintas formas de instabilidade, por exemplo, depende do tipo de distúrbio, condição de operação e também da rede na qual são submetidos (KUNDUR et al., 2004). Para compreensão dos tipos de instabilidade e desenvolvimento de métodos que ajudem a manter a estabilidade num sistema, perante uma contingência, é utilizado a classificação dos tipos de estabilidade. As classificações mais empregadas na literatura são descritas abaixo e representadas no organograma da Figura 6:

- Estabilidade do ângulo do rotor(ou potência);
- Estabilidade de frequência;
- Estabilidade de tensão.

Figura 6 – Representação dos tipos de estabilidade de um SEP



Fonte: Machowski, Bialek e Bumby (2011)

4.1.1 Estabilidade do Ângulo do Rotor

Está relacionado com a capacidade das máquinas síncronas manterem o sincronismo após perturbações no sistema. Depende da capacidade de manter o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico Kundur et al. (2004). Este tipo de instabilidade pode ocorrer devido ao aumento nas oscilações angulares de alguns geradores, ou seja, é influenciada pelas dinâmicas do rotor e relações potência-ângulo.

A estabilidade de ângulo do rotor pode ser caracterizada em outras duas: estabilidade a pequenas perturbações e estabilidade transitória.

A primeira depende do estado inicial de operação do sistema e a resposta resultante pode ser linearizada. Já a segunda, além de depender do estado operacional do sistema, depende também de quão severo é o distúrbio como, por exemplo, um curto-circuito. As respostas para esses envolvem grandes excursões dos ângulos do rotor do gerador e não podem ser linearizadas.

4.1.2 Estabilidade de Frequência

Este tipo de estabilidade está relacionado com um desequilíbrio entre carga-geração e à capacidade do sistema em manter a frequência constante após tal perturbação, restaurando o equilíbrio entre a geração e a carga, gerando perda mínima. Se houver um excesso na geração, a frequência irá aumentar fazendo as máquinas acelerarem e por outro lado se a demanda for elevada, a frequência tende a diminuir, freando as máquinas.

Segundo Kundur et al. (2004), em grandes sistemas de energia interconectados, esta situação é associada a condições após a divisão do sistema e ilhas. A estabilidade é avaliada se cada ilha é capaz de encontrar um novo ponto de equilíbrio operacional

com perda mínima não intencional. Analisando tal fato é possível observar que a inércia do sistema é muito importante, pois quanto menor a inércia mais sensível o sistema é e quanto maior a inércia maior é a resistência do sistema quando submetido a este tipo de instabilidade.

4.1.3 Estabilidade de Tensão

A estabilidade de tensão está associada à capacidade do sistema em manter os níveis de tensão constantes em todas as barras do sistema, após ser submetido a uma perturbação, sendo ela decorrente do aumento de carga ou mudança na configuração do mesmo (KUNDUR et al., 2004). Depende da capacidade de restauração do equilíbrio entre a demanda de carga e o suprimento de carga do sistema. Além disso, tem-se o risco de instabilidade de sobretensão e foi experimentando pelo menos em um sistema segundo Cutsem e Mailhot (1997).

Como na estabilidade do ângulo do rotor, a estabilidade de tensão pode ser classificada em duas: estabilidade a pequenas e a grandes perturbações Kundur et al. (2004). A primeira está relacionada com a capacidade do sistema em manter as tensões constantes mediante pequenas alterações, como mudança de carga. A segunda é relacionada com a capacidade do sistema em manter as tensões constantes após perturbações severas, como perda de geração, falhas no sistema ou contingências no circuito.

A estabilidade de tensão pode ser estudada com base em dois métodos: dinâmicos ou estáticos. No primeiro método, as equações que modelam o sistema não são lineares, pois informam todas as características dinâmicas da rede que levam à instabilidade. Por isso, este método possui um elevado custo computacional.

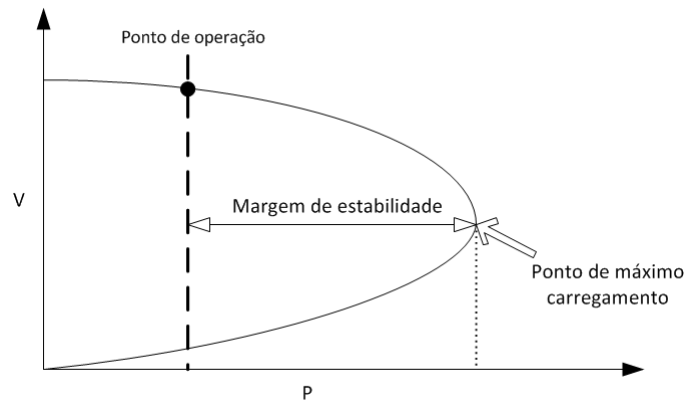
Considerando que as dinâmicas analisadas têm um comportamento lento, tal análise pode ser estudada com base em métodos estáticos, que apesar de não informarem todos os fatores que influenciam na instabilidade, produzem resultados aproximados daqueles obtidos pelo método dinâmico, além de ter um custo baixo e análise rápida do ponto de vista computacional.

Um exemplo de método estático são as curvas P-V e Q-V, descritas em Gubina e Strmcnik (1995), que informam até qual ponto a rede pode suprir determinada carga sem que entre em colapso e a compensação reativa do sistema.

Na Figura 7, tem-se a curva P-V e nela pode ser analisada a margem de estabilidade do sistema que depende do ponto de operação e o ponto de máximo carregamento da rede. Os valores de tensão que se encontram acima do ponto de máximo carregamento são considerados estáveis e os valores abaixo instáveis.

Para modelar esta curva utilizam-se os valores obtidos no método de fluxo de potência, nele é informado o valor dos parâmetros da rede para determinada carga. O valor da carga e geração é aumentado até atingir um critério pré-estabelecido e assim determina a tensão de uma barra para certa potência ativa (P).

Figura 7 – Representação de uma curva P-V



Fonte: Gubina e Strmcnik (1995)

Outra maneira de obter o ponto de máximo carregamento é através do fator de carregamento λ , que é um escalar que multiplica todas as cargas do sistema de acordo com as equações 4.1 e 4.2:

$$\lambda P_k^n - P_k^c = 0 \in \text{Barras PQ, PV} \quad (4.1)$$

$$\lambda Q_k^n - Q_k^c = 0 \in \text{Barras PQ} \quad (4.2)$$

Em que:

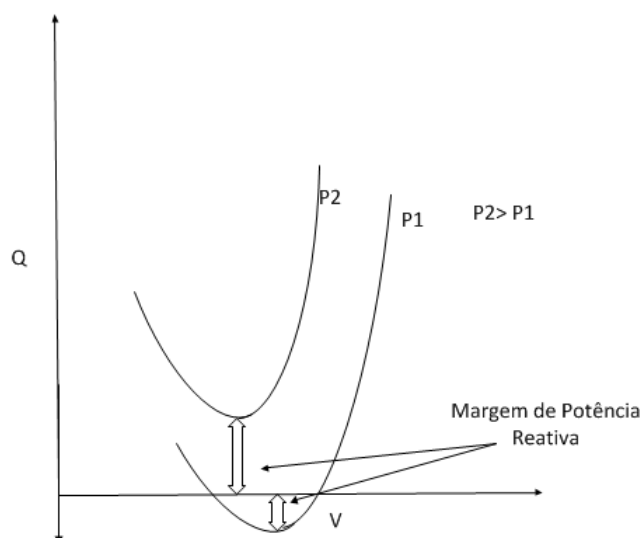
- P_k^n é a potência ativa nominal na barra k;
- P_k^c é a potência ativa considerada na barra k;
- Q_k^n é a potência reativa nominal na barra k;
- Q_k^c é a potência reativa considerada na barra k.

Outra curva utilizada para análise estática é a curva Q-V. Esta define a relação de suporte reativo em uma barra e a tensão nesta mesma barra. Através desta curva pode-se determinar qual a margem de potência reativa, definida pela distância entre o vale da curva e o eixo da tensão e, além disso, estipular o quanto de potência reativa o sistema necessita.

Para uma potência ativa P constante é possível traçar a curva Q-V. O ponto crítico, que indica o ponto de colapso de tensão, é definido como sendo o ponto onde a margem de potência reativa é nula. Na Figura 8 observa-se uma margem de potência reativa negativa necessária em uma dada barra para que a demanda P2 possa ser atendida.

Portanto, traçando a curva Q-V, sabe-se quais barras em uma rede estão em condição crítica, podendo fazer as devidas correções.

Figura 8 – Representação de uma curva Q-V



Fonte: Gubina e Strmcnik (1995)

4.2 Índice de Proximidade ao Colapso de Tensão

Para análise da estabilidade de tensão é necessário ter algum parâmetro que indique o quão próximo a rede se encontra do colapso. Embora, essencialmente, o sistema tenha um comportamento dinâmico, ou seja, não linear, os métodos estáticos permitem um melhor entendimento dos mecanismos que levam ao colapso da tensão, pois o ponto que indica o limite da estabilidade tem um comportamento também não linear e torna difícil a criação de um índice linear capaz de fornecer a margem de estabilidade a partir de um ponto de equilíbrio.

A análise feita através dos métodos estáticos é capaz de fornecer índices que preveem indícios de proximidade ao colapso de tensão da rede. Através desses índices encontram-se medidas escalares, indicando a proximidade ao colapso, que podem ser monitoradas em tempo online ou off-line pelos operadores. Tais índices devem possuir baixo custo computacional.

Há alguns métodos já estudados para análise do ponto de colapso de tensão como, por exemplo, o índice baseado nas perdas de potência ativa descrito em Nema et al. (1996) e o índice baseado na matriz de sensibilidade (Jacobiana) descrito em Silveira (2003). Neste trabalho, a abordagem será feita mediante os fasores de tensão em cada barra, proposto por Gubina e Strmcnik (1995), o TPSI, que além de ser simples, demanda pequeno esforço computacional.

4.2.1 Índice de estabilidade TPSI

O índice de estabilidade TPSI, do inglês Transmission Path Stability Index, se baseia em fasores. Segundo Gubina e Strmcnik (1995), esses fasores contêm informações

suficientes para detectar a margem de estabilidade de tensão.

Considerando um caso simples com um barramento gerador e o outro de carga, é possível saber a condição crítica para operação estável indicado pela equação 4.3:

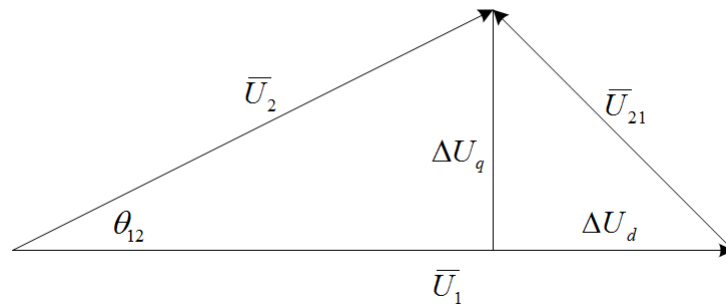
$$\Delta U_{12} = |\bar{U}_1 - \bar{U}_2| = U_2 \quad (4.3)$$

Em que:

- \bar{U}_1 é o fasor de tensão da barra 1;
- \bar{U}_2 é o fasor de tensão da barra 2;
- U_2 é a magnitude do fasor \bar{U}_2 ;

O diagrama fasorial é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama Fasorial para um Sistema de 2 barras



Fonte: Gubina e Strmcnik (1995)

Ele ilustra a projeção do vetor tensão da barra 2 no vetor tensão da barra 1, $U_2 \cos \theta_{12}$, e fazendo a diferença entre o vetor projetado e o vetor da barra geradora, \bar{U}_1 , obtém-se ΔU_d . Em caso crítico o ΔU_d é igual a $U_2 \cos \theta_{12}$. Comparando com a matriz Jacobiana, a condição crítica é obtida quando a matriz atinge a singularidade, equação 4.4:

$$\det(J) = \frac{\partial P_2 \partial Q_2}{\partial \theta_2 \partial U_2} - \frac{\partial P_2 \partial Q_2}{\partial U_2 \partial \theta_2} = 0 \quad (4.4)$$

Em que:

- P é a potência ativa;
- Q é a potência reativa.

Considerando a expressão acima é possível encontrar uma condição para o limite de operação estável, equação 4.5:

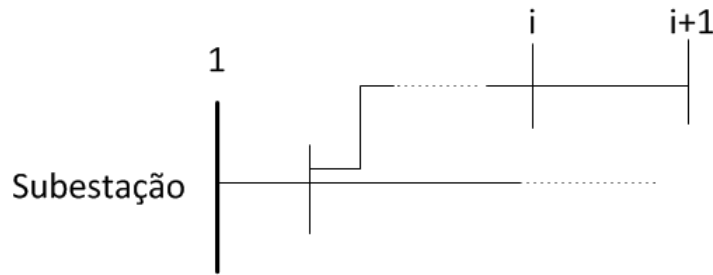
$$0.5U_1 = U_2 \cos \theta_{12} \quad (4.5)$$

Em que:

- $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$.

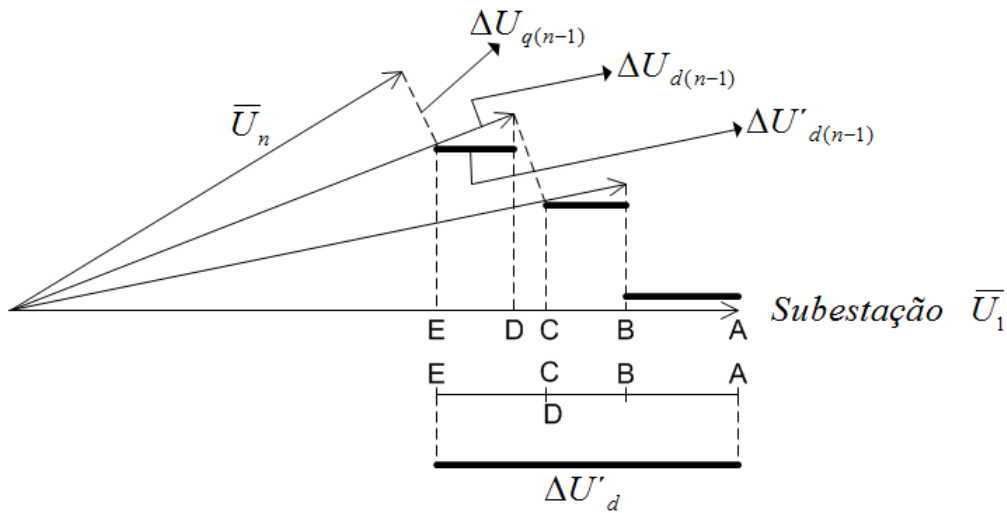
Agora será analisado um caminho de transmissão radial com n_p barras, Figura 10. Cada tensão nodal fasorial \hat{U}_{i+1} será projetada na barra da camada anterior \hat{U}_i , conforme ilustra a Figura 11. É gerado um ΔU_{di} , equação 4.6, que representa a diferença de tensão entre a barra projetada e a barra anterior, bem como um ΔU_{qi} que é essa diferença projetada perpendicularmente ao fasor da barra anterior, equação 4.7.

Figura 10 – Caminho de transmissão



Fonte: Gubina e Strmcnik (1995)

Figura 11 – Projeção das tensões ao longo do caminho de transmissão



Fonte: Gubina e Strmcnik (1995)

$$\Delta U_{di} = U_i - U_{i+1} \cos \theta_{i,i} \tag{4.6}$$

$$\Delta U_{qi} = U_{i+1} \sin \theta_{i,i+1} \tag{4.7}$$

Como pode ser observado na Figura 11, todas as componentes ΔU_{di} , são projetadas em direção ao fasor de geração \hat{U}_1 e a partir daí se encontra a queda de tensão corrigida $\Delta U'_{di}$ que é definida conforme equação 4.8:

$$\Delta U'_{di} = (U_i - U_{i+1} \cos \theta_{i,i+1}) \cos \theta_{1,i} \quad (4.8)$$

A queda de tensão corrigida total, $\Delta U'_d$, é dada pelo somatório de todas as quedas de tensão, $\Delta U'_{di}$, corrigidas conforme equação 4.9:

$$\Delta U'_d = \sum_{i=1}^{np-1} \Delta U'_{di} = \sum_{i=1}^{np-1} (U_i - U_{i+1} \cos \theta_{i,i+1}) \cos \theta_{1,i} \quad (4.9)$$

Em que:

- np é o número de barras do caminho de transmissão.

Portanto, o índice TPSI é definido como sendo a diferença entre a metade da magnitude do fasor de tensão da barra geradora, U_G , e a queda de tensão total corrigida ao longo do caminho de transmissão, conforme equação 4.10:

$$TPSI = 0.5U_G - \Delta U'_d \quad (4.10)$$

Os valores resultantes do índice TPSI são expressos em p.u e a análise desses resultados é realizada da seguinte maneira: se o valor for igual a zero, significa que aquele caminho de transmissão transfere a potência total e qualquer demanda a mais implicará em colapso de tensão naquele ponto. Chama-se de ponto crítico o caminho com menor índice e de barra crítica a barra associada.

4.2.1.1 Análise do índice TPSI para um sistema de 33 barras

O sistema apresentado na Figura 12 representa uma rede de 33 barras. Como se percebe, para esta rede existe quatro caminhos para a transmissão de energia, onde as barras terminais são: 18, 22, 25 e 33. Os dados da rede se encontram no Apêndice C.

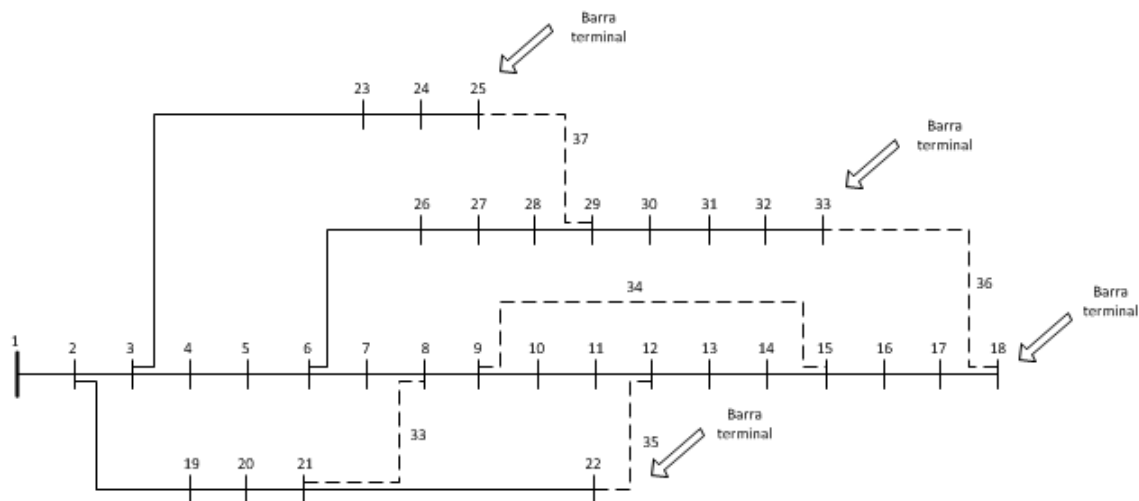
Primeiramente, encontrou-se o estado da rede através do método de fluxo back-and-forward sweep para um fator de carregamento igual a 1 e foi aumentando o mesmo até o método não convergir mais.

Considerando um patamar (fator de carga f.c.) de carga, calculou-se o valor do índice TPSI para os quatro caminhos de transmissão. A Figura 13 ilustra o estado da rede para o patamar de carga leve (f.c = 1.0) e pesado (f.c = 3.6).

As Tabelas 1 e 2 informam o valor TPSI para cada fator de carregamento citado anteriormente.

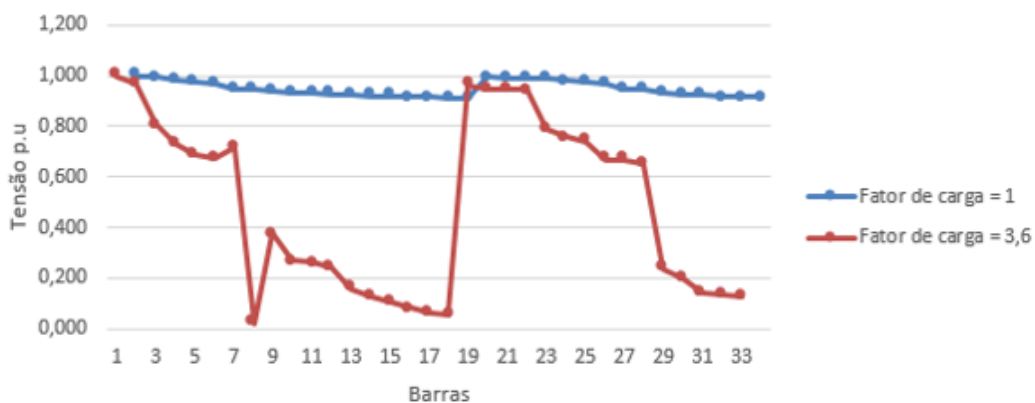
Para melhor entendimento do comportamento do índice após carregamento do sistema, foi gerada a Figura 14.

Figura 12 – Sistema radial de 33 barras



Fonte: Do autor

Figura 13 – Estado da rede de 33 barras para dois patamares de carregamento



Fonte: Do autor

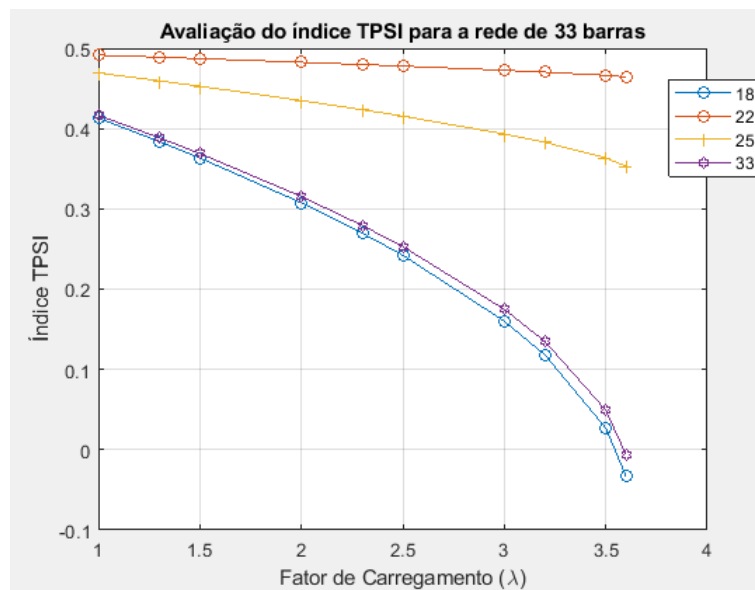
Tabela 1 – Valor TPSI para fator de carregamento unitário

Barras finais	Valor TPSI
18	0.413
22	0.491
25	0.469
33	0.416

Tabela 2 – Valor TPSI para fator de carregamento igual a 3,6

Barras finais	Valor TPSI
18	-0.033
22	0.464
25	0.352
33	-0.006

Figura 14 – Comportamento do índice TPSI em um sistema de 33 barras



Fonte: Do autor

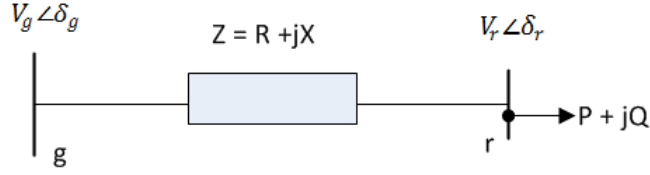
Como se percebe, dentre os caminhos de transmissão disponíveis, os caminhos das barras terminais 18 e 33 são os que se encontram em situação mais crítica, pois, conforme citado anteriormente, os índices TPSI mais próximos de zero indicam que a potência está no seu limiar e qualquer demanda a mais ocasionaria um colapso naquele ponto. No exemplo feito, nos caminhos críticos supracitados já haveria um colapso da tensão para a demanda máxima utilizada, visto que os índices se encontram abaixo de zero.

Uma solução seria reconfigurar a topologia da rede, visando que esta topologia suporte maior demanda.

4.2.2 Índice de estabilidade baseado na transferência de potência ativa e reativa

Este índice de estabilidade foi proposto por Eminoglu e Hocaoglu (2007). Para o desenvolvimento dele é necessário utilizar a equação de potência ativa e reativa transferida na linha de distribuição e, além disso, requer a solução do fluxo de potência em qualquer ponto de operação. Considerando os dados da Figura 15, segue o processo matemático para encontrar o índice analisado.

Figura 15 – Representação de uma linha de transmissão de duas barras do sistema de distribuição



Fonte: Do autor

A equação quadrática utilizada, principalmente, para o cálculo das tensões finais de envio de linha, na análise do fluxo de potência, é descrita na equação 4.11:

$$V_g^4 + 2V_g^2(PR + QX) - V_g^2V_r^2 + (P^2 + Q^2)|Z|^2 \quad (4.11)$$

É possível estratificar a equação acima em outras duas: equação 4.12 - Potência ativa e equação 4.13 - Potência reativa:

$$P = \frac{-\cos(\theta_z)V_r^2 \pm \sqrt{\cos^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - |Z|^2Q^2 - 2V_r^2QX + V_g^2V_r^2}}{|Z|} \quad (4.12)$$

$$Q = \frac{-\sin(\theta_z)V_r^2 \pm \sqrt{\sin^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - |Z|^2P^2 - 2V_r^2PR + V_g^2V_r^2}}{|Z|} \quad (4.13)$$

As condições para que o valor real de potência ativa e reativa exista na barra receptora é, segundo as equações 4.14 e 4.15:

$$\cos^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - |Z|^2Q^2 - 2V_r^2QX + V_g^2V_r^2 \geq 0 \quad (4.14)$$

$$\sin^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - |Z|^2P^2 - 2V_r^2PR + V_g^2V_r^2 \geq 0 \quad (4.15)$$

Somando cada lado das equações 4.14 e 4.15, obtém-se a equação 4.16 resultante:

$$2V_g^2V_r^2 - V_r^4 - 2V_r^2(PR + QX) - |Z|^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (4.16)$$

Analizando a equação 4.16, certifica-se que a medida que aumenta os valores da impedância de linha e a potência a ser transferida, o valor da equação diminui. Portanto, essa equação será usada como índice de estabilidade para as redes de distribuição (equação 4.17).

$$SI(r) = 2V_g^2V_r^2 - V_r^4 - 2V_r^2(PR + QX) - |Z|^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (4.17)$$

Em que:

- V_g é a tensão na barra geradora (subestação);
- V_r é a tensão na barra receptora(carga);
- P é a potência ativa na barra de carga;
- Q é a potência reativa na barra de carga;
- Z é a impedância da linha de distribuição;
- R é a resistência da linha de distribuição;
- X é a reatância da linha de distribuição.

5 Reconfiguração de Sistemas de Distribuição

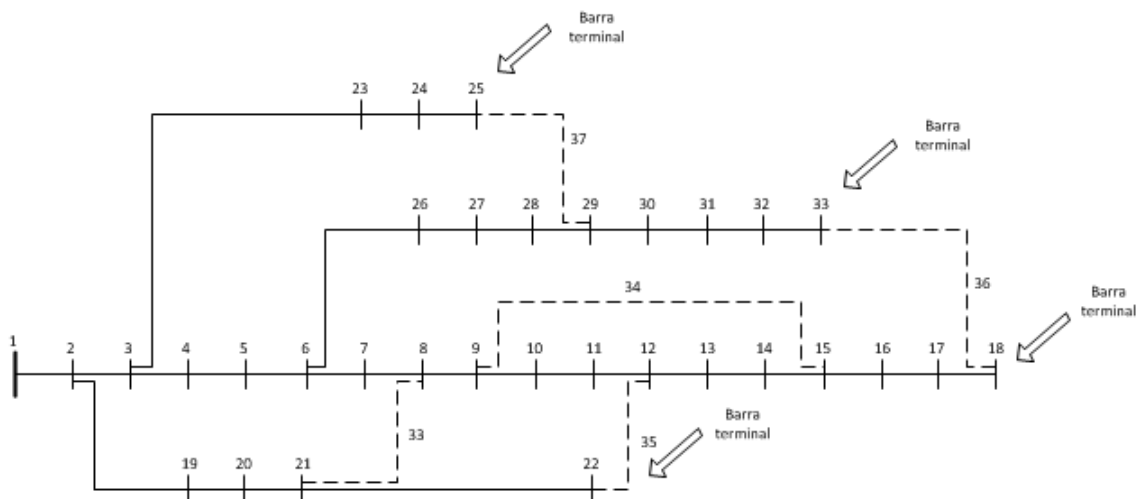
Os sistemas de distribuição são caracterizados por sua construção malhada com operação radial, ou seja, alguns trechos estão abertos. Isto é feito para facilitar a manutenção além de visar uma proteção adequada. Em contrapartida, para esse tipo de topologia, outros problemas operacionais surgem, como, por exemplo, a inexistência de caminhos alternativos para fornecimento de energia. Pelo fato dos SDEE serem malhados, é possível a mudança topológica, transferindo barramentos de carga de um alimentador para outro e no final a operação é feita radialmente.

A transferência de carga é feita através da abertura ou fechamento de chaves que interligam o SDEE e a este processo se dá o nome de reconfiguração. A reconfiguração pode ser utilizada para controle da rede em tempo real ou como um planejamento que possibilita conhecer a melhor topologia para que o sistema possa ser estável, tenha menos perdas ou até mesmo quanto tempo o sistema pode suprir determinada carga sem expandir sua área.

A disposição dessas chaves pode ser tratada como um problema de otimização combinatória, onde a configuração das chaves levaria a uma função custo que atendesse um objetivo. Para exemplificar, aplicou-se a reconfiguração no sistema de 33 barras apresentado no capítulo 4, considerando 2 topologias radiais, ilustradas nas Figuras 16 e 17.

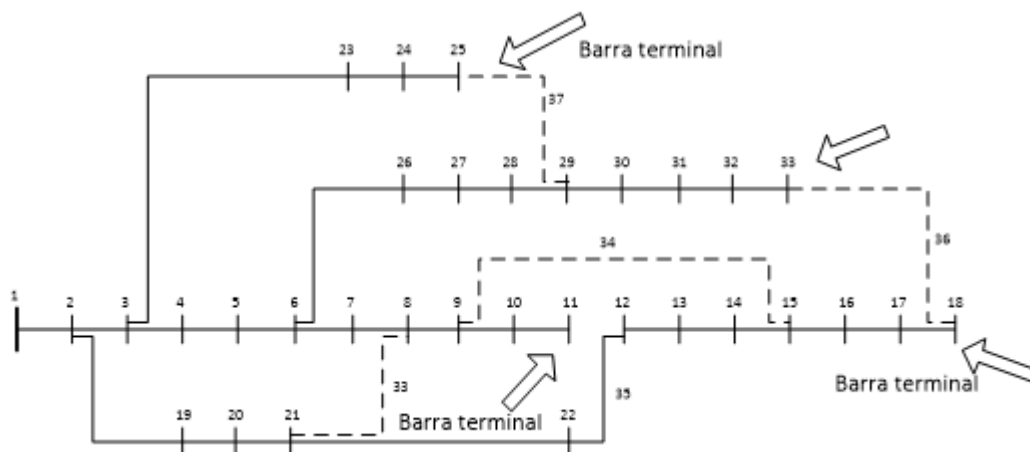
Para avaliar o índice TPSI nessas topologias, foi considerado um patamar pesado igual a 3.6 e os resultados são mostrados nas Tabelas 3 e 4.

Figura 16 – Sistema radial de 33 barras – Topologia 1



Fonte: Do autor

Figura 17 – Sistema radial de 33 barras – Topologia 2



Fonte: Do autor

Tabela 3 – Valor TPSI –Topologia 1

Barras Finais	Valor TPSI
18	-0.033
22	0.464
25	0.352
33	-0.006

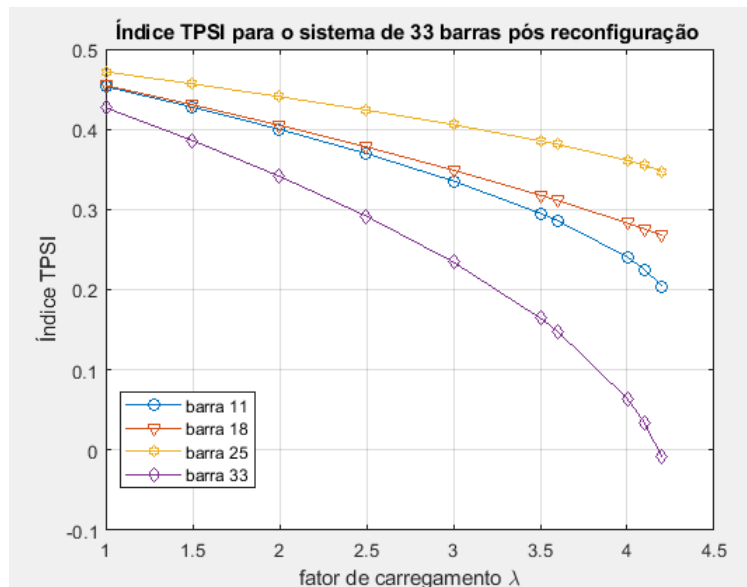
Tabela 4 – Valor TPSI –Topologia 2

Barras Finais	Valor TPSI
11	0.285
18	0.311
25	0.381
33	0.147

Pode-se extrair dos resultados e de acordo com a Figura 18, que o sistema passa a operar de forma estável na topologia 2, conseqüentemente a reconfiguração é uma alternativa no planejamento da expansão, visando maior suporte de carga à rede.

Para este trabalho, o objetivo é encontrar uma topologia que indique estabilidade no SDEE. Utilizar-se-á o algoritmo SC que é descrito no próximo tópico.

Figura 18 – Comportamento do índice TPSI em um sistema de 33 barras após reconfiguração



Fonte: Do autor

5.1 Algoritmo Seleção Clonal

5.1.1 Sistema Imunológico

No trabalho de Castro e Zuben (2002) foi proposto o Algoritmo SC, baseado nos fenômenos biológicos que ocorrem no Sistema Imunológico (SI) dos indivíduos, que é responsável pela defesa do organismo contra Agentes Infecciosos (AINF). Este SI é caracterizado por sua capacidade de aprendizagem e memória, extraindo informações dos AINF para utilizá-las na ocorrência de novas infecções.

O SI é composto por dois tipos de defesa: Sistema Imunológico Adaptativo (SIA) e o Sistema Imunológico Inato (SII). Este último já nasce com o indivíduo, sendo disponibilizado para atacar patógenos invasores. No entanto, no SIA, células de defesas são produzidas à medida que o organismo é infectado e elas permanecem mostrando as infecções às quais o organismo está sujeito. A resposta imune adaptativa consiste na imunidade à infecção provocada pelo mesmo AINF. Trabalhando de forma harmônica, os dois sistemas garantem resistência do corpo às enfermidades.

5.1.1.1 Sistema Imunológico Adaptativo

No SIA, os Linfócitos são as principais células, sendo elas portadoras de receptores de antígeno com uma única especificidade. Esta especificidade é desenvolvida no linfócito gerando um rearranjo genético com o objetivo de gerar centenas de distintas variantes dos genes codificadores de moléculas receptoras. Desta maneira, o organismo consegue ter milhões de linfócitos com milhões de especificidades distintas. No entanto, na vida de um

indivíduo, somente os linfócitos que encontrem um antígeno com o qual pode interagir é que serão selecionados para se proliferarem e se diferenciarem em células de memória.

5.1.2 Princípio da Seleção Clonal

Quando um indivíduo é exposto a um antígeno – AINF, células de respostas – Linfócitos B (LFB), são derivadas da medula óssea produzindo Anticorpos (AC). Cada LFB produz apenas um tipo de AC, dos quais um é relativamente específico para o AINF. Ao se ligar ao AC e com ajuda de células assessoras, como a T-Helper, o antígeno estimula a célula B a proliferar (dividir) e amadurecer em células (não divisíveis) secretoras de anticorpos terminais, chamadas células plasmáticas. As várias divisões celulares (mitose) geram clones, ou seja, um conjunto de células advindas de uma única célula. Enquanto as células plasmáticas são as mais ativas secretoras de AC, os LFB, que se dividem rapidamente, também secretam AC, porém numa taxa mais baixa e, ademais, as células T são responsáveis pela regulação da resposta das células B e são preeminentes nas respostas imunes mediadas por células.

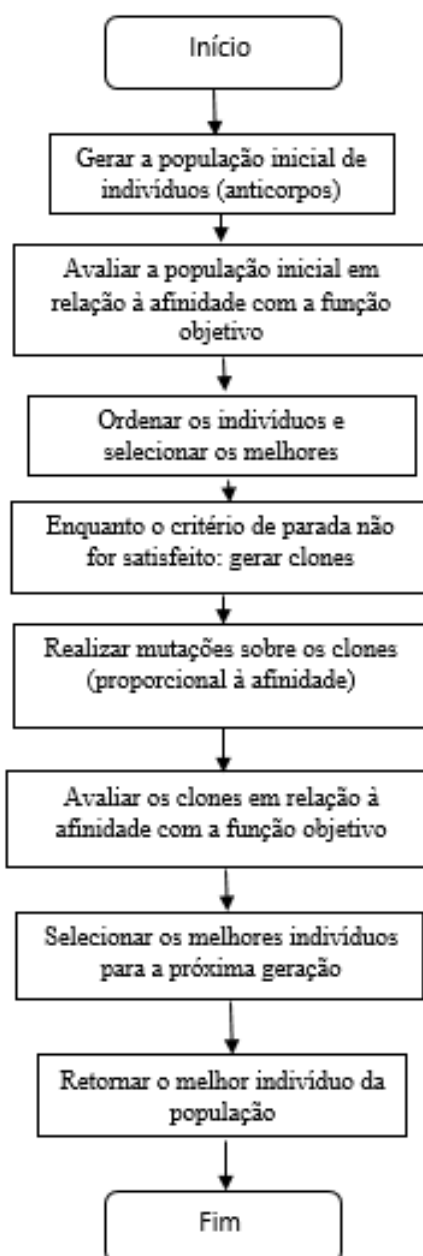
Além dos LFB se proliferarem e se diferenciarem em células plasmáticas, eles podem se diferenciar em células B de memória de longa duração. Estas células circulam pelo sangue, linfa e tecidos e, quando expostas a um segundo estímulo antigênico, começa a se diferenciar em linfócitos capazes de produzir AC de alta afinidade, pré-selecionados para o antígeno específico que estimulou a resposta primária

5.1.3 Pseudocódigo do Algoritmo Seleção Clonal

O pseudocódigo do Algoritmo SC é descrito abaixo e, em seguida, o fluxograma do mesmo é apresentado na Figura 19:

1. Gerar a população inicial de indivíduos (anticorpos);
2. Avaliar a população inicial em relação à afinidade com a função objetivo;
3. Ordenar os indivíduos e selecionar os melhores;
4. Enquanto o critério de parada não for satisfeito: gerar clones;
5. Realizar mutações sobre os clones (proporcional à afinidade);
6. Avaliar os clones em relação à afinidade com a função objetivo;
7. Selecionar os melhores indivíduos para a próxima geração;
8. Retornar o melhor indivíduo da população.

Figura 19 – Fluxograma do Algoritmo Seleção Clonal



Fonte: Do autor

5.2 Modelagem matemática do problema

O problema de reconfiguração dos SDEE pode ser modelado como uma otimização não linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução (do problema de estabilidade de tensão) engloba a seleção, dentre todas as configurações possíveis, daquela que suporte um maior carregamento, mantendo a tensão dentro dos padrões, além disso, que satisfaça algumas restrições. *A reconfiguração dos sistemas de distribuição é um problema que envolve restrições* (LI et al., 2017). Desta forma, este problema pode ser formulado conforme equação 5.1:

$$\text{Maximizar}[fa_{kb}] = \text{min}[TPSI_{kb}] \quad (5.1)$$

Em que:

- k: configuração radial factível de uma determinada configuração do sistema;
- b: número da barra na configuração k;
- fa_{kb} : função objetivo que representa o mínimo valor de TPSI dentre todas as barras da configuração k;
- $TPSI_{kb}$: índice de estabilidade de tensão das barras finais.

s.a

- Restrições de fluxo de carga;
- Níveis de tensão;
- Confiabilidade do Sistema;
- Balanço de carga entre os alimentadores;
- Radialidade.

Radialidade: Os sistemas de distribuição devem operar de forma radial, levando energia sempre da fonte para a carga (consumidores). As chaves devem ser configuradas de tal forma que esse critério seja obedecido.

Estabilidade de tensão: A magnitude de tensão nas barras deve atender a restrição apresentada na equação 5.2:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}, i = 1, 2, 3 \dots N_b \quad (5.2)$$

Em que:

- N_b é o total de barras do sistema;

- V_{min} é o limite mínimo de tensão permitido;
- V_{max} é o limite máximo de tensão permitido.

Capacidade das linhas: De igual forma, as correntes devem atender o seguinte critério de corrente nas linhas conforme indica a equação 5.3

$$|I_j| < I_{max}, j = 1, 2, 3 \dots N_l \quad (5.3)$$

Em que:

- N_l é o total de trechos do sistema;
- $|I_j|$ é o módulo da corrente na j -ésima linha;
- I_{max} é a capacidade de corrente em cada linha.

Devido a natureza combinatória do problema (equação 5.1) e a restrição de radialidade, torna-se difícil representá-lo através de relações algébricas e, portanto, dificulta a utilização de técnicas tradicionais de otimização para a solução do mesmo. Para as redes testadas, considerou-se que todos os trechos poderiam conter chaves, estando elas fechadas (chaves seccionadoras) ou abertas (chaves de interconecção). Na realidade, nem todos os trechos possuem chaves de manobra e isso elevaria o número de restrições.

5.3 Aplicação da Seleção Clonal na reconfiguração dos Sistemas de Distribuição

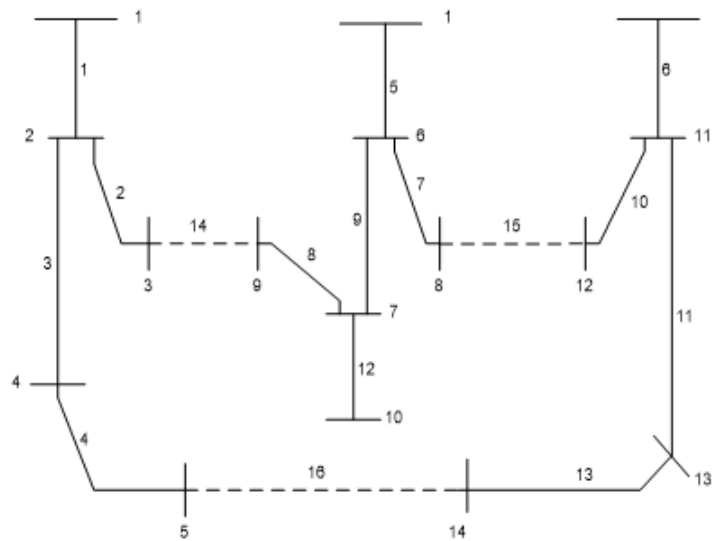
Uma analogia entre as variáveis do problema de otimização e o sistema imunológico pode ser feita e é apresentada a seguir:

- Antígeno: é o problema a ser minimizado (função objeto);
- Anticorpos: são as soluções candidatas para resolver o problema de otimização;
- Afinidade: é o valor de *fitness* dos anticorpos.

5.3.1 Representação de uma solução

O problema a ser tratado pode ser representado através do status das chaves da rede elétrica avaliada, ou seja, chaves fechadas assumem o valor “1” e chaves abertas assumem o valor “0”, como mostrado na Tabela 5 e representado na solução da Figura 20:

Figura 20 – Rede de 14 barras IEEE



Fonte: Do autor

Tabela 5 – Representação de uma solução

Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Chave	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

5.3.2 Avaliação de uma solução

Para avaliar a solução, utilizando esta técnica de otimização, é necessário determinar, a partir dos valores de tensão obtidos no fluxo de carga, o valor da equação 5.1 que é o índice de estabilidade de tensão, considerando as restrições do modelo. A tabela 6 indica o valor de solução para a Figura 20.

Tabela 6 – Representação da Avaliação de uma solução

Configuração- Chaves abertas	TPSI
14 15 16	3.55

5.3.3 População Inicial

Para determinar o tamanho da população avalia-se o tamanho do problema. Neste trabalho, para as redes testadas definiu-se o valor da população de indivíduos (anticorpos) como sendo 20. A população foi gerada randomicamente, respeitando as restrições do problema.

5.3.4 Processo de Clonagem

A proposta do algoritmo Clonal original propunha que os indivíduos mais aptos (maior valor da $f_{a_{kb}}$) é que deveriam possuir um maior número de clones, portanto, seguindo esta metodologia, a quantidade de clones gerados para cada indivíduo foi calculada utilizando a fórmula da equação 5.4:

$$C = (Q - (0.02 * P * Q)) * B \quad (5.4)$$

Em que:

- C é a quantidade de clones por indivíduo;
- Q é a quantidade certa de nós (chaves) do indivíduo;
- P é a classificação de um indivíduo em relação aos demais, sendo que o melhor indivíduo possui a classificação 0 e o pior recebe como classificação o valor n, equivalente ao tamanho da população;
- B é uma constante definida como 0.8.

5.3.5 Operadores de mutação

A mutação ocorre apenas nos clones, aos quais é atribuído uma intensidade de mutação I, que varia de acordo com uma função de aptidão apresentada na equação 5.5. Os clones mais aptos sofrem pouca alteração e os clones de anticorpos menos aptos mais alterações.

$$I = \left(\left(\frac{B - 0.1}{Q} \right) * P * 0.1 \right) * 10 \quad (5.5)$$

Foram criados dois operadores de mutação: *troca de chaves aleatórias* e *troca de chaves com maior probabilidade*, baseada numa heurística de Shirmohammadi et al. (1988).

Troca de chaves aleatórias: Fecha-se aleatoriamente uma chave de interconecção do clone avaliado. Escolhe-se aleatoriamente uma chave a ser aberta no laço formado e, gera-se uma nova solução radial (clone mutado). Por exemplo, fazendo uma mutação na solução da Tabela 5 e Figura 20, sorteia-se aleatoriamente a chave 14 para se fechar, formando um laço pelas chaves 1,2,14,8,9 e 5 e abre-se uma chave desta lista de forma aleatória.

Troca de chaves com maior probabilidade: Fecha-se aleatoriamente uma chave de interconecção do clone avaliado formando um laço. Utilizando a heurística proposta em Shirmohammadi et al. (1988), constrói-se uma lista ordenada de chaves candidatas, onde a primeira tem maior probabilidade de ser aberta observando as perdas. Em seguida, abre-se aleatoriamente 20% do grupo de chaves com maior probabilidade de mitigar as perdas elétricas ativas. Assim, uma nova solução radial é gerada (clone mutado). Por exemplo,

fazendo uma mutação na solução da Tabela 5, sorteia-se aleatoriamente a chave 14 para se fechar, formando um laço pelas chaves 1,2,14,8,9 e 5. Ordena-se esta lista (2, 8, 9, 5 e 1) e escolhe-se aleatoriamente uma das primeiras chaves (20% da lista).

5.3.6 Escolha da próxima população

O método descrito em Reeves (1993) foi utilizado no algoritmo com o objetivo de gerar diversidade entre as soluções escolhidas. Ele permite que qualquer solução seja escolhida para passar para a próxima geração, porém soluções mais aptas têm maior probabilidade. O tamanho da população é sempre mantido. Ao final de cada geração aplica-se o método da roleta sobre cada conjunto de anticorpos formado por um pai e seus clones. O método da roleta seleciona apenas um indivíduo em cada conjunto e esse é repassado para a próxima geração.

5.3.7 Critério de Parada

A Seleção Clonal implementada para este trabalho utiliza como critério de parada o número de populações geradas. O algoritmo foi executado considerando um número máximo de 20 e 50 gerações para as redes testadas, retornando como solução o melhor indivíduo encontrado nesta população.

6 Resultados

A metodologia foi aplicada em duas redes elétricas, uma de 33 barras e outra de 135 barras, disponíveis nos apêndices A e B, referenciadas em Guimaraes, Lorenzetti e Castro (2004). A Tabela 7 ilustra os parâmetros para as duas redes utilizadas.

Tabela 7 – Parâmetros próprios da metodologia

Parâmetros	Valor	
	33 barras	135 barras
População (Quantidade de anticorpos)	10	30
Q	37	156
Operador de mutação	Troca aleatória de chaves	
	Troca de chaves utilizando uma heurística	
Critério de parada	20 gerações	50 gerações
Quantidade (%) de clones que substituíram anticorpos (pior fitness)	20%	

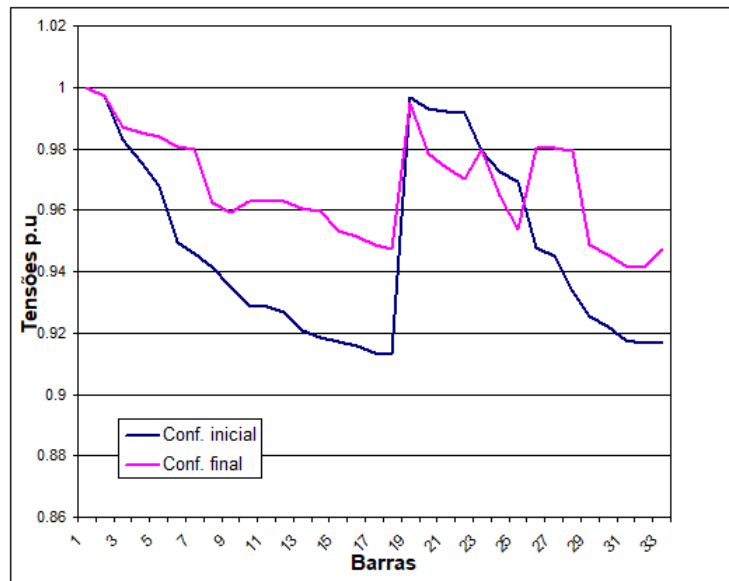
A Tabela 8 ilustra os quatro melhores resultados obtidos pela metodologia aplicada na rede de 33 barras do IEEE (Melhor 1, Melhor 2, Melhor 3, Melhor 4). Ela também mostra os resultados encontrados pelas Metaheurísticas: Busca em Vizinhança Variável (VNS) em Zviatcovich (2006), Tabu Search (TS) em Guimaraes, Lorenzetti e Castro (2004) e Otimização por Nuvens de Partículas (ONP) em Guerra, Manso e Araújo (2014). O Melhor 1 encontrado pela Seleção Clonal deste trabalho foi o mesmo encontrado na literatura indicada. Entretanto, o Melhor 2 representa a menor perda elétrica já encontrada na literatura.

Tabela 8 – Resultados do Sistema de 33 barras

Configuração	Chaves abertas	λ	Perdas (kW)
Inicial	33 34 35 36 37	3.55	202.7
Melhor 1 (VNS,TS,ONP)	7 10 14 28 32	5.247	140.7
Melhor 2(Mínimas perdas)	7 9 14 32 37	5.246	139.5
Melhor 3	3 7 9 13 27 32	5.041	146.83
Melhor 4	4 7 11 28 32 34	5.002	143.18

A Figura 21 demonstra o comportamento das tensões para este sistema antes e após reconfiguração. Observa-se que o perfil das tensões foi melhorado.

Figura 21 – Perfil das tensões da rede de 33 barras da IEEE



Fonte: Do autor

Uma rede de 135 barras também foi testada com 13,8 kV, carga total de 18313,81 kW, 21 chaves abertas e considerando todos os trechos com chaves de manobra.

Analisando a Tabela 9, observa-se que o Melhor 1 não foi encontrado pela metodologia SC, embora ter sido encontrado nas outras metodologias da literatura. A SC encontrou o Melhor 2 e o Mínimas Perdas, sendo que o primeiro resultado suportou um maior carregamento quando comparado ao segundo, apesar de não possuir perdas mínimas.

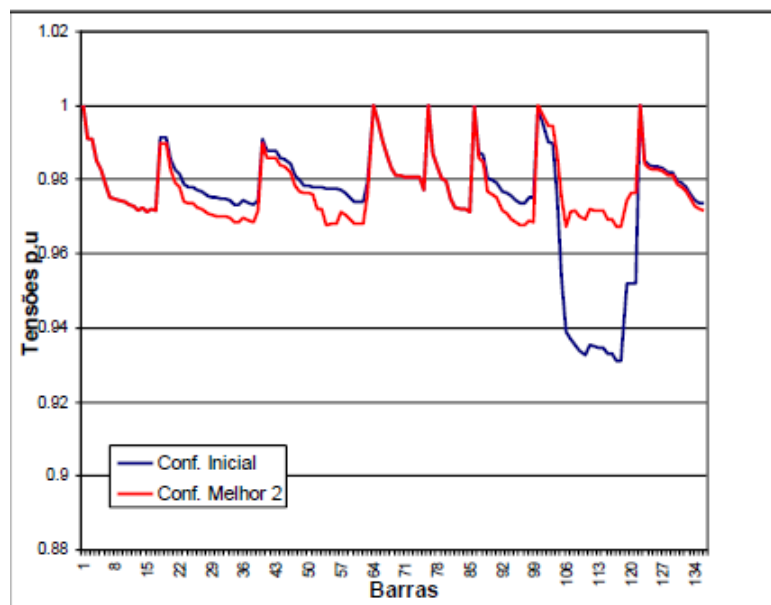
A Figura 22 ilustra o comportamento do perfil das tensões antes e após a reconfiguração. É observado que diante do aumento da capacidade da rede em suportar carga o perfil das tensões é aprimorado.

A Figura 23 ilustra o comportamento da metodologia para o sistema de 135 barras. Nota-se que nas primeiras populações, o melhoramento da função objetivo é mais rápida, em contrapartida, ao aproximar-se da função objetivo, o número de populações aumenta significativamente como esperado.

Tabela 9 – Resultados do Sistema de 135 barras

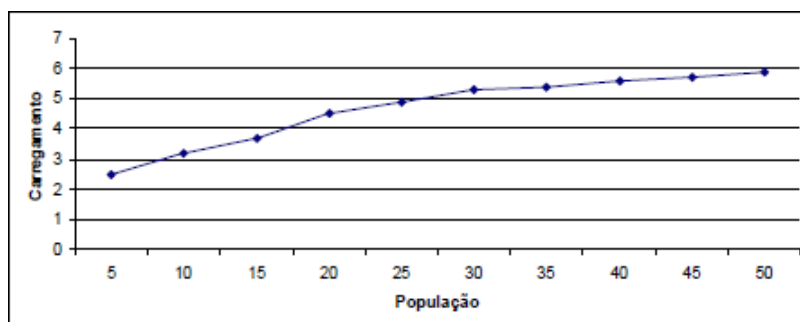
Conf.	Chaves abertas	Perda (kW)				Carregamento (λ)			
		VNS	TS	ONP	SC	VNS	TS	ONP	SC
Inicial	136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156	320,27	320,27	320,27	320,27	3,70	3,70	3,70	3,70
Melhor 1	38 51 53 106 118 126 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 155 156	—	283,92	283,9	—	—	6,96	6,96	—
Melhor 2	38 51 53 106 119 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	284,44	—	284,44	284,44	6,81	—	6,81	6,81
(Mínimas Perdas)	7 35 51 90 96 106 118 126 135 137 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151 155	—	280,13	—	280,13	—	—	—	5,93

Figura 22 – Perfil das tensões da rede de 135 barras da IEEE



Fonte: Do autor

Figura 23 – Desempenho da metodologia



Fonte: Do autor

7 Conclusão

Diante dos resultados encontrados, conclui-se que a técnica “Seleção Clonal”, utilizada neste trabalho, constitui uma ferramenta alternativa e nova para a solução do problema de “Reconfiguração de Redes de Distribuição”, objetivando a melhoria das condições de estabilidade de tensão.

O procedimento aplicado ao operador de mutação da metodologia foi apropriado, pois permitiu encontrar resultados radiais diretos, ou seja, respeitou uma das restrições impostas no problema e, além disso, gerou resultados sem necessidade de modificação.

Os valores dos parâmetros próprios da Seleção Clonal foram definidos de modo experimental, através de testes. Essa característica é bastante comum entre as técnicas que utilizam metaheurísticas.

Analisando os resultados Melhor 1 e Perdas Mínimas, na rede de 135 barras, percebe-se que as configurações ótimas para mitigar as perdas e elevar o carregamento do sistema são diferentes. Em um ambiente onde a rede se encontra sobrecarregada deverá impor-se o critério de máximo carregamento (segurança) frente às demais condições (por exemplo perdas).

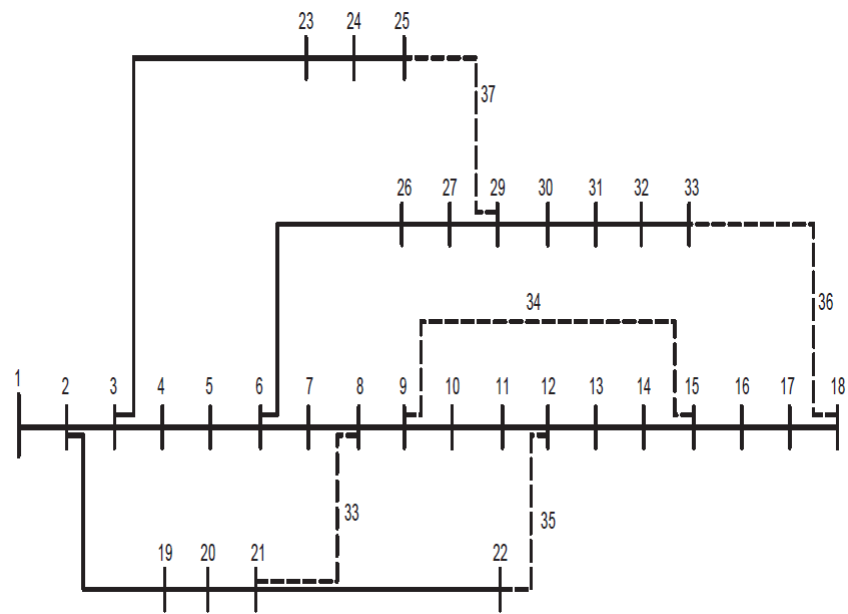
Ademais, ao comparar a metodologia aplicada com as encontradas na literatura, infere-se a eficiência da mesma, pois encontrou resultados de boa qualidade.

Referências

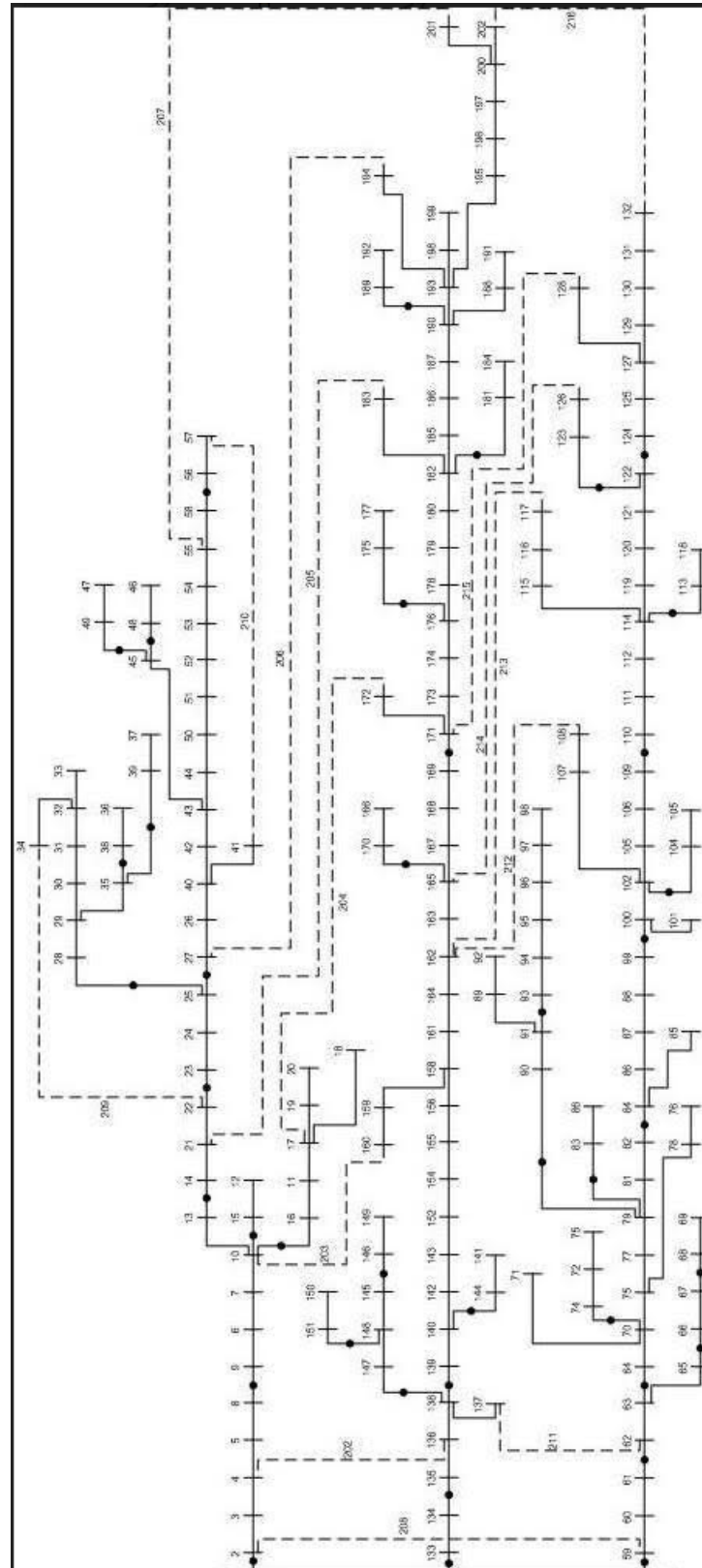
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST / Modulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica*. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. 15
- BRANDINI, A. Análise crítica de algoritmos de fluxo de carga usados em sistemas de distribuição radial. Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista–Faculdade de Engenharia de . . . , 2000. 19
- CANTARINO, M. et al. Análise de sensibilidade da margem de carregamento em sistemas elétricos de potência: Um estudo comparativo. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2007. 25
- CASTRO, L. N. D.; ZUBEN, F. J. V. Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 239–251, 2002. 39
- CHAKRAVORTY, M.; DAS, D. Voltage stability analysis of radial distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 129–135, 2001. 13
- CUTSEM, T. V.; MAILHOT, R. Validation of a fast voltage stability analysis method on the hydro-quebec system. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 282–292, 1997. 27
- EMINOGLU, U.; HOCAOGLU, M. A voltage stability index for radial distribution networks. In: IEEE. *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*. [S.l.], 2007. p. 408–413. 34
- GUBINA, F.; STRMCNIK, B. Voltage collapse proximity index determination using voltage phasors approach. *IEEE transactions on power systems*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 788–794, 1995. 27, 28, 29, 30, 31
- GUERRA, W.; MANSO, J.; ARAÚJO, I. Reconfiguração de sistemas de distribuição para o aumento da margem de segurança ao colapso de tensão utilizando onp. 2014. 47
- GUIMARAES, M. A.; LORENZETI, J. F.; CASTRO, C. A. Reconfiguration of distribution systems for stability margin enhancement using tabu search. In: IEEE. *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004*. [S.l.], 2004. v. 2, p. 1556–1561. 17, 47
- KASHEM, M.; GANAPATHY, V.; JASMON, G. Network reconfiguration for enhancement of voltage stability in distribution networks. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 147, n. 3, p. 171–175, 2000. 13, 17
- KAYAL, P.; CHANDA, S.; CHANDA, C. An ann based network reconfiguration approach for voltage stability improvement of distribution network. In: IEEE. *2011 International Conference on Power and Energy Systems*. [S.l.], 2011. p. 1–7. 17
- KERSTING, W. H. *Distribution system modeling and analysis*. [S.l.]: CRC press, 2006. 13

- KUMAR, G. S.; KUMAR, S. S.; KUMAR, S. J. Reconfiguration of electrical distribution network for loss reduction and voltage enhancement. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. [S.l.], 2017. p. 1387–1392. 17
- KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on Power Systems*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 1387–1401, 2004. 25, 26, 27
- LI, L. et al. Expanding the role of reactive transport models in critical zone processes. *Earth-science reviews*, Elsevier, v. 165, p. 280–301, 2017. 42
- LORENZETI, J. F. C. et al. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para a melhoria das condições de operação com relação à estabilidade de tensão. [sn], 2004. 13, 14
- MACHOWSKI, J.; BIALEK, J. W.; BUMBY, J. *Power system dynamics: stability and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 25, 26
- MISTRY, K.; ROY, R. Enhancement of voltage stability index of distribution system by network reconfiguration including static load model and daily load curve. In: IEEE. *ISGT2011-India*. [S.l.], 2011. p. 17–22. 17
- NEMA, O. M. S. et al. Índice de proximidade ao colapso de tensão baseado nas perdas de potencia ativa: investigação do potencial de utilização na análise de segurança em tempo real de sistemas eletricos. [sn], 1996. 29
- PAL, M. K. Voltage stability conditions considering load characteristics. *IEEE transactions on power systems*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 243–249, 1992. 13
- REEVES, C. R. *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1993. 46
- SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988. 19, 20, 45
- SILVEIRA, C. d. S. *Estudo de máximo carregamento em sistemas de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003. 29
- WU, H.; DONG, P.; LIU, M. Distribution network reconfiguration for loss reduction and voltage stability with random fuzzy uncertainties of renewable energy generation and load. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, 2018. 17
- ZVIETCOVICH, W. G. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006. 47

A Topologia da rede de 33 barras



B Topologia da rede de 135 barras



C Dados da rede de 33 barras

Dados Barras				Dados Linhas					
Barra	P (kW)	Q (kVAr)	Shunt (kVAr)	Linha	Barra Origem	Barra Destino	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Estado
1	0	0	0	1	1	2	0.0922	0.0470	1
2	100	60	0	2	2	3	0.4930	0.2511	1
3	90	40	0	3	3	4	0.3660	0.1864	1
4	120	80	0	4	4	5	0.3811	0.1941	1
5	60	30	0	5	5	6	0.8190	0.7070	1
6	60	20	0	6	6	7	0.1872	0.6188	1
7	200	100	0	7	7	8	0.7114	0.2351	1
8	200	100	0	8	8	9	1.0300	0.7400	1
9	60	20	0	9	9	10	1.0440	0.7400	1
10	60	20	0	10	10	11	0.1966	0.0650	1
11	45	30	0	11	11	12	0.3744	0.1238	1
12	60	35	0	12	12	13	1.4680	1.1550	1
13	60	35	0	13	13	14	0.5416	0.7129	1
14	120	80	0	14	14	15	0.5910	0.5260	1
15	60	10	0	15	15	16	0.7463	0.5454	1
16	60	20	0	16	16	17	1.2890	1.7210	1
17	90	40	0	17	17	18	0.7320	0.5740	1
18	90	40	0	18	2	19	0.1640	0.1565	1
19	90	40	0	19	19	20	1.5042	1.3554	1
20	90	40	0	20	20	21	0.4095	0.4784	1
21	90	40	0	21	21	22	0.7089	0.9373	1
22	90	40	0	22	3	23	0.4512	0.3083	1
23	90	50	0	23	23	24	0.8980	0.7091	1
24	420	200	0	24	24	25	0.8960	0.7011	1
25	420	200	0	25	6	26	0.2030	0.1034	1
26	60	25	0	26	26	27	0.2842	0.1447	1
27	60	25	0	27	27	28	1.0590	0.9337	1
28	60	20	0	28	28	29	0.8042	0.7006	1
29	120	70	0	29	29	30	0.5075	0.2585	1
30	200	600	0	30	30	31	0.9744	0.9630	1
31	150	70	0	31	31	32	0.3105	0.3619	1
32	210	100	0	32	32	33	0.3410	0.5302	1
33	60	40	0	33	8	21	2.0000	2.0000	0
				34	9	15	2.0000	2.0000	0
				35	12	22	2.0000	2.0000	0
				36	18	33	0.5000	0.5000	0
				37	25	29	0.5000	0.5000	0

D Dados da rede de 135 barras

Dados Barras				Dados Linhas					
Barra	P (kW)	Q (kVAr)	Shunt (kVAr)	Linha	Barra Origem	Barra Destino	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Estado
1	0.000	0.000	0.000	1	1	2	0.33205	0.76653	1
2	0.000	0.000	0.000	2	2	3	0.00188	0.00433	1
3	47.780	19.009	0.000	3	3	4	0.22340	0.51535	1
4	42.551	16.929	0.000	4	4	5	0.09943	0.22953	1
5	87.022	34.622	0.000	5	5	6	0.15571	0.35945	1
6	311.310	123.855	0.000	6	6	7	0.16321	0.37677	1
7	148.869	59.228	0.000	7	7	8	0.11444	0.26417	1
8	238.672	94.956	0.000	8	7	9	0.05675	0.05666	1
9	62.299	24.786	0.000	9	9	10	0.52124	0.27418	1
10	124.598	49.571	0.000	10	9	11	0.10877	0.10860	1
11	140.175	55.768	0.000	11	11	12	0.39803	0.20937	1
12	116.813	46.474	0.000	12	11	13	0.91744	0.31469	1
13	249.203	99.145	0.000	13	11	14	0.11823	0.11805	1
14	291.447	115.592	0.000	14	14	15	0.50228	0.26421	1
15	303.720	120.835	0.000	15	14	16	0.05675	0.05666	1
16	215.396	85.695	0.000	16	16	17	0.29379	0.15454	1
17	198.586	79.007	0.000	17	1	18	0.33205	0.76653	1
18	0.000	0.000	0.000	18	18	19	0.00188	0.00433	1
19	0.000	0.000	0.000	19	19	20	0.22324	0.51535	1
20	0.000	0.000	0.000	20	20	21	0.10881	0.25118	1
21	30.127	14.729	0.000	21	21	22	0.71078	0.37388	1
22	230.972	112.920	0.000	22	21	23	0.18197	0.42008	1
23	60.256	29.459	0.000	23	23	24	0.30326	0.15952	1
24	230.972	112.920	0.000	24	23	25	0.02439	0.05630	1
25	120.507	58.915	0.000	25	25	26	0.04502	0.10394	1
26	0.000	0.000	0.000	26	26	27	0.01876	0.04331	1
27	56.981	27.857	0.000	27	27	28	0.11823	0.11230	1
28	364.665	178.281	0.000	28	28	29	0.02365	0.02361	1
29	0.000	0.000	0.000	29	29	30	0.18954	0.09970	1
30	124.647	60.939	0.000	30	30	31	0.39803	0.20937	1
31	56.981	27.857	0.000	31	29	32	0.05675	0.05666	1
32	0.000	0.000	0.000	32	32	33	0.09477	0.04985	1
33	85.473	41.787	0.000	33	33	34	0.41699	0.21934	1
34	0.000	0.000	0.000	34	34	35	0.11372	0.05982	1
35	396.735	193.960	0.000	35	32	36	0.07566	0.07555	1
36	0.000	0.000	0.000	36	36	37	0.36960	0.19442	1
37	181.152	88.563	0.000	37	37	38	0.26536	0.13958	1
38	242.172	118.395	0.000	38	36	39	0.05675	0.05660	1
39	75.316	36.821	0.000	39	1	40	0.33205	0.76653	1

Dados Barras				Dados Linhas					
Barra	P (kW)	Q (kVAr)	Shunt (kVAr)	Linha	Barra Origem	Barra Destino	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Estado
40	0.000	0.000	0.000	40	40	41	0.11819	0.27283	1
41	1.254	0.531	0.000	41	41	42	296.288	101.628	1
42	6.274	2.660	0.000	42	41	43	0.00188	0.00433	1
43	0.000	0.000	0.000	43	43	44	0.06941	0.16024	1
44	117.880	49.971	0.000	44	44	45	0.81502	0.42872	1
45	62.668	25.566	0.000	45	44	46	0.06378	0.14724	1
46	172.285	73.034	0.000	46	46	47	0.13132	0.30315	1
47	458.556	194.388	0.000	47	47	48	0.06191	0.14291	1
48	262.962	111.473	0.000	48	48	49	0.11444	0.26417	1
49	235.761	99.942	0.000	49	49	50	0.28374	0.28331	1
50	0.000	0.000	0.000	50	50	51	0.28374	0.28321	1
51	109.215	46.298	0.000	51	49	52	0.04502	0.10394	1
52	0.000	0.000	0.000	52	52	53	0.02626	0.06063	1
53	72.809	30.865	0.000	53	53	54	0.06003	0.13858	1
54	258.473	109.570	0.000	54	54	55	0.03002	0.06929	1
55	69.168	29.322	0.000	55	55	56	0.02064	0.04764	1
56	21.843	9.260	0.000	56	53	57	0.10881	0.25118	1
57	0.000	0.000	0.000	57	57	58	0.25588	0.13460	1
58	20.527	8.702	0.000	58	58	59	0.41699	0.21934	1
59	150.548	63.819	0.000	59	59	60	0.50228	0.26421	1
60	220.687	93.552	0.000	60	60	61	0.33170	0.17448	1
61	92.384	39.163	0.000	61	61	62	0.20849	0.10967	1
62	0.000	0.000	0.000	62	48	63	0.13882	0.32047	1
63	226.693	96.098	0.000	63	1	64	0.00750	0.01732	1
64	0.000	0.000	0.000	64	64	65	0.27014	0.62362	1
65	294.016	116.974	0.000	65	65	66	0.38270	0.88346	1
66	83.015	33.028	0.000	66	66	67	0.33018	0.76220	1
67	83.015	33.028	0.000	67	67	68	0.32830	0.75787	1
68	103.77	41.285	0.000	68	68	69	0.17072	0.39409	1
69	176.408	70.184	0.000	69	69	70	0.55914	0.29412	1
70	83.015	33.028	0.000	70	69	71	0.05816	0.13425	1
71	217.917	86.698	0.000	71	71	72	0.70130	0.36890	1
72	23.294	9.267	0.000	72	72	73	102.352	0.53839	1
73	5.075	2.019	0.000	73	71	74	0.06754	0.15591	1
74	72.638	28.899	0.000	74	74	75	132.352	0.45397	1
75	405.99	161.523	0.000	75	1	76	0.01126	0.02598	1
76	0.000	0.000	0.000	76	76	77	0.72976	168.464	1
77	100.182	42.468	0.000	77	77	78	0.22512	0.51968	1
78	142.523	60.417	0.000	78	78	79	0.20824	0.48071	1
79	96.042	40.713	0.000	79	79	80	0.04690	0.10827	1

Dados Barras				Dados Linhas					
Barra	P (kW)	Q (kVAr)	Shunt (kVAr)	Linha	Barra Origem	Barra Destino	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Estado
80	300.454	127.366	0.000	80	80	81	0.61950	0.61857	1
81	141.238	59.873	0.000	81	81	82	0.34049	0.33998	1
82	279.847	118.631	0.000	82	82	83	0.56862	0.29911	1
83	87.312	37.013	0.000	83	82	84	0.10877	0.10860	1
84	243.849	103.371	0.000	84	84	85	0.56862	0.29911	1
85	247.750	105.025	0.000	85	1	86	0.01126	0.02598	1
86	0.000	0.000	0.000	86	86	87	0.41835	0.96575	1
87	89.878	38.878	0.000	87	87	88	0.10499	0.13641	1
88	1.137.280	482.108	0.000	88	87	89	0.43898	101.338	1
89	458.339	194.296	0.000	89	89	90	0.07520	0.02579	1
90	385.197	163.290	0.000	90	90	91	0.07692	0.17756	1
91	0.000	0.000	0.000	91	91	92	0.33205	0.76653	1
92	79.608	33.747	0.000	92	92	93	0.08442	0.19488	1
93	87.312	37.013	0.000	93	93	94	0.13320	0.30748	1
94	0.000	0.000	0.000	94	94	95	0.29320	0.29276	1
95	74.001	31.370	0.000	95	95	96	0.21753	0.21721	1
96	232.050	98.369	0.000	96	96	97	0.26482	0.26443	1
97	141.819	60.119	0.000	97	94	98	0.10318	0.23819	1
98	0.000	0.000	0.000	98	98	99	0.13507	0.31181	1
99	76.449	32.408	0.000	99	1	100	0.00938	0.02165	1
100	0.000	0.000	0.000	100	100	101	0.16884	0.38976	1
101	51.322	21.756	0.000	101	101	102	0.11819	0.27283	1
102	59.874	25.874	0.000	102	102	103	228.608	0.78414	1
103	9.065	3.843	0.000	103	102	104	0.45587	105.236	1
104	2.092	0.887	0.000	104	104	105	0.69600	160.669	1
105	16.735	7.094	0.000	105	105	106	0.45774	105.669	1
106	1.506.522	638.634	0.000	106	106	107	0.20298	0.26373	1
107	313.023	132.694	0.000	107	107	108	0.21348	0.27737	1
108	79.831	33.842	0.000	108	108	109	0.54967	0.28914	1
109	51.322	21.756	0.000	109	109	110	0.54019	0.28415	1
110	0.000	0.000	0.000	110	108	111	0.04550	0.05911	1
111	202.435	85.815	0.000	111	111	112	0.47385	0.24926	1
112	60.823	25.874	0.000	112	112	113	0.86241	0.45364	1
113	45.618	19.338	0.000	113	113	114	0.56862	0.29911	1
114	0.000	0.000	0.000	114	109	115	0.77711	0.40878	1
115	157.070	66.584	0.000	115	115	116	108.038	0.56830	1
116	0.000	0.000	0.000	116	110	117	106.633	0.57827	1
117	250.148	106.041	0.000	117	117	118	0.47385	0.24926	1
118	0.000	0.000	0.000	118	105	119	0.32267	0.74488	1
119	68.809	28.593	0.000	119	119	120	0.14633	0.33779	1

Dados Barras				Dados Linhas					
Barra	P (kW)	Q (kVAr)	Shunt (kVAr)	Linha	Barra Origem	Barra Destino	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Estado
120	32.072	13.596	0.000	120	120	121	0.12382	0.28583	1
121	61.084	25.894	0.000	121	1	122	0.01126	0.02598	1
122	0.000	0.000	0.000	122	122	123	0.64910	149.842	1
123	94.622	46.600	0.000	123	123	124	0.04502	0.10394	1
124	49.858	24.375	0.000	124	124	125	0.52640	0.18056	1
125	123.164	60.214	0.000	125	124	126	0.02064	0.04764	1
126	78.350	38.304	0.000	126	126	127	0.53071	0.27917	1
127	145.475	71.121	0.000	127	126	128	0.09755	0.22520	1
128	21.369	10.447	0.000	128	128	129	0.11819	0.27283	1
129	74.789	36.564	0.000	129	128	130	0.13882	0.32047	1
130	227.926	111.431	0.000	130	130	131	0.04315	0.09961	1
131	35.614	17.411	0.000	131	131	132	0.09192	0.21220	1
132	249.295	121.877	0.000	132	132	133	0.16134	0.37244	1
133	316.722	154.842	0.000	133	133	134	0.37832	0.37775	1
134	333.817	163.199	0.000	134	134	135	0.39724	0.39664	1
135	249.295	121.877	0.000	135	135	136	0.29320	0.29276	1
136	0.000	0.000	0.000	136	8	74	0.13132	0.30315	0

E Artigo Publicado

Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica visando aumento da carga frente à Estabilidade da Tensão aplicando Seleção Clonal

Santos, D. S. D. C.

Guerra, Z. W.

*Alves, T.

Baracho, F. R. A. C.

Departamento de Engenharia Elétrica

**Departamento de Computação e Sistemas*

Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP João Monlevade, MG, Brasil

danielaicm18@gmail.com

wilingthon@ufop.edu.br

tatiana@ufop.edu.br

f_baracho@ufop.edu.br

Resumo— Neste trabalho apresenta-se a formulação e a solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica visando obter configurações que suportam maior carregamento operando em condições de estabilidade de tensão. Para isso foi utilizado um Índice de Estabilidade de Tensão próprio para redes radiais. Com técnica de otimização foi aplicada a Seleção Clonal, a qual se baseia nos fenômenos biológicos que ocorrem nos Sistemas Imunológicos dos indivíduos, que são responsáveis pela defesa do organismo contra agentes infecciosos. No processo de otimização foram adotadas estratégias próprias do problema, com a finalidade de aumentar a eficiência da metodologia. Para as redes simuladas, uma de 33 barras do IEEE e outra rede real de 135 barras os resultados foram satisfatórios com respeito aos encontrado na literatura.

Palavras-Chave— Redes de Distribuição, Estabilidade de Tensão, Reconfiguração de Redes, Seleção Clonal.

I. INTRODUÇÃO

As redes elétricas de distribuição, na sua grande maioria, são construídas em malha e operam de forma radial, trazendo algumas vantagens, por exemplo, proteção mais simples e maior confiabilidade do sistema elétrico em situações de contingência ou sobrecarga, evitando fazer cortes de energia elétrica. Este último tema está relacionado à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e gera grande preocupação das empresas distribuidoras porque as normas nacionais tornam-se cada vez mais rigorosas nos aspectos da QEE.

Uma rede malhada possui trechos com chaves de seccionamento (fechadas) e/ou chaves de interconexão (abertas), sendo parte delas automatizadas (uma tendência para o futuro). Uma troca de posições dessas chaves poderia ajudar à uma operação mais eficiente, reduzindo perdas elétricas, melhorando o desequilíbrio das tensões, reduzindo o número de consumidores afetados frente algum defeito (falta elétrica), aumentar o suporte de maior carga e/ou melhorando os níveis de tensão. Sendo estes dois últimos aspectos o objetivo deste trabalho.

O processo de abrir e fechar chaves cria o problema de reconfiguração, enquadrando-se este tema num modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM) devido ao grande número de topologias radiais que podem ser geradas. Na medida em que a rede cresce se gera uma explosão combinatória, não sendo possível resolver por métodos clássicos de otimização.

Na bibliografia pesquisada, encontram-se métodos que solucionam o problema de reconfiguração objetivando

principalmente à redução das perdas elétricas e/ou o balanceamento as cargas, como mencionado em [1]. Porém, poucos trabalhos tratam do melhoramento das condições de estabilidade de tensão em redes de distribuição. Estes índices são conceituados em alguns trabalhos encontrados na literatura. Em [2] se define um índice de estabilidade de tensão chamado TPSI, calculado a partir de módulos de tensão em algum instante de operação da rede elétrica. Em [3], apresenta-se um índice de proximidade ao colapso de tensão baseado nas perdas de potência ativa. Em [4], define-se índice de estabilidade de tensão a partir de curvas P-V e Q-V. Quanto aos trabalhos que tratam a reconfiguração de redes elétricas visando o melhoramento da estabilidade de tensão na medida que o sistema se carrega, tem-se, [5] no qual os autores resolvem o problema aplicando Busca Tabu (BT) visando maximizar a margem de segurança para o colapso da tensão. [6] utiliza as Redes Neurais Artificiais. Em [7] se propõe uma simples formulação matemática para solucionar esse problema. Em [8] se utiliza um fator que reflete a sensibilidade às perdas para identificar a configuração ótima, a fim de minimizar perdas ativas e melhorar o perfil das tensões. [9] aplica a Otimização por Nuvens de Partículas (ONP) para reduzir as perdas e melhorar o perfil de tensões.

Neste trabalho, como já mencionado, se apresenta uma aplicação do algoritmo Seleção Clonal (SC), desenvolvida em [10], visando melhorar as condições de estabilidade de tensão, ou seja, maximizar a margem de segurança frente ao colapso de tensão em condições de aumento de carga. A Seleção Clonal tem demonstrado ser altamente eficiente para a solução de vários problemas de inteligência computacional.

São apresentados os resultados obtidos na simulação de dois sistemas, um de 33 barras do IEEE e outro de 135 barras. Também se ilustra os resultados obtidos com outras técnicas para as redes simuladas.

II. PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS VISANDO A ESTABILIDADE DE TENSÃO

O problema de reconfiguração consiste em fechar e abrir chaves mantendo a condição de radialidade. Ao se fechar uma chave cria-se um laço (rede malhada). Em seguida, para a rede voltar a uma operação radial deve-se abrir uma chave que forma esse laço. As chaves alocadas de forma estratégica podem melhorar diferentes aspectos da operação da rede elétrica como já mencionado. Neste trabalho, o objetivo é maximizar o carregamento que suporta a rede sem perder as condições de estabilidade de tensão, tema que é tratado a continuação.

A. Estabilidade de Tensão

A estabilidade de tensão é definida como a capacidade que um sistema tem para manter as tensões aceitáveis em todas as barras do sistema elétrico em condições normais de operação, e também após a ocorrência de uma perturbação. Um sistema de potência entra em uma instabilidade de tensão quando um distúrbio causa um decréscimo progressivo e incontrolável de tensão, [11].

É possível analisar a estabilidade de tensão por métodos dinâmicos ou estáticos. Os primeiros são usualmente lentos em muitos aspectos, enquanto os segundos são baseados em fluxo de potência, o que fornece resultados mais conservadores do que os métodos dinâmicos.

As curvas P-V e Q-V são métodos estáticos de análise que podem ser utilizados na análise da estabilidade de tensão de um sistema elétrico [4]. A curva P-V, ilustrada na Fig. 1 é adequada para a identificação do ponto de colapso de tensão.

Os pontos da curva P-V são obtidos a partir de soluções sucessivas de fluxos de carga, onde a carga é aumentada por algum critério pré-estabelecido, obtendo-se assim a tensão “V” de uma barra para certa potência ativa “P” do sistema elétrico. Os pontos de equilíbrio da parte superior da curva P-V são estáveis (pontos de nó) e os pontos da parte inferior são instáveis (pontos de sela). A distância em porcentagem (ou MW) do ponto de operação ao limite de estabilidade de tensão define a margem de estabilidade de tensão.

Pode-se também representar o ponto de carregamento máximo pelo fator de carregamento λ , que é um escalar que pode ser multiplicado por todas as cargas do sistema, de acordo com as equações abaixo:

$$\lambda P_k^n - P_k^c = 0, \quad k \in \text{barras PQ, PV} \quad (1)$$

$$\lambda Q_k^n - Q_k^c = 0, \quad k \in \text{barras PQ} \quad (2)$$

Em que P_k^n e Q_k^n são respectivamente as potências ativa e reativa nominais na barra k , e P_k^c e Q_k^c são as potências consideradas na análise da rede. Aumentando o valor de λ , atingimos o ponto de fator de carregamento máximo (λ^{\max}) no limite de estabilidade de tensão.

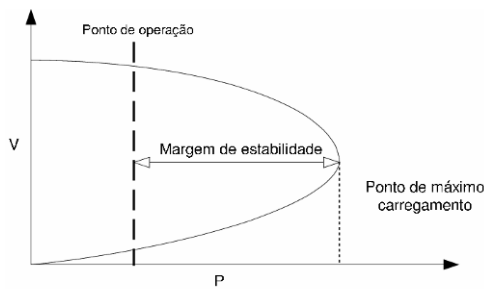


Fig. 1. CURVA P-V

B. Índice de Estabilidade de tensão

O comportamento extremamente não-linear do sistema na região próxima ao limite de estabilidade torna muito difícil a elaboração de um índice com comportamento linear, que seja eficaz para sistemas de grande porte, prevendo a margem de estabilidade a partir de certo ponto de equilíbrio. Entretanto, existem alguns índices que fornecem indícios de proximidade ao colapso de tensão.

Em [3] mostra-se que não há necessariamente uma relação entre a proximidade do colapso e a magnitude de tensão para uma barra em sistemas de transmissão. Dessa forma, não é correto considerar as magnitudes das tensões nas barras como indicadores de susceptibilidades ao colapso, tornando-se necessária a análise de índices mais confiáveis não só quanto à proximidade, mas também em relação ao próprio colapso de tensão.

Neste trabalho é utilizado o índice TPSI, proposto em [2] e baseado apenas em fasores de tensão, demandando pequeno esforço computacional. É, portanto, adequado aos propósitos na implementação da Seleção Clonal para o problema de reconfiguração.

A condição crítica para a operação estável de um determinado sistema será quando o valor do TPSI de alguma das barras alcance um valor igual a zero (caso crítico), como ilustra [4]. Isso se reflete no valor de λ^{\max} .

C. Formulação Genérica do problema

O problema da reconfiguração de sistemas de distribuição pode ser formulado como uma otimização não linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução (do problema de estabilidade de tensão) envolve a seleção dentre todas as configurações possíveis, daquela que suporte o maior carregamento sem perder a estabilidade da tensão e que satisfaça um conjunto de restrições. De forma geral o problema de reconfiguração de sistemas radiais pode ser formulado como:

$$\text{Maximizar } fa_{kb} = \min(TPSI_{kb}) \quad (3)$$

s.a.

- Restrições de fluxo de carga;
- Níveis de tensão;
- Confiabilidade do sistema;
- Balanço de carga entre os alimentadores;
- Radialidade.

Em que:

- k : configuração radial factível de uma determinada configuração do sistema;
- b : número de barra da configuração k ;
- fa_{kb} : função objetivo que representa o mínimo valor de TPSI de entre todas as barras da configuração k ;
- $TPSI_{kb}$: índice de estabilidade de tensão das barras finais.

A natureza combinatoria do problema (3) e a restrição de radialidade são fatores complicadores, pois não é fácil representar esta restrição através de relações algébricas e, portanto, torna-se muito difícil usar algoritmos baseados em técnicas tradicionais de otimização para a solução de (3).

Para as redes testadas foi considerado que todos os trechos podem possuir chave estando estas chaves fechadas (chaves seccionadoras) ou abertas (chaves de interconexão). Na prática nem todos os trechos possuem chaves de manobra. Isto leva ao aumento do número de restrições.

III. ALGORITMO SELEÇÃO CLONAL

O algoritmo de Seleção Clonal foi proposto em [10] está baseado nos fenômenos biológicos que ocorrem nos Sistemas Imunológicos (SI) dos indivíduos, o qual a sua vez é responsável pela defesa do organismo contra agentes infecciosos. Esses SIs têm a característica de aprendizagem e memória extraindo informações dos agentes infecciosos para utilizá-los em caso de novas infecções futuras.

Nesse sentido, algoritmos Clonais trabalham simulando o princípio da Seleção Clonal, a qual descreve as características de uma resposta imune adaptativa a estímulos antigênicos.

Somente as células capazes de reconhecer antígenos irão se proliferar, sendo selecionadas em relação às demais. Durante a reprodução celular, estas células (clones) estarão sujeitas a um processo de mutação que, juntamente com uma forte pressão seletiva, resultará no aumento da afinidade entre o anticorpo e o antígeno que o selecionou. A repetição desse processo leva progressivamente à geração de soluções melhoradas que, no caso de um sistema imunológico real, significam soluções que melhor se adaptam aos agentes infecciosos e, no caso de um algoritmo de computação evolutiva, significam soluções que apresentam melhor valor de função objetivo.

O pseudocódigo do algoritmo Clonal está apresentado abaixo.

Procedimento Clonal

1. Gere uma população inicial de indivíduos (anticorpos);
2. Avalie a população inicial em relação à afinidade com a função objetivo;
3. Ordene os anticorpos e selecione os melhores;
4. Enquanto o critério de parada não for satisfeito faça, Gere clones;
5. Realize mutações sobre os clones (proporcional à afinidade);
6. Avalie os clones em relação à afinidade com a função objetivo;
7. Selecione os melhores indivíduos para a próxima geração;
8. Retorne o melhor indivíduo da população.

IV. METODOLOGIA PROPOSTA

As seções seguintes detalham a implementação do algoritmo Seleção Clonal básico no problema de reconfiguração de redes elétricas visando o aumento de carga mantendo a estabilidade de tensão.

A. Representação de uma solução

A representação de uma solução para o problema tratado neste trabalho pode ser através do status das chaves da rede elétrica avaliada, ou seja, chaves fechadas "1" e chaves abertas "0", como ilustrado na Tabela I, a qual representa a

solução da rede elétrica mostrada na Fig. 2.

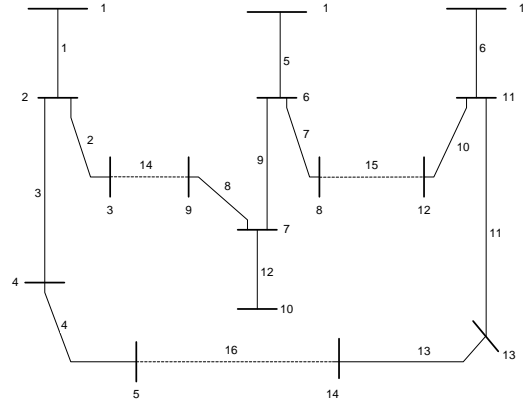


Fig. 2. REDE DE 13 BARRAS IEEE

TABELA I. REPRESENTAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO

Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8
Chave	1	1	1	1	1	1	1	1
Trecho	9	10	11	12	13	14	15	16
Chave	1	1	1	1	1	0	0	0

B. Avaliação de uma solução

Para esta técnica de otimização avaliar uma solução significa determinar, a partir dos valores de tensão obtidos no fluxo de carga [12], o valor da eq. (3) que é o índice de estabilidade de tensão, considerando as restrições do modelo matemático. A Tabela II ilustra o valor da solução para a Fig. 2.

TABELA II. REPRESENTAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO

Configuração (chaves abertas)	TPSI
14-15-16	3,55

C. População inicial

O tamanho da população varia de acordo com o tamanho do problema. Sendo que para as redes testadas foram 20 indivíduos (anticorpos) o tamanho da população. Estes foram gerados aleatoriamente respeitando as especificações do problema proposto.

D. Processo de clonagem

De acordo com a proposta do algoritmo Clonal original, os indivíduos mais aptos (maior valor de $f_{a_{kb}}$) devem possuir um número maior de clones que aqueles menos aptos. Sendo assim, no algoritmo Clonal implementado, a quantidade de clones gerada por cada indivíduo foi calculado segundo a fórmula:

$$C = (Q - (0,02 \times P \times Q)) \times B \quad (4)$$

Em que:

- C é a quantidade de clones por indivíduo;
- Q é a quantidade de nós (chaves) do indivíduo;
- P é a classificação de um indivíduo em relação aos demais, sendo que o melhor indivíduo possui a

classificação 0 e o pior recebe como classificação o valor n , equivalente ao tamanho da população;

- B é uma constante definida pelo valor 0,8.

E. Operadores de mutação

A mutação é realizada apenas nos clones, aos quais se atribui uma intensidade de mutação I , a qual varia de acordo com uma função de aptidão indicada na eq. (5), de modo que os clones do anticorpo mais apto sofrem poucas alterações, e os clones do anticorpo menos apto maiores alterações.

$$I = \left(\left(\frac{B-0,1}{Q} \right) * P + 0,1 \right) * 10 \quad (5)$$

Foram criados 2 operadores de mutação: troca de chaves aleatória e troca de chaves com maior probabilidade, baseada numa heurística de [13].

Troca de chaves aleatória: Fecha-se de forma aleatória uma chave de interconexão do clone avaliado. Escolhe-se aleatoriamente uma chave a ser aberta do laço formado, e gera-se uma nova solução radial (clone mutado). Por exemplo, fazendo uma mutação na solução da Tabela I e Fig. 2, sorteia-se aleatoriamente chave 14 para fechar, formando um laço pelas chaves 1, 2, 14, 8, 9 e 5 e abre-se uma chave desta lista de forma aleatória.

Troca de chaves com maior probabilidade: Fecha-se de forma aleatória uma chave de interconexão do clone avaliado, formando um laço. Utiliza-se a heurística [13] para construir uma lista ordenada de chaves candidatas, onde a primeira tem maior probabilidade de ser aberta observando as perdas. Em seguida, abre-se aleatoriamente 20% do grupo de chaves com maior probabilidade de reduzir as perdas elétricas ativas. Assim é gerada uma nova solução radial (clone mutado). Por exemplo, fazendo uma mutação do anticorpo (configuração) da Tabela I, sorteia-se aleatoriamente a chave 14 para fechar, formando um laço pelas chaves 1, 2, 14, 8, 9 e 5. Ordena-se esta lista (2, 8, 9, 5 e 1) e escolhe-se aleatoriamente uma das primeiras chaves (20% da lista).

F. Escolha da próxima população

O método ilustrado em [14] foi utilizado no algoritmo com o intuito de gerar diversidade entre as soluções escolhidas. O algoritmo permite que qualquer solução seja escolhida para passar à próxima geração, porém, soluções mais aptas têm maior probabilidade de serem escolhidas. O tamanho da população é sempre mantido. Ao final de cada geração é aplicado o método da roleta sobre cada conjunto de anticorpos formado por um pai e seus clones. O método da roleta seleciona apenas um indivíduo em cada conjunto e esse é repassado para a próxima geração.

G. Critério de parada

A Seleção Clonal implementada utiliza como critério de parada o número de populações geradas. O algoritmo foi executado considerando-se um número máximo de 20 e 50

gerações para as redes testadas. Sendo assim, tão logo a vigésima população seja gerada, o algoritmo termina e retorna como solução o melhor indivíduo encontrado nesta população.

V. RESULTADOS

A metodologia foi aplicada em duas redes elétricas, uma de 33 barras e outra de 135 barras referenciadas em [5]. A Tabela III ilustra os parâmetros da metodologia para as duas redes utilizadas.

TABELA III. PARÂMETROS PRÓPRIOS DA METODOLOGIA.

Parâmetros	Valor	
	33 barras	135 barras
População (Quantidade de anticorpos)	10	30
Q	37	156
Operador de mutação	Troca aleatória de chaves	
	Troca de chaves utilizando uma heurística	
Critério de parada	20 gerações	50 gerações
Quantidade (%) de clones que substituíram anticorpos (pior fitness) da população	20%	

A Tabela IV ilustra quatro melhores resultados (Melhor 1, Melhor 2, Melhor 3, Melhor 4) encontrados para a rede de 33 barras do IEEE. Assim como também os resultados obtidos pelas Metaheurísticas Busca em vizinhança Variável (VNS) em [15], Busca Tabu BT do [5] e Otimização por Nuvens de Partículas ONP em [16]. O melhor resultado (Melhor 1) encontrado pela Seleção Clonal foi o mesmo encontrado na literatura indicada. Já o segundo melhor resultado (Melhor 2) representa a menor perda elétrica encontrada na literatura [5].

TABELA IV. RESULTADOS DO SISTEMA DE 33 BARRAS.

Configuração	Chaves abertas	λ	Perdas (kW)
Inicial	33 34 35 36 37	3,55	202,7
Melhor 1 (VNS, BT, ONP)	7 10 14 28 32	5.247	140,70
Melhor 2 (Mínimas Perdas)	7 9 14 32 37	5.246	139,50
Melhor 3	7 9 13 27 32	5.041	146,83
Melhor 4	7 11 28 32 34	5.002	143,18

Uma rede real de 135 barras foi testada, operação 13,8 kV, com carga total de 18313,81 kW e 21 chaves normalmente abertas, considerando todos os trechos com chaves de manobra.

TABELA V. RESULTADOS DO SISTEMA DE 135 BARRAS.

Conf.	Chaves abertas	Perda (kW)				Carregamento (λ)			
		VNS	BT	ONP	CLONAL	VNS	BT	ONP	CLONAL
Inicial	136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156	320,27	320,27	320,27	320,27	3,70	3,70	3,70	3,70
Melhor 1	38 51 53 106 118 126 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 155 156	—	283,92	283,9	—	—	6,96	6,96	—
Melhor 2	38 51 53 106 119 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151 152 154 155 156	284,44	—	284,44	284,44	6,81	—	6,81	6,81
(Mínimas Perdas)	7 35 51 90 96 106 118 126 135 137 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151 155	—	280,13	—	280,13	—	—	—	5,93

O melhor resultado (Melhor 2) obtidos pela Seleção Clonal está indicado na Tabela V. Sendo que as demais técnicas de otimização também encontraram este mesmo resultado. Já o resultado Melhor 1 não foi encontrado pela Seleção Clonal. A configuração que gera mínimas perdas (Resultado Mínimas Perdas) não é aquela configuração que maximiza o carregamento da rede [17].

Outro resultado mostrado na Fig. 3 indica o perfil de tensões antes e após a reconfiguração. Observa-se que que uma melhor capacidade da rede em suportar carga traz um melhoramento do perfil de tensões.

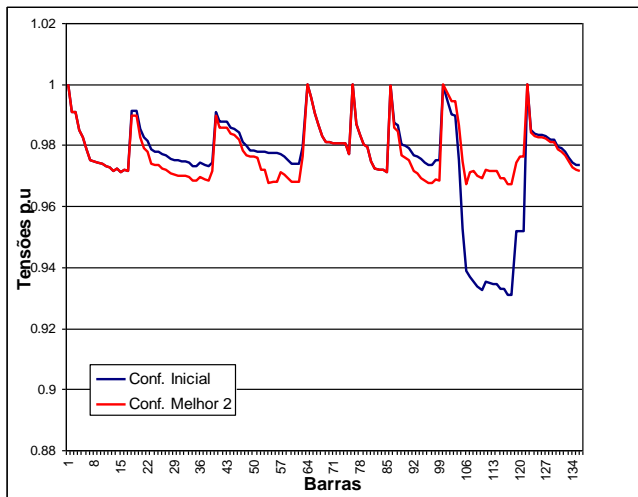


Fig. 3. NÍVEIS DE TENSÃO ANTES E APÓS A RECONFIGURAÇÃO (REDE 135 BARRAS)

A Fig. 4 ilustra o desempenho da metodologia. Observa-se que no início (primeiras populações) da metodologia o melhoramento da função objetivo é rápido. Já ao se aproximar do valor esperado, o número de populações aumenta significativamente como é de se esperar.

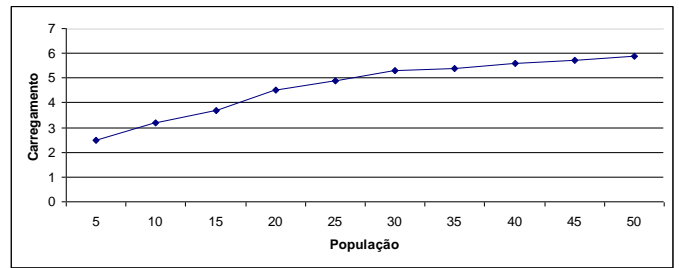


Fig. 4. DESEMPENHO DA METODOLOGIA

VI. CONCLUSÕES

A técnica “Seleção Clonal” aplicada neste trabalho, constitui uma ferramenta alternativa e nova, para solução do problema Reconfiguração de Redes de Distribuição visando à melhoria das condições de estabilidade de tensão em condições de sobrecarga, em outras palavras, o objetivo é maximizar a capacidade que possui a rede, de suportar a carga operando em condições de estabilidade de tensão.

O procedimento utilizado no operador de mutação na Seleção Clonal foi adequado, porque permitiu encontrar configurações radiais de forma direta. Já os valores dos parâmetros próprios da Seleção Clonal foram determinados experimentalmente através de testes. Sendo esta, uma característica comum entre todas as técnicas metaheurísticas.

Dos resultados obtidos, depreende-se a eficiência da metodologia, quando comparada com outras técnicas de otimização, encontrando resultados de boa qualidade.

Dos resultados (rede de 135 barras), as configurações ótimas tanto para a minimização de perdas ativas quanto para maximização de carregamento são diferentes. Num cenário onde a rede está sobrecarregada ou próxima ao ponto de colapso deverá impor-se o critério de máximo carregamento (segurança) frente aos demais critérios (exemplo perdas).

REFERÊNCIAS

- [1] M.E. Baran and F.F. Wu., “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing,” IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n 2, p 1401-1407, 1989.
- [2] F. Gubina and B. Strmcnic., “Voltage Collapse Proximity Index Determination Using Voltage Fasors Approach,” IEEE Transactions on Power Systems, v. 2, p. 788-794, 1995.
- [3] O. M. S. Nema and C.A. Castro. “Índice de proximidade ao Colapso de tensão baseado nas perdas de Potência ativa - Potencial de Utilização na Operação em Tempo Real,” III SIMPASE, p. 1-7, 1996.
- [4] C. W. Taylor. “Power System Voltaje Stability,” McGraw-Hill, EUA, 1994.
- [5] M. A. G. do Nascimento. “Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu,” Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2005
- [6] K. Viothkumar. “Investigations on distributed generation planning and certain grid interaction issues of wind turbine generation system,” Tese de Doutorado, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, 2011.
- [7] K. Mistry and R. Roy. “Enhancement of voltage stability index of distribution system by network reconfiguration including static load model and daily load curve,” Smart Grid Technologies, India, p. 17-22, 2011.

- [8] G. S. Kurmar, S. S. Kurmar, S. V. Jayaram., "Reconfiguration of electrical distribution network for loss reduction and voltage enhancement," IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). p. 1387-1392, 2017.
- [9] H. Wu, P. Dong and M. Liu. "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction and Voltage Stability with Random Fuzzy Uncertainties of Renewable Energy Generation and Load," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018.
- [10] L.N. De Castro and F. J. V. Zuben., "Learning and optimization using the clonal selection principle," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, v. 6, n. 3, p. 239-251, 2002.
- [11] P. Kundur. "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, EUA 1994.
- [12] D. A. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. , G.X. Luo. "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Transactions on Power Systems, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.
- [13] D. A. Shirmohammadi and H. W. Hong. " H_{∞} design with pole placement constraints: An lmi approach," IEE Trans. Autom. Control, v. 41, n. 3, p. 358-367, 1996.
- [14] C. R. Reeves. "Modern heuristic techniques for combinatorial problems," Blackwell Scientific Publications, 1993.
- [15] W. Guerra and R. Romero. "Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para aumento margem de segurança ao Colapso de Tensão utilizando Busca em Vizinhança Variável," Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE, Goiás, 2010.
- [16] W. Guerra, J. C. G. Manso, I. A. Araújo. "Reconfiguração de Sistemas de Distribuição para o Aumento da Margem de Segurança ao Colapso de Tensão utilizando ONP," Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE, 2014.
- [17] W. Guerra and R. Romero. "Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável," Congresso Brasileiro de Automática, Campinas, v. 1. p. 1411-1416, 2006.