

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

EWERTON LUIZ FERREIRA

**APLICAÇÕES DE RECONFIGURAÇÃO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE SISTEMAS IMUNOLÓGICOS
ARTIFICIAIS**

Juiz de Fora, MG - Brasil

Agosto de 2016

EWERTON LUIZ FERREIRA

**APLICAÇÕES DE RECONFIGURAÇÃO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE SISTEMAS IMUNOLÓGICOS
ARTIFICIAIS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal De Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricitista.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Juiz de Fora, MG - Brasil

Agosto de 2016

Ferreira, Ewerton Luiz Ferreira.

APLICAÇÕES DE RECONFIGURAÇÃO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE SISTEMAS IMUNOLÓGICOS
ARTIFICIAIS / Ewerton Luiz Ferreira Ferreira. -- 2016.

47 p.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia,
2016.

1. Sistemas de distribuição de energia. 2. Reconfiguração de
redes radiais. 3. Sistemas imunológicos artificiais. I. Oliveira,
Leonardo Willer de Oliveira, orient. II. Título.

EWERTON LUIZ FERREIRA

**APLICAÇÕES DE RECONFIGURAÇÃO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE SISTEMAS IMUNOLÓGICOS
ARTIFICIAIS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal De Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro electricista.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Aprovada em 03 de agosto de 2016

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc. (Orientador)

Prof. Edimar José de Oliveira, D.Sc.

Felipe da Silva Seta, M.Sc.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer à Deus, pelo dom da vida e por conceder força e sabedoria para continuar nos momentos que foram difíceis.

Aos meus pais, Ferreira e Beatriz, que foram a base de tudo para eu chegar até aqui, obrigado por me apoiarem em todos os momentos. Vocês são meu exemplo de determinação.

Aos meus irmãos, sobrinhos e familiares, obrigado pelo apoio contínuo ao longo desta jornada.

A Laura, minha enorme gratidão pelo amor, carinho e compreensão durante os bons e maus momentos.

Ao professor e orientador Leonardo Willer, pelo apoio, dedicação e, sobretudo, todo o conhecimento passado ao longo de toda a graduação e pesquisas.

Aos professores da Faculdade de Engenharia que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica.

A equipe do Shopping Jardim Norte, que contribuíram, e muito, para meu crescimento profissional durante o período de estágio.

A todos os meus amigos, pelo companheirismo, conversas e troca contínua de conhecimentos. Vocês foram essenciais durante estes anos de convivência.

*“Faça o melhor que puder.
Seja o melhor que puder.
O resultado virá na mesma proporção de
seu esforço.”. (Mahatma Gandhi)*

RESUMO

Resumo da Monografia apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aplicações de Reconfiguração em Redes de Distribuição Através de Sistemas Imunológicos Artificiais

Ewerton Luiz Ferreira

Agosto, 2016

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira.

Este trabalho apresenta uma metodologia de reconfiguração de redes radiais de distribuição para otimização de três objetivos do Sistema de Distribuição de Energia (SDE). Os objetivos que serão analisados de maneira individual são: maximização de estabilidade de tensão, minimização de perdas técnicas e maximização do balanceamento de cargas entre alimentadores. A análise é feita de tal maneira que se estabeleça um compromisso ou relação entre os objetivos, a fim de elucidar tomadas de decisões ao operador do sistema.

Para tanto, utiliza-se uma técnica de otimização meta-heurística denominada Sistemas Imunológicos Artificiais. O problema apresenta restrições de rede e operacionais, como a estrutura radial e conexa da rede e os limites operacionais de tensão nodal. Três estudos de casos com sistemas conhecidos na literatura são realizados para comprovar a eficiência do método e concluir sobre a relação entre os objetivos propostos.

ABSTRACT

Abstract of Thesis presented to UFJF as a partial fulfilment of the requirements for the title of Electrical Engineer.

Application of Reconfiguration in Distribution Networks through Artificial Immune System

Ewerton Luiz Ferreira

Agosto, 2016

Supervisor: Leonardo Willer de Oliveira.

This work presents a methodology for reconfiguration of radial distribution networks for optimization of three objectives of the Energy Distribution System (EDS). The objectives which will be analyzed along this work are: the minimization of technical losses and the maximization of load balancing between feeders and the voltage stability. The analysis is made in such a way to establish a relationship between objectives, in order to clarify a decision over the system operator.

Therefore, the presented technique's called meta-heuristics artificial immune systems. The problem presents between network and operating restrictions, as a radial and related structure of the network and operational limits nodal voltage. Three case studies with known systems in the literature are performed to prove the method's efficiency about the relationship among the proposed objectives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de um Sistema Elétrico de Potência.	13
Figura 2: Resposta imunológica adaptativa: (I) fagocitose e quebra do patógeno por fagócitos; (II) reconhecimento dos antígenos pelas células T; (III) estímulo da produção de células B; (IV) maturação de afinidade; (V) diferenciação de parte das células B em células de memória; (VI) diferenciação de parte das células B em células de plasma; (VII) estímulo da produção de células T citotóxicas; e (VIII) eliminação de células do próprio organismo infectadas pelo patógeno. Esta figura ilustra uma situação hipotética e que o patógeno possui apenas um tipo de antígeno.....	22
Fig. 3: Ilustração do Princípio de Seleção Clonal	23
Fig. 4: Fluxograma do Algoritmo CLONR	25
Fig. 5: Topologia inicial do Sistema de 16 barras	28
Fig. 6: Matriz gerada na primeira etapa do algoritmo	29
Fig. 7: Topologia inicial do Sistema de 94 barras	36
Fig. 8: Topologia inicial do Sistema de 33 barras	38
Fig. 9: Evolução do índice de estabilidade de tensão, Análise 1.1.....	39
Fig. 10: Evolução das perdas técnicas, Análise 2.....	39
Fig. 11: Evolução do índice de estabilidade de tensão, Análise 1.1.....	40
Fig. 12: Evolução das perdas técnicas, Análise 2.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do algoritmo CLONR para reconfiguração do SDE.....	35
Tabela 2: Resultados do algoritmo CLONR para o sistema de 16 barras.	35
Tabela 3: Resultados do algoritmo CLONR para o sistema de 94 barras.	36
Tabela 4: Resultados do algoritmo CLONR para o sistema de 33 barras.	38

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
CAPÍTULO 1	13
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	16
1.2 Contribuições do Trabalho	17
1.3 Estrutura do Trabalho	17
CAPÍTULO 2	18
2. MODELAGEM DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	18
CAPÍTULO 3	21
3. METODOLOGIA PROPOSTA	21
3.1 O Sistema imunológico	21
3.1.1 A resposta imunológica adaptativa e o princípio da seleção clonal	21
3.2 Algoritmo CLONR	24
CAPÍTULO 4	28
4. TUTORIAL DE APLICAÇÃO	28
4.1 Etapa 1	29
4.2 Etapa 2	29
4.2.1 Cálculo de maximização da estabilidade de tensão	29
4.2.2 Cálculo de minimização das perdas técnicas	30
4.2.3 Cálculo de maximização do balanceamento entre alimentadores	30
4.3 Etapa 3	31
4.4 Etapa 4	31
4.5 Etapa 5	32

4.6	Etapa 6	32
4.7	Etapa 7	32
4.8	Etapa 8	32
4.9	Etapa 9	32
4.10	Etapa 10	33
	CAPÍTULO 5	34
5.	RESULTADOS	34
5.1	Caso 1: Sistema de 16 barras	35
5.2	Caso 2: Sistema de 94 barras	35
5.3	Caso 3: Sistema de 33 barras	37
	CAPÍTULO 6	42
6.	CONCLUSÕES	42
6.1	Sugestões Para Estudos Futuros	43
7.	REFERÊNCIAS	44

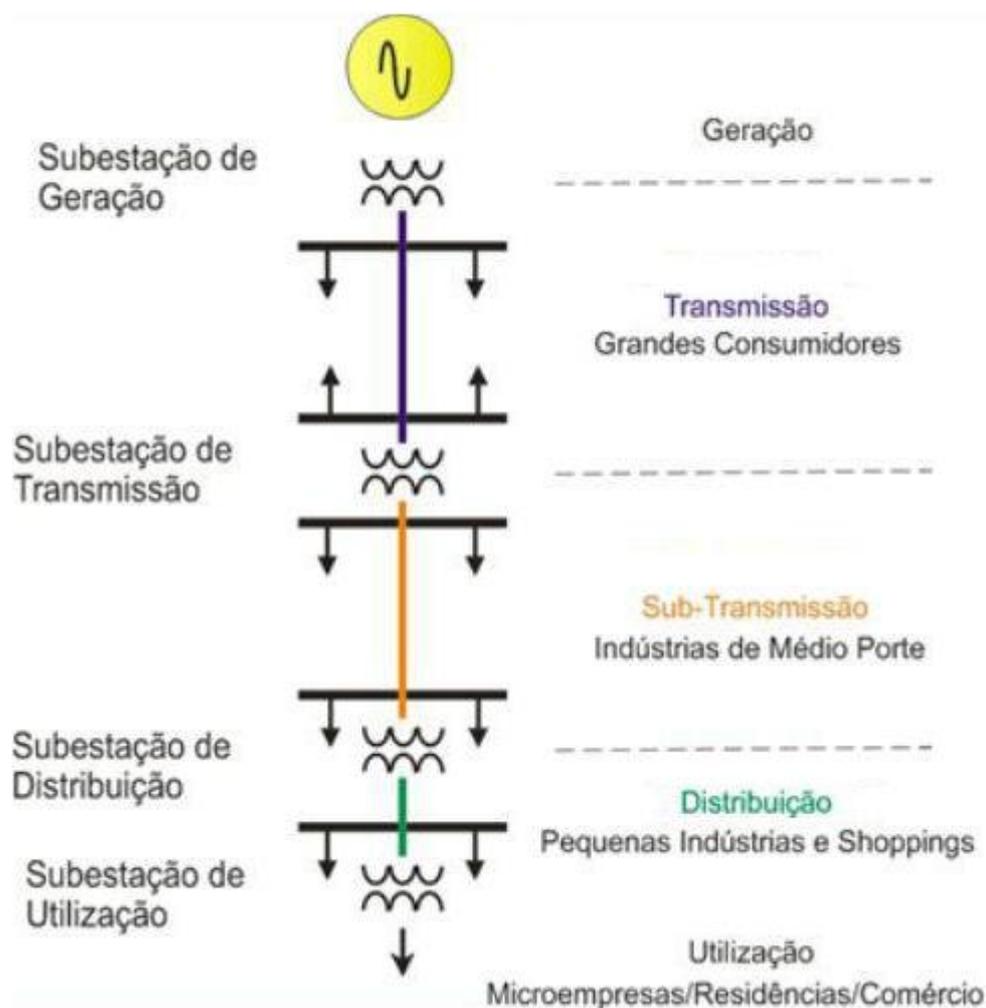
Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) tornaram-se mais complexos no ponto de vista de operação. Existem vários fatores que contribuíram para esta complexidade, destacando-se o aumento em larga escala do SEP, a utilização crescente de cargas envolvendo eletrônica de potência e controladores e a ampliação dos sistemas de geração distribuída e co-geração. Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas computacionais de auxílio à operação tem crescido e tornando-se cada vez mais importante.

A Figura 1 ilustra um SEP, destacando de forma genérica seus quatro segmentos: geração, transmissão, distribuição e consumo.

Fig. 1: Esquema de um Sistema Elétrico de Potência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O sistema de geração é composto pelas usinas que convertem energia de alguma fonte em eletricidade, o sistema de transmissão é aquele que transporta a energia das usinas até os pontos de consumo, pode ser dividido ainda em sub-transmissão de acordo com o nível de tensão que está sendo utilizado. O sistema de distribuição é composto basicamente por subestações abaixadoras e linhas de distribuição, é responsável por distribuir a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos centros consumidores. Este sistema é dividido em distribuição primária e secundária. Por último, o sistema de utilização, como o próprio nome diz, trata-se dos consumidores finais e suas respectivas cargas.

O foco deste trabalho é o sistema de distribuição de energia (SDE), que está em crescente desenvolvimento, acarretando problemas e desafios para o seu planejamento e operação. A reconfiguração de redes de distribuição de energia tem sido uma opção atrativa para tratar problemas relacionados com o SDE, como a instabilidade de tensão (AHMAD, *et al.*, 2012; KAYAL, *et al.*, 2011; GUIMARÃES, *et al.*, 2004), as perdas técnicas (OLIVEIRA, *et al.*, 2014; ALONSO, *et al.*, 2014) ao longo da cadeia produção-transporte-consumo de energia elétrica e o balanceamento entre cargas (MANTOVANI, *et al.*, 2000; BETTONI, *et al.*, 2009).

A reconfiguração de SDE consiste na determinação da topologia radial e conexa da rede, através da definição dos estados (aberto/fechado) de chaves manobráveis (KALANTAR, *et al.*, 2006). Este problema requer programação matemática não linear inteira mista, envolvendo variáveis contínuas e discretas, para uma resolução assistida por ferramentas computacionais. Desta forma, métodos eficientes e apropriados para problemas com estas características são necessários (SETA, *et al.*, 2013). A natureza fornece muitos exemplos de sistemas compostos por elementos simples, nos quais uma interação cooperativa e competitiva entre estes elementos resulta num comportamento global robusto. Este comportamento é desejável para tratar problemas de elevada complexidade, como a reconfiguração de SDE, criando um ambiente propício para a aplicação de técnicas baseadas em meta-heurísticas (RESENDE, *et al.* 2011).

O problema de estabilidade de tensão de sistemas de distribuição de energia (SDE) ocorre devido à queda rápida de tensão nas barras da rede elétrica, decorrente de níveis elevados de carregamento nos alimentadores, limitando o aumento da carga suprida pelas companhias distribuidoras (MAHMOUD, 2012). Estabilidade de tensão pode ser definida

como a habilidade do sistema para manter as tensões em níveis adequados de acordo com a capacidade de transferência de potência dos alimentadores (DENG, *et al.*, 2009) e é um dos requisitos de segurança de sistema elétricos.

Níveis inapropriados de tensão para a distribuição de energia elétrica podem impactar em colapsos de tensão (MAHMOUD, 2012). Esses colapsos, que são reduções elevadas e rápidas das tensões nodais, estão ocorrendo com grande frequência e severidade em SDE (GUIPING, *et al.*, 2009). Portanto, o problema de estabilidade de tensão tem recebido cada vez mais atenção em todo o mundo.

Para mensurar o nível de estabilidade de tensão de um sistema, índices têm sido propostos na literatura desde a década de 90 (ZHENG e KEZUNOVIC, 2010). Estes índices consistem em parâmetros numéricos que auxiliam ao operador monitorar a distância em que o sistema se encontra do ponto de colapso de tensão ou na tomada de decisões para evitar o colapso. O objetivo destes índices, portanto, é determinar a distância entre o ponto operativo atual e limite de estabilidade, ou seja, determinar a margem de estabilidade do sistema (PUJARA e VAIDYA, 2011).

As perdas técnicas em um SDE são as perdas de potência ativa nas linhas de distribuição, essas perdas influem diretamente nos custos associados com o transporte de energia elétrica. Sendo assim, é possível calcular as perdas de potência ativa entre os ramos do sistema e optar pela topologia de menor perda, mantendo a eficiência e o atendimento de todas as cargas do sistema.

Em (OLIVEIRA, *et al.*, 2009) é aplicado a reconfiguração ótima do SDE para minimizar perdas a partir de algoritmo utilizando o método primal-dual de pontos interiores com índice de sensibilidade. Enquanto que (ALONSO, *et al.*, 2014) utiliza a técnica meta-heurística Sistema Imunológico Artificial também para minimizar perdas. OLIVEIRA, *et al.* (2014) também utiliza a mesma técnica, porém, existe uma avaliação do impacto de representar diferentes níveis de carregamento na reconfiguração.

Uma técnica híbrida baseada nos conceitos de mecânica quântica e em SIA é proposta em (AHMAD, *et al.*, 2012) para a resolução do problema de reconfiguração com os objetivos de minimizar perdas e maximizar a estabilidade de tensão. Estudos são realizados

considerando-se estas funções separadamente entre si e simultaneamente através de um problema multi-objetivo, com ponderações entre as funções.

Entre os diversos procedimentos técnicos utilizados para melhoria da operação dos sistemas de distribuição enquadra-se também o balanceamento de cargas entre os alimentadores de distribuição. Este procedimento consiste em alocar uniformemente as cargas entre diferentes alimentadores que derivam da subestação de distribuição, reduzindo assim o desequilíbrio de corrente entre estes. Esta redução é essencial, dado que o desequilíbrio prejudica o alimentador mais carregado, comprometendo o circuito como um todo pelo surgimento de correntes elevadas em trechos que implica em maiores afundamentos de tensão e maiores solicitações e esforços de equipamentos e transformadores (SOUZA, 2002).

Existe uma relação entre o balanceamento e as mínimas perdas. Os autores em (MANTOVANI, *et al.*, 2000) investigam esta relação a partir de um algoritmo heurístico baseado no critério de queda de tensão. BETTONI, *et al.* (2009) propuseram uma aproximação linear para modelagem matemática do balanceamento de cargas em redes de distribuição. Por fim, (SOUZA e LOPES, 2006) tratam o problema de melhoria dos níveis de tensão através do balanceamento aliado ao dimensionamento de condutores, fazendo uso de um modelo de otimização multi-objetivo sob uma abordagem evolucionária baseada no critério de Pareto.

1.1 Objetivos

Seguindo estas linhas de pesquisas, o presente trabalho apresenta uma investigação de aplicações do problema de reconfiguração de redes de distribuição com diferentes objetivos, a fim de se tentar estabelecer uma relação ou compromisso entre os mesmos. Em outras palavras, o propósito é investigar se tais objetivos apontam para decisões similares, conforme se tem estabelecido como premissa na literatura, ou se em algumas circunstâncias, estes objetivos podem indicar decisões diferentes ou conflitantes. Os objetivos que serão avaliados individualmente são: maximização de estabilidade de tensão, minimização de perdas técnicas e maximização do balanceamento de cargas entre alimentadores. A técnica de otimização aplicada é denominada Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA), ainda pouco explorada na literatura para a reconfiguração com foco nesses três objetivos. O problema de otimização é restrito de acordo com requisitos de rede como configuração radial e conexa, e restrições operacionais como o limite de queda de tensão em alimentadores. Testes são realizados com

sistemas conhecidos da literatura para comprovar a eficácia do método aplicado à reconfiguração de SDE.

1.2 Contribuições do Trabalho

As contribuições deste trabalho estão relacionadas à investigação do problema de reconfiguração considerando diferentes objetivos, para responder e concluir sobre as decisões indicadas pelos mesmos, comparadas entre si. Os três objetivos são favoráveis aos principais requisitos de um SDE, que são: qualidade, confiabilidade, segurança, atendimento contínuo e custos igualitários.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 6 capítulos. No capítulo 1 é apresentada a introdução, abordando um breve contextualização do problema, os objetivos e contribuições do trabalho.

O capítulo 2 ilustra a modelagem do problema aplicado à reconfiguração de SDE.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada e suas principais teorias e componentes que auxiliaram no desenvolvimento da ferramenta.

O capítulo 4 é um tutorial de aplicação do algoritmo levando em conta os três objetivos do problema.

O capítulo 5 discorre sobre os resultados encontrados.

O capítulo 6 aborda as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

MODELAGEM DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO

O problema de reconfiguração de SDE visando maximizar a estabilidade de tensão ou minimizar às perdas técnicas de energia ou maximizar o balanceamento entre cargas pode ser formulado através das funções objetivos FOB_1 , FOB_2 e FOB_3 , suas restrições, conforme modelo a seguir.

$$FOB_1 = \max IET_1(c) \text{ ou } \max IET_2(c) \quad (1)$$

$$FOB_2 = \min \sum_{k=1}^{NLIN} L_{km} \quad (2)$$

$$FOB_3 = \min \sum_{SE=1}^{NSE} \left[\sum_{j \in \Omega_{SE}} (P_{km_{SE,SE_1}} - P_{km_{SE,SE_j}})^2 \right] \quad (3)$$

Sujeito a:

$$Pg_k - Pl_k - \sum_{m \in \Omega_k} [CH_{km} \cdot P_{km}] = 0 \quad (4)$$

$$Qg_k - Ql_k - \sum_{m \in \Omega_k} [CH_{km} \cdot Q_{km}] = 0 \quad (5)$$

$$L_{km} = g_{km} \cdot [V_k^2 + V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}] \quad (6)$$

$$CH_{km} = 0 \text{ ou } 1 \quad (7)$$

$$V_k, V_m \geq V_{min} \quad (8)$$

$$\text{Radialidade e Conectividade} \quad (9)$$

Em que $IET_1(c)$ e $IET_2(c)$ são os índices de estabilidade de tensão da barra crítica do sistema - c , ou seja, a barra que apresenta o menor IET_1 ou IET_2 ; L_{km} é a perda de potência ativa no trecho $k-m$; $NLIN$ é o número total de linhas (trechos) do sistema; $P_{km_{SE,SE_1}}$ representa o fluxo de potência da subestação para a primeira barra adjacente à mesma; $P_{km_{SE,SE_j}}$ representa o fluxo de potência da subestação à j -ésima barra adjacente, excluindo-se a primeira barra - SE_1 ; SE é a subestação do sistema; NSE representa o número

de subestações; Ω_{SE} é o conjunto de barras adjacentes à SE, excetuando-se SE_1 ; CH_{km} é o estado associado à chave manobrável acoplada ao trecho $k-m$; Pg_k e Qg_k são as gerações de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra k ; Pl_k e Ql_k são as cargas ativa e reativa, respectivamente, na barra k ; P_{km} e Q_{km} são os fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no trecho $k-m$; Ω_k é o conjunto de barras diretamente ligadas à barra k por trechos de distribuição; g_{km} representa a condutância do trecho $k-m$; V_k é o módulo de tensão da barra k ; $\cos \theta_{km}$ é o cosseno do ângulo de fase entre as barras k e m ; e V_{min} é o limite mínimo de tensão.

Destaca-se que no modelo da função objetivo FOB_1 , os índices IET_1 e IET_2 serão avaliados separadamente. Em ambos os casos, a barra c com o valor mínimo de IET_1 ou IET_2 será a barra crítica no que se refere ao problema de estabilidade de tensão, cujo índice em questão deverá ser maximizado. Os dois índices são usados para avaliar a sua aplicabilidade quanto à capacidade de mensurar estabilidade de tensão de um SDE.

A função objetivo FOB_2 é usada para minimizar as perdas técnicas de energia em um SDE. Tais perdas impactam financeiramente nos custos envolvidos no SDE, logo, um planejamento adequado da operação destes sistemas para a redução das perdas ao longo da cadeia de distribuição de energia elétrica é muito importante.

A função objetivo FOB_3 é usada para maximizar o balanceamento entre os alimentadores que saem da subestação, em termos de carregamento. Esta função visa evitar alimentadores sobrecarregados ou com carga excessiva em relação aos demais e está intimamente relacionada ao aumento de eficiência, qualidade e confiabilidade operativa do sistema.

As restrições em (4) e (5) representam os balanços de potência ativa e reativa, respectivamente, em cada barra do sistema. A restrição em (7) representa a natureza discreta das chaves de manobra, em que $CH_{km} = 0$ significa que a chave acoplada ao trecho $k-m$ está aberta, enquanto que $CH_{km} = 1$ significa chave fechada. Se um trecho de distribuição $k-m$ não tem chave, CH_{km} é fixado em 1. A restrição operacional de tensão mínima é formulada em (8). A modelagem também considera as restrições de radialidade e de conectividade da rede elétrica, representadas em (9). Estas restrições significam que uma topologia candidata à

solução não pode formar laços ou caminhos fechados na rede e não pode apresentar barras desconectadas, ou seja, sem fornecimento de energia.

O primeiro índice utilizado foi proposto em (PUJARA e VAIDYA, 2011). A referência apresenta um índice de estabilidade calculado para todas as barras de uma rede radial de distribuição, a fim de identificar a barra mais sensível ao colapso de tensão. Cada trecho da rede é representado através de um circuito elétrico equivalente, em que a carga da barra receptora do fluxo de potência é modelada como o somatório da própria carga com o somatório dos fluxos nas linhas que derivam desta barra. A Equação (10) indica a formulação deste índice.

$$IET_1(m) = V_k^4 - 4 \cdot (P_{km} \cdot x_{km} - Q_{km} \cdot r_{km})^2 - 4 \cdot (P_{km} \cdot r_{km} + Q_{km} \cdot x_{km}) \cdot V_k^2 \quad (10)$$

O segundo índice utilizado foi proposto em (EMINOGLU e HOCAOGLU, 2009). Os autores desenvolveram o índice baseado nas equações de transferência de potência ativa e reativa em linha de distribuição. O desempenho do índice é testado em diferentes condições de carga e diferentes níveis de tensão na subestação. Os resultados ainda sugerem que o índice proposto é viável em sistemas com geração distribuída. O segundo índice é representado pela Equação (11).

$$IET_2(m) = 2 \cdot V_k^2 \cdot V_m^2 - V_m^4 - 2 \cdot V_m^2 \cdot (P_{km} \cdot r_{km} + Q_{km} \cdot x_{km}) - |z_{km}|^2 \cdot (P_{km}^2 + Q_{km}^2) \quad (11)$$

Em que r_{km} , x_{km} e z_{km} são a resistência, reatância e impedância equivalente do trecho $k-m$. Desta forma, as barras m à jusante de cada trecho têm seus índices calculados conforme equações anteriores, a partir do primeiro trecho. Nota-se que, de acordo com estas formulações, os índices não são calculados para a barra à montante do primeiro trecho, ou seja, para a subestação do SDE, pois esta barra dispensa a análise de estabilidade por ter sua tensão controlada.

Capítulo 3

METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se na aplicação da técnica meta-heurística SIA para propor resultados ótimos com base em três objetivos da reconfiguração em SDE. Para tanto, utiliza-se o algoritmo de otimização CLONR proposto em (OLIVEIRA, *et al.* 2014), que aplica os fundamentos do SIA de forma dedicada ao problema de reconfiguração. Estes fundamentos e o algoritmo CLONR são descritos a seguir.

3.1 O Sistema imunológico

Com o intuito de manter o organismo saudável, o sistema imunológico natural (SIN) possui mecanismos avançados de reconhecimento e combate a agentes infecciosos externos (chamados patógenos) que, por sua vez, possuem padrões moleculares específicos (chamados antígenos). Quando estes antígenos são reconhecidos pelas células do SIN, a resposta imunológica, ou seja, a reação de defesa do organismo é disparada (COELHO, 2011). Esta resposta pode acontecer de duas formas: resposta rápida e disparada imediatamente, conhecida como resposta imunológica inata; ou uma resposta igualmente eficaz a primeira, porém, de maneira lenta e específica a cada tipo de patógeno, chamada de resposta imunológica adaptativa. Juntos, os sistemas imunológicos inato e adaptativo formam um mecanismo de defesa extremamente eficiente e que opera em paralelo, recorrendo a uma diversidade de agentes e componentes distribuídos espacialmente e operando em rede (COELHO, 2011).

Apesar da importância do sistema imunológico inato, o foco do trabalho estará apenas nos mecanismos responsáveis pelo funcionamento da resposta imunológica adaptativa, que é a principal fonte de inspiração para os sistemas imunológicos artificiais (SIA's).

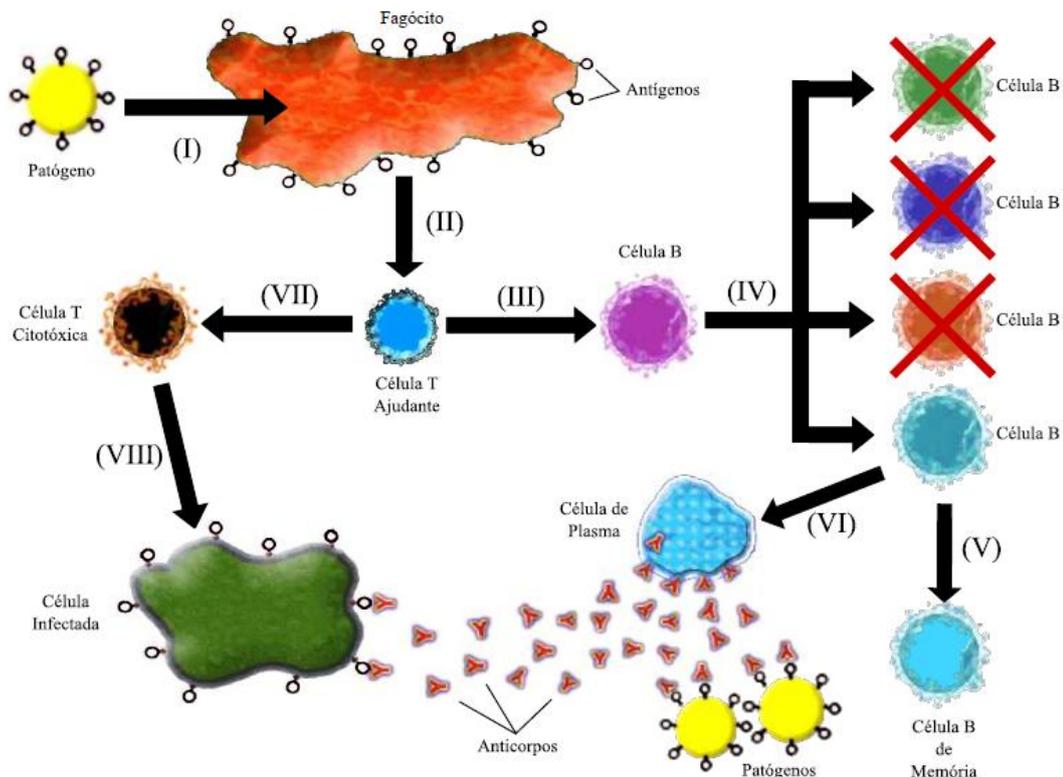
3.1.1 A resposta imunológica adaptativa e o princípio da seleção clonal

Dentre os vários componentes presentes no sistema imunológico adaptativo, os linfócitos merecem uma atenção especial. Existem dois tipos principais de linfócitos, os linfócitos B (ou células B) e os linfócitos T (ou células T), que possuem em sua superfície receptores de antígenos com alta especificidade. Estas células atuam na resposta adaptativa através do reconhecimento e da eliminação de patógenos, e também através da constituição da

chamada memória imunológica. A memória imunológica corresponde basicamente à capacidade que as células do sistema adaptativo têm de reconhecer um mesmo antígeno (ou um antígeno semelhante) quando houver uma infecção recorrente, levando assim a uma resposta imunológica mais rápida e que pode até mesmo evitar o restabelecimento da doença no organismo. Graças a estes mecanismos, a resposta adaptativa dá ao sistema imunológico a capacidade de aprender e se aprimorar a cada infecção sofrida.

A Figura 2 (COELHO, 2011) ilustra o processo da resposta imunológica adaptativa em diversas etapas. Nesta situação hipotética, o patógeno possui apenas um tipo de antígeno, mas na prática, um mesmo patógeno geralmente possui múltiplos antígenos distintos.

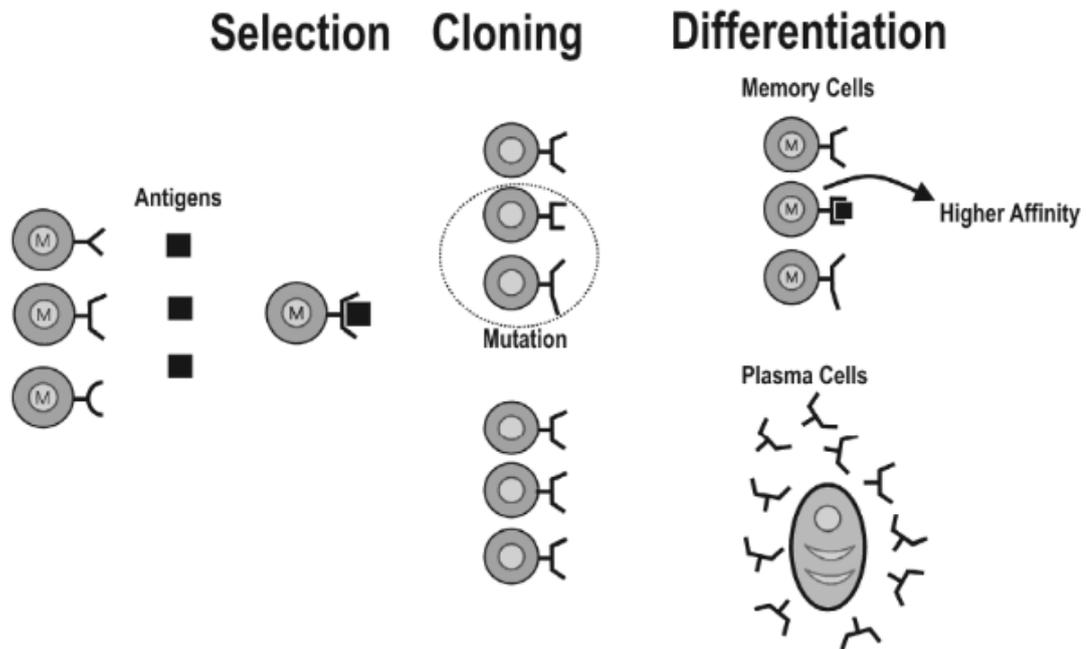
Fig. 2: Resposta imunológica adaptativa: (I) fagocitose e quebra do patógeno por fagócitos; (II) reconhecimento dos antígenos pelas células T; (III) estímulo da produção de células B; (IV) maturação de afinidade; (V) diferenciação de parte das células B em células de memória; (VI) diferenciação de parte das células B em células de plasma; (VII) estímulo da produção de células T citotóxicas; e (VIII) eliminação de células do próprio organismo infectadas pelo patógeno. Esta figura ilustra uma situação hipotética e que o patógeno possui apenas um tipo de antígeno.



Fonte: (COELHO, 2011).

Os processos de expansão clonal, hipermutação e seleção das células são conhecidos como Princípio de Seleção Clonal e englobam uma das principais ferramentas em Sistemas Imunológicos Artificiais. A Figura 3 ilustra este princípio.

Fig. 3: Ilustração do Princípio de Seleção Clonal



Fonte: (COELHO, 2011).

Dentre as variadas características do SIN, podemos destacar aquelas que são interessantes do ponto de vista computacional (DE CASTRO, 2009):

- **Reconhecimento de padrões:** o SIN é capaz de reconhecer células e moléculas não pertencentes ao organismo, e eliminar aquelas potencialmente danosas;
- **Deteção de anomalias:** o SIN é capaz de reconhecer e reagir a agentes infecciosos mesmo sem que tenha ocorrido nenhum contato prévio;
- **Deteção imperfeita (ou tolerância ruído):** o reconhecimento de um agente infeccioso não precisa ser perfeito para que a resposta imunológica seja disparada, ou seja, não é necessário que os receptores presentes nas células do SIN sejam exatamente complementares aos padrões moleculares dos antígenos do patógeno para que haja a ativação das células imunológicas;
- **Diversidade de componentes:** o SIN não é constituído de apenas um componente que atua sozinho. Existe uma grande variedade de elementos (células, moléculas, etc.) que possuem funções específicas e, quando atuam em conjunto, levam à resposta imunológica;
- **Aprendizado de memória:** graças ao mecanismo de adaptação de células B ao antígeno invasor e à sua diferenciação em células B de memória, o SIN é capaz de

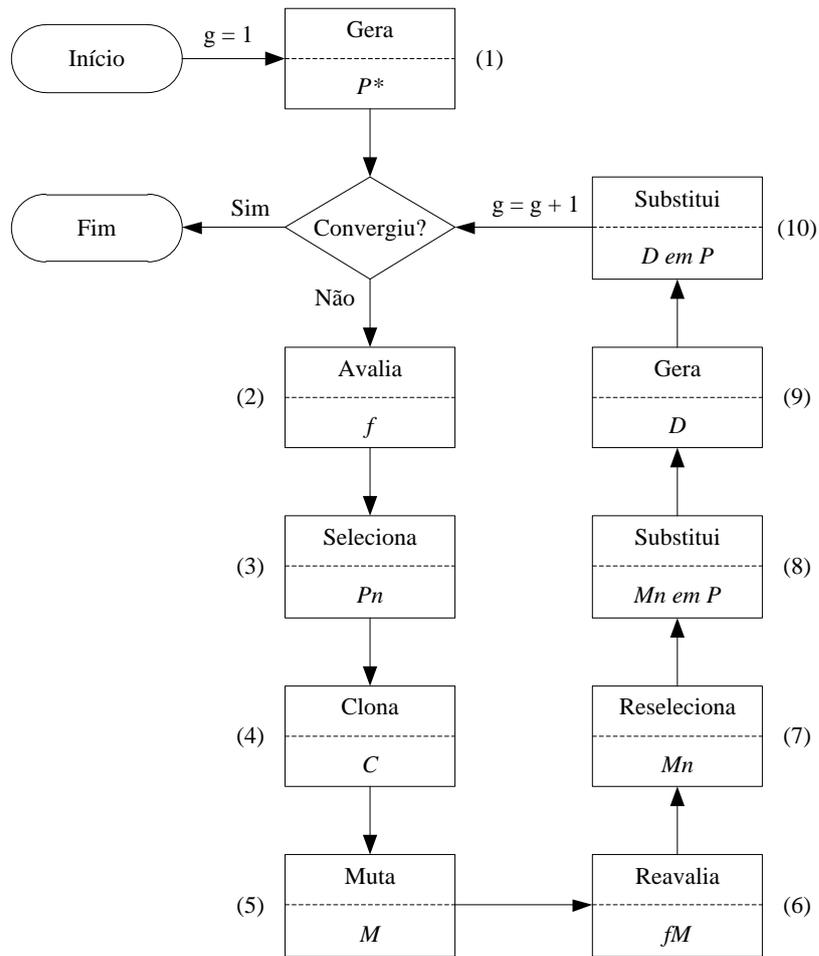
aprender a estrutura molecular de cada patógeno e se lembrar de tal assinatura em futuras infecções, o que permite uma resposta mais rápida;

- **Descentralização:** as células do SIN estão espalhadas por todo o organismo e não existe um elemento central que as controle;
- **Variância dinâmica de componentes:** o sistema imunológico promove constantes mudanças em seu repertório de células, para que seja capaz de se adaptar a novas situações adversas o mais rápido possível;

3.2 Algoritmo CLONR

O algoritmo CLONR proposto em (OLIVEIRA, *et al.*, 2014) é baseado no algoritmo de seleção clonal de (DE CASTRO e VON ZUBEN, 2002) em que os fundamentos da técnica SIA (DE CASTRO e VON ZUBEN, 1999) e (DE CASTRO e VON ZUBEN, 2000) são aplicados a problemas de otimização combinatória. O fluxograma do algoritmo CLONR é mostrado na Figura 4.

Fig. 4: Fluxograma do Algoritmo CLONR



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No problema de reconfiguração via técnica SIA, não existe um antígeno para ser reconhecido, mas uma função objetivo a ser otimizada. As etapas do algoritmo da Figura 3 são descritas a seguir.

Passo 1: Geração inicial de anticorpos do repertório P^* : é gerada a população de anticorpos P^* . Este processo ocorre aleatoriamente através da troca dos estados das chaves (0 ou 1) referentes à topologia inicial do sistema. Destaca-se que P^* representa uma matriz $[NAb \times L]$, onde NAb é o número de anticorpos e L é o número de atributos de cada anticorpo. Os atributos são os estados das chaves manobráveis, 0 para chave fechada e 1 para chave aberta. A matriz gerada é composta apenas por topologias radiais e conexas. Esta matriz é gerada apenas na primeira geração do processo. Após a formação inicial do repertório de anticorpos em P^* , o algoritmo segue para o Passo 2 com o repertório $P = P^*$.

Passo 2: Avaliação da afinidade f dos anticorpos de P : a afinidade de um anticorpo é diretamente proporcional ao seu índice de estabilidade de tensão e o balanceamento. Ou seja, quanto maior o índice de estabilidade e maior o balanceamento, maior é a qualidade da solução. O mesmo raciocínio é associado às perdas técnicas, ou seja, quanto menor as perdas, maior a afinidade e qualidade da solução. Cada topologia de rede candidata é avaliada através de uma ferramenta de fluxo de potência (MONTICELLI, 1983).

Passo 3: Seleção dos melhores anticorpos de P : neste passo, os melhores anticorpos de P são selecionados para compor o repertório P_n . Fazem parte de P_n somente os anticorpos diferentes entre si e que atendem à restrição de tensão mínima (V_{min}).

Passo 4: Clonagem dos anticorpos de P_n : os anticorpos previamente selecionados em P_n são clonados, formando a população C . O número de clones de cada anticorpo é dado pela Equação (12).

$$N_c(i) = \text{round}(\beta \cdot f^*(i)) \quad (12)$$

Onde $\text{round}(x)$ é o operador que arredonda x para o valor inteiro mais próximo; β é o parâmetro de controle no processo de clonagem e $f^*(i)$ é a afinidade normalizada, calculada através da Equação (13).

$$f^*(i) = \{1 + \exp[-(f(i) - \bar{f})/\delta^*]\} \quad (13)$$

Em que $f(i)$ é a afinidade do anticorpo; \bar{f} é a média aritmética das afinidades dos anticorpos de P_n e δ^* é o desvio padrão das afinidades dos anticorpos de P_n .

Passo 5: Hipermutação somática: neste passo ocorre o processo de mutação dos anticorpos do repertório C , formando o conjunto de clones maduros M . A probabilidade de mutação (p) dos anticorpos formados em C é dada pela Equação (14).

$$p(i) = \exp(-r \cdot f_C^*(i)) \quad (14)$$

Onde r é o parâmetro que controla o processo de hipermutação e $f_C^*(i)$ é a afinidade normalizada do anticorpo clone “ i ”, dada pela afinidade normalizada $f^*(i)$ do anticorpo que o gerou.

Passo 6: Avaliação da afinidade fM dos anticorpos de M : ocorre o processo descrito no Passo 2 para determinar o vetor afinidade fM .

Passo 7: Seleção dos melhores anticorpos de M : ocorre o processo descrito no Passo 3 formando a população Mn .

Passo 8: Substituição dos anticorpos de P pelos anticorpos de Mn : os piores anticorpos de P são substituídos pelos anticorpos selecionados no Passo 7.

Passo 9: Edição de receptores: gera-se uma quantidade “ d ”, pré-definida, de anticorpos, de modo aleatório, formando o conjunto D . Estes anticorpos substituem os “ d ” anticorpos com menor afinidade da população P . Este passo confere diversidade ao repertório, a fim de evitar a convergência prematura do algoritmo e assim estender a busca por uma solução ótima global ou sub-ótima de melhor qualidade. O método de geração utilizado neste passo é igual ao descrito no Passo 1, com exceção da topologia base, que não é incluída no conjunto D .

Passo 10: Substituição dos anticorpos de P pelos anticorpos de D : os “ d ” piores anticorpos de P são substituídos pelos anticorpos formados no Passo 9.

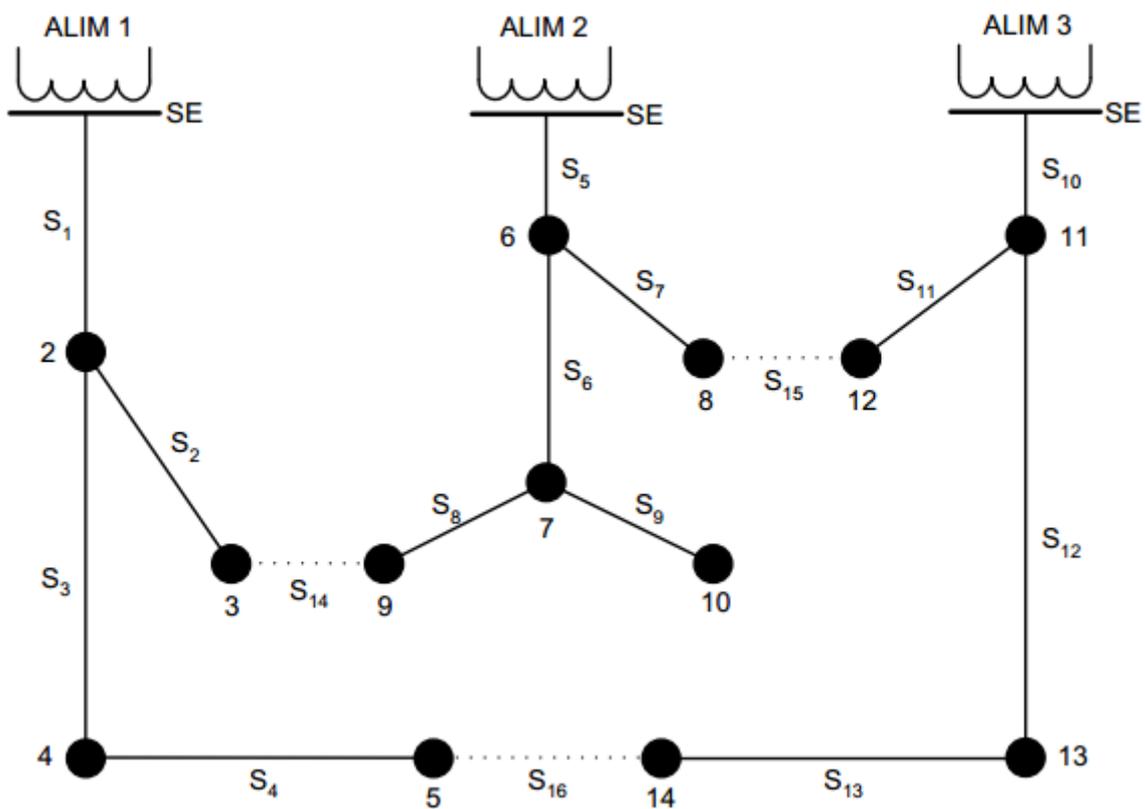
Após o passo 10, o contador de geração (g) é incrementado e o critério de convergência é avaliado. Este critério é satisfeito quando pelo menos uma das seguintes condições é verdadeira: (i) o número de gerações atinge um valor limite dado por $gmax$; (ii) a melhor solução do repertório P permanece inalterada durante um número de gerações dado por $gstop$. Caso não ocorra convergência o algoritmo retorna ao Passo 2.

Capítulo 4

TUTORIAL DE APLICAÇÃO

O sistema teste de 16 barras (CIVANLAR, 1988) será usado para apresentar de forma detalhada a solução passo a passo de cada etapa do algoritmo proposto para reconfiguração via SIA tendo em vista os três objetivos. Este sistema é composto de 3 alimentadores de 23 kV e 16 linhas, sendo 13 chaves seccionadoras ou normalmente fechadas (NF) e 3 chaves de interconexão ou normalmente abertas (NA). A carga total deste sistema é de 28,9 MW. A Figura 5 apresenta a topologia inicial deste sistema, na qual as linhas contínuas representam as chaves NF e as linhas tracejadas representam as chaves NA.

Fig. 5: Topologia inicial do Sistema de 16 barras



Fonte: (CIVANLAR, 1988)

4.1 Etapa 1

O primeiro passo do algoritmo consiste na geração da população inicial de anticorpos, esta geração inclui apenas topologias radiais e conexas utilizando-se um algoritmo de criação baseado em teoria de grafos (GOLGBARG e LUNA, 2005). Nesta etapa é formado a matriz P [$NAb \times L$], onde NAb é o número de anticorpos dado pelo dobro do número de chaves manobráveis e L é o número de atributos, ou seja, propriamente o número de chaves manobráveis. O Essa matriz é a partir da troca de estados das chaves manobráveis (0 ou 1) referentes à topologia inicial do sistema e formada apenas nesta etapa, posteriormente, ela passa a sofrer mecanismos de evolução na população.

Para este sistema, o número de chaves manobráveis é 13, logo, a matriz P possui 26 linhas e 13 colunas. A Etapa 1 é concluída com a formação dos 26 anticorpos com 13 atributos cada.

Fig. 6: Matriz gerada na primeira etapa do algoritmo

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \cdot & & & & & & & & & \vdots & & \\ \vdots & & \cdot & & & & & & & & \vdots & & \\ \vdots & & & \cdot & & & & & & & \vdots & & \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Destaca-se que o primeiro anticorpo é a topologia inicial do sistema.

4.2 Etapa 2

Nesta etapa é onde se calcula as funções objetivos. Os três objetivos são analisados individualmente a fim de permitir ao operador uma avaliação da melhor condição operativa. Todos os anticorpos de P são avaliados através de uma ferramenta de fluxo de potência via método de Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983).

4.2.1 Cálculo de maximização da estabilidade de tensão

Para maximizar a estabilidade de tensão deve-se calcular os dois índices de estabilidade de tensão sugeridos no Capítulo 2. Os índices são calculados a partir de variáveis resultantes do fluxo de potência, é calculado o valor de cada índice para todas as barras do

sistema, ao final é formado um vetor com 13 posições variáveis entre 0 e 1. Sendo que, quanto mais próximo de 0, maior é a instabilidade de tensão. A partir do vetor de índices formados, seleciona-se o índice de menor valor, ou seja, o índice da barra crítica. Por exemplo, o vetor dos dois índices para a topologia inicial do sistema é apresentado a seguir:

$$IET_1 = [1,0000 \ 0,9624 \ 0,9519 \ 0,9448 \ 0,9409 \ 0,9152 \ 0,8881 \ 0,9108 \ 0,8888 \ \mathbf{0,8824} \\ 0,9775 \ 0,9795 \ 0,9675 \ 0,9655]$$

$$IET_2 = [1,0000 \ 0,9809 \ 0,9575 \ 0,9540 \ 0,9430 \ 0,9559 \ 0,9034 \ 0,9148 \ 0,8890 \ \mathbf{0,8858} \\ 0,9887 \ 0,9787 \ 0,9727 \ 0,9666]$$

Nos dois casos, o menor índice de estabilidade de tensão é o da barra 10, logo, a barra crítica para a topologia inicial do sistema é a barra 10. O valor do índice de estabilidade na barra crítica é tomado como FOB, tendendo a maximizá-lo.

4.2.2 Cálculo de minimização das perdas técnicas

O cálculo das perdas técnicas é feito a partir do somatório das perdas de potência ativa em cada linha do sistema. As parcelas de perdas, em kW, de cada linha da topologia inicial são:

$$L_{km} = [61,6315 \ 7,5103 \ 11,9451 \ 1,5216 \ 278,3385 \ 87,0102 \ 2,0862 \ 0,7117 \ 19,7046 \\ 29,0760 \ 2,0097 \ 7,8345 \ 2,0557]$$

O somatório de L_{km} representa as perdas totais que devem ser minimizadas.

$$Perdas_{totais} = 511,4356 \text{ kW}$$

Então, para a topologia inicial do sistema, as perdas de potência ativa ao longo de toda a rede é de 511,4356 kW.

4.2.3 Cálculo de maximização do balanceamento entre alimentadores

O máximo balanceamento entre alimentadores é dado pela mínima diferença entre os fluxos de potência da subestação às barras a ela adjacentes. Assim, de acordo com a Figura 5,

as barras adjacentes à subestação são as barras 2, 6 e 11. Adota-se a barra 2 como a primeira barra adjacente e faz os cálculos do balanceamento como se segue:

$$Fator_{balanc} = (P_{1,2} - P_{1,6})^2 + (P_{1,2} - P_{1,11})^2$$

Este cálculo é feito para todos os anticorpos do sistema. O vetor de balanceamento para os 26 anticorpos gerados na primeira etapa é:

$$Fator_{balanc} = [0,0060 \ 0,0723 \ 0,0108 \ 0,0143 \ 0,0250 \ 0,0090 \ 0,0142 \ 0,0181 \ 0,0181 \ 0,0082 \ 0,0055 \ 0,0606 \ 0,0153 \ 0,0072 \ 0,0605 \ 0,0159 \ 0,0142 \ 0,0110 \ 0,0055 \ 0,0159 \ 0,0108 \ 0,0059 \ 0,0072 \ 0,0070 \ 0,0168 \ 0,0082]$$

O anticorpo com o menor valor neste vetor de fator de balanceamento é aquele que representa o maior balanceamento entre as cargas.

4.3 Etapa 3

A terceira etapa é feita para selecionar os melhores anticorpos, formando a matriz P_n . Esta matriz é composta apenas pelos anticorpos diferentes entre si e que atendem à restrição de tensão mínima. Vale destacar que a matriz P_n também ordena os anticorpos em ordem crescente de afinidade. Da matriz P de 26 anticorpos da primeira etapa, foram selecionados 22 para compor P_n .

4.4 Etapa 4

Os anticorpos selecionados na terceira etapa, agora passam pela etapa de clonagem, formando a matriz C . O número de clones de uma topologia é diretamente proporcional à afinidade, ou seja, quanto maior a afinidade de um anticorpo, maior o número de clones que ele irá gerar. O vetor abaixo ilustra a quantidade de clones de cada um dos 22 anticorpos selecionados da terceira etapa:

$$Nclones = [9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 8 \ 8 \ 8 \ 8 \ 8 \ 8 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 6 \ 5 \ 4 \ 4 \ 3 \ 3]$$

Os primeiros anticorpos, que são os melhores, foram aqueles que mais geraram clones. O número total de clones neste processo é igual a 151.

4.5 Etapa 5

A quinta etapa é a mutação da matriz de clones C , formando a matriz M . A mutação ocorre a partir do cálculo da probabilidade de mutação de cada anticorpo, ao contrário da clonagem, a probabilidade de mutação é inversamente proporcional à afinidade do anticorpo. Então, gera-se um vetor de probabilidades de mutação com números entre o intervalo de 0 a 1, sorteia-se um número neste mesmo intervalo, se o número sorteado for menor que a probabilidade de mutação o anticorpo é candidato à mutação.

O processo de mutação de um anticorpo é caracterizado por uma pequena alteração na estrutura de sua topologia, neste caso, altera-se o estado de duas chaves manobráveis na topologia e verifica se ela continua radial e conexa.

4.6 Etapa 6

Nesta etapa ocorre o mesmo processo descrito na Etapa 2, a diferença é que a população em avaliação são os anticorpos clonados e mutados, dados pela matriz M .

4.7 Etapa 7

A seleção dos melhores anticorpos de M é feita de acordo com o processo descrito na terceira etapa. Deve-se manter o mesmo número de anticorpos selecionados na Etapa 3.

4.8 Etapa 8

A oitava etapa é a substituição dos melhores anticorpos selecionados na Etapa 7. Assim, os 22 anticorpos selecionados são substituídos na população inicial gerada na Etapa 1, provocando uma atualização e melhorias na população.

4.9 Etapa 9

O objetivo desta etapa é gerar uma quantidade “ d ” pré-definida de anticorpos de modo aleatório para conferir diversidade ao repertório e levar a novas regiões de busca. A quantidade de anticorpos é dado pela Equação (15).

$$d = \text{round}(0,05 * NAb) \quad (15)$$

Para este sistema, o resultado é a geração de apenas um anticorpo aleatório.

4.10 Etapa 10

O anticorpo aleatório gerado na Etapa 9 é substituído no lugar do pior anticorpo da população P .

Após a décima etapa, o contador de gerações é incrementado e o critério de convergência é avaliado, este critério é satisfeito ou quando atinge um número máximo de 50 gerações ou quando a melhor solução é repetida como resposta por 15 vezes.

Capítulo 5

RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os estudos de casos realizados para avaliar a implantação do algoritmo e seus três objetivos de melhoria no SDE através de reconfiguração via técnica SIA. Nas simulações realizadas, a tensão da barra da subestação (SE) é considerada igual a 1,00 p.u. e a tensão mínima a 0,9 p.u.. Os testes foram realizados utilizando-se um microcomputador Intel® Core™ i5, 2,50 GHz, 4,00 GB de memória RAM. O algoritmo foi implementado utilizando-se o software MATLAB® versão R2014a. Foram realizados três estudos de casos em três sistemas diferentes, 16, 94 e 33 barras. Neste caso, o sistema de 33 barras foi deixado para ser explorado por último pelo fato de que o objetivo de balanceamento não se aplica porque o sistema possui apenas uma subestação.

Para avaliar o impacto de cada um dos três objetivos foram realizadas três análises, de acordo com:

Análise 1: considera a maximização da estabilidade de tensão como função objetivo, conforme formulado na Equação (1). Esta análise é dividida em duas partes:

Análise 1.1: o índice de estabilidade descrito pela Equação (10) é maximizado.

Análise 1.2: o índice de estabilidade descrito pela Equação (11) é maximizado.

Análise 2: considera a minimização de perdas técnicas como função objetivo, conforme formulado na Equação (2).

Análise 3: considera a maximização do balanceamento entre alimentadores como função objetivo, conforme formulado na Equação (3).

A Tabela 1 apresenta os valores utilizados para os parâmetros do SIA, que foram determinados empiricamente através de testes preliminares. Estes valores foram utilizados em todos os estudos de casos deste trabalho.

Tabela 1: Parâmetros do algoritmo CLONR para reconfiguração do SDE.

Parâmetro	NAb	β	r	d	$gmax$	$gstop$
Valor	$2*NCM$	3	0,2	$round(0,05*NCM)$	50	15

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.1 Caso 1: Sistema de 16 barras

A configuração do sistema de 16 barras foi descrita no Capítulo 4 deste trabalho. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com o algoritmo CLONR para este sistema.

Tabela 2: Resultados do algoritmo CLONR para o sistema de 16 barras.

Topologia	Chaves abertas	IET_1	IET_2	Barra crítica	V_{min} (p.u.)	$Perdas_{totais}$	$Fator_{balanc}$
Inicial	14, 15, 16	0,8824	0,8858	10	0,9613	511,4356	0,006
Análises - 1.1, 1.2, 2 e 3	7, 8, 16	0,8908	0,8943	10	0,9716	466,1267	0,0031

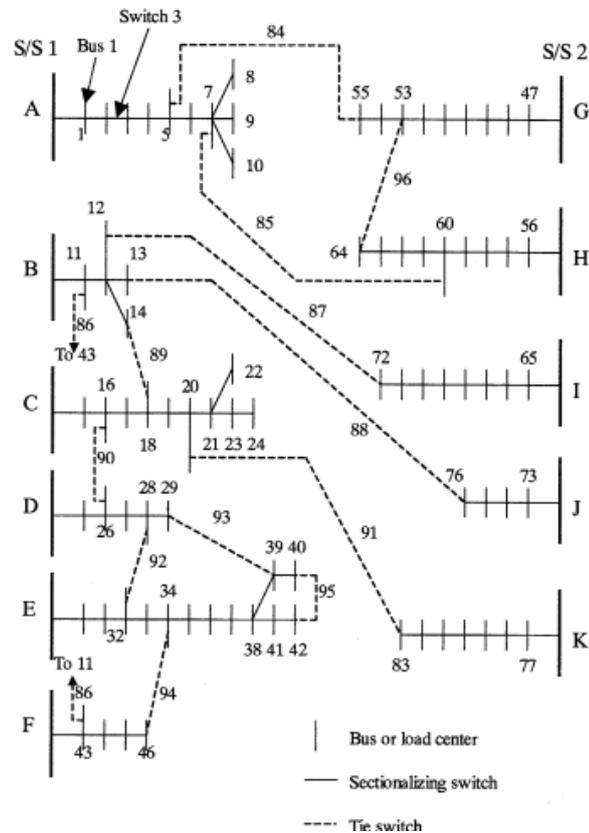
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota-se que o algoritmo encontrou a mesma topologia ótima para todas as análises, implicando em um aumento na estabilidade de tensão observado pelos índices e pela própria tensão. As perdas diminuíram em aproximadamente 10% e o fator de diferença do balanceamento também diminuiu, de 1,0 pu e a tensão mínima do sistema é igual a 0,9 pu. Para cada análise, o algoritmo foi executado dez vezes, e em todas as execuções, a mesma solução foi encontrada para uma mesma análise, demonstrando a robustez do algoritmo. Destaca-se que esta avaliação de robustez é relevante em se tratando de um método de otimização probabilístico. Por se tratar de um sistema de pequeno porte, o tempo computacional foi consideravelmente rápido, as respostas foram obtidas em torno de onze segundos.

5.2 Caso 2: Sistema de 94 barras

Este caso foi feito a fim avaliar a eficiência do algoritmo em sistemas de maiores portes, para tanto, o sistema de distribuição de 94 barras da Taiwan Power Corporation (TPC) (CHIOU, *et al.*, 2005) será utilizado. A Figura 7 mostra o diagrama deste sistema, que tem carga total de 28.350,0 kW e 20.700,0 kVAr, consistindo de 11 alimentadores de 11,4 kV, duas subestações e 96 linhas. As linhas tracejadas correspondem às 13 chaves de interconexão (NA): S84 - S96. O número total de chaves manobráveis é 89.

Fig. 7: Topologia inicial do Sistema de 94 barras



Fonte: (CHIOU, *et al.*, 2005).

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos considerando as análises previamente descritas em comparação com a topologia inicial do sistema.

Tabela 3: Resultados do algoritmo CLONR para o sistema de 94 barras.

Topologia	Chaves abertas	IET_1	IET_2	Barra crítica	V_{min} (p.u.)	$Perdas_{totais}$	$Fator_{balanc}$
Inicial	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96	0,7433	0,7457	9	0,9285	531,9945	0,0012
Análise 1.1	7, 34, 39, 55, 61, 72, 82, 86, 88, 89, 90, 92, 93	0,8254	0,8311	71	0,9532	471,1416	0,0010
Análise 1.2	7, 13, 34, 37, 40, 55, 62, 71, 82, 86, 89, 90, 92	0,8133	0,8369	9	0,9491	511,0254	0,0019
Análise 2	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	0,8254	0,8311	71	0,9532	469,8775	0,00066
Análise 3	7, 13, 34, 39, 55, 64, 72, 86, 89, 90, 91, 92, 95	0,7968	0,7993	9	0,9448	477,5479	0,00028

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Pelo fato de se tratar de um sistema de médio porte, com elevadas combinações de configurações, o algoritmo encontrou topologias diferentes para cada análise realizada. Tal fato também implicou em um elevado tempo computacional, o algoritmo retorna as topologias ótimas somente após uma hora de execução. Percebe-se que nos resultados encontrados em todos os casos, as aplicações de reconfiguração foram alcançadas, ou seja, houve um aumento dos índices de estabilidade de tensão, redução das perdas técnicas e aumento do balanceamento quando comparado à topologia inicial do sistema. Os objetivos não são conflitantes entre si, o compromisso entre eles, ou seja, a prioridade entre as três melhorias operativas é estabelecida pela escolha da função objetivo.

Fazendo-se uma espécie de balança entre os objetivos, a melhor configuração foi a obtida na Análise 2 do trabalho, neste caso, a topologia encontrada possui os maiores índices de estabilidade de tensão, maior nível de tensão mínima e menores perdas. Apenas o objetivo de balanceamento não foi o melhor, ficando atrás apenas para o resultado da Análise 3, tal fato é justificável, pois na Análise 3 a prioridade é a maximização do balanceamento. Ainda vale destacar que houve mudança da barra crítica, que na topologia inicial era a barra 9 e passou a ser a barra de número 71.

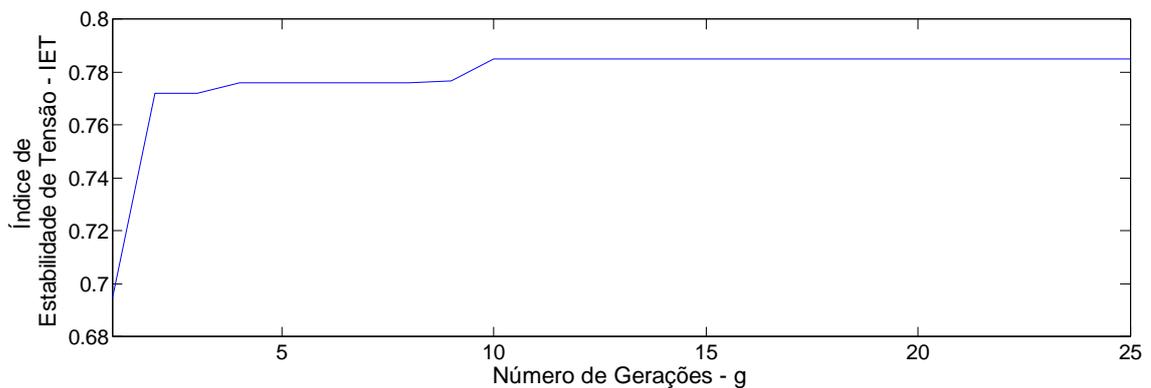
5.3 Caso 3: Sistema de 33 barras

O terceiro estudo de caso é o sistema de 33 barras (BARAN e WU, 1989). A carga total deste sistema é de 3715,0 kW e sua tensão é de 12,66 kV. O sistema de 33 barras é composto por 37 linhas, incluindo 5 chaves NA, e sua topologia inicial é mostrada na Figura 8. Para este sistema, a Análise 3 não é levada em conta pelo fato do sistema possui apenas 1 alimentador.

Nas Análises 1.1 e 1.2, como a função objetivo é maximizar a estabilidade de tensão, verifica-se que a tensão mínima V_{min} obtida é maior se comparada com a tensão da análise 2. Como consequência, os níveis de tensão da rede são melhores para a função objetivo associada com a estabilidade de tensão através dos índice utilizados. Em contrapartida, as perdas do sistema são menores na solução da Análise 2, que considera a minimização de perdas técnicas como função objetivo. A solução encontrada nesta análise é a mesma de (OLIVEIRA, et al., 2014; RESENDE, et al., 2011) para este caso de estudo. Observa-se que nas duas análises, a reconfiguração resulta em otimização do sistema tanto com relação à perda quanto com relação à estabilidade de tensão em comparação com a topologia inicial.

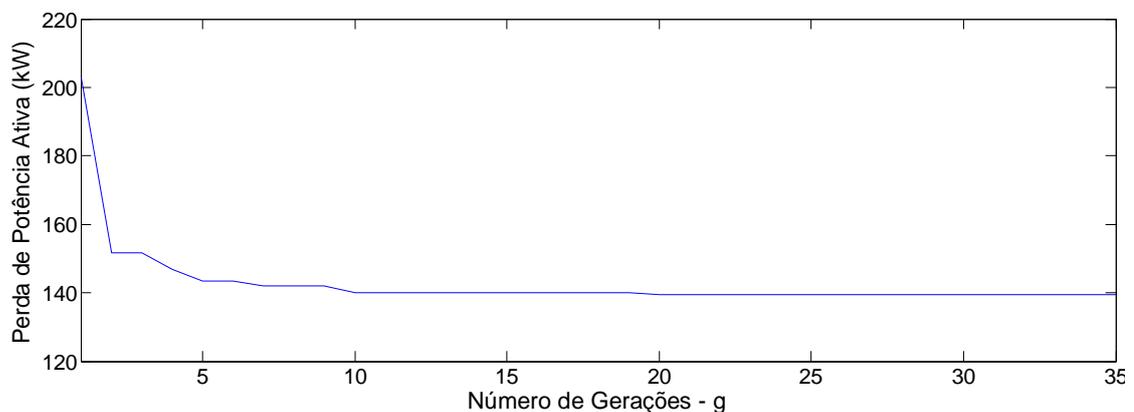
As Figuras 9 e 10 mostram a evolução, durante o processo iterativo do algoritmo proposto, do índice de estabilidade de tensão da Análise – 1.1 e da perda de potência na Análise - 2, respectivamente.

Fig. 9: Evolução do índice de estabilidade de tensão, Análise 1.1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

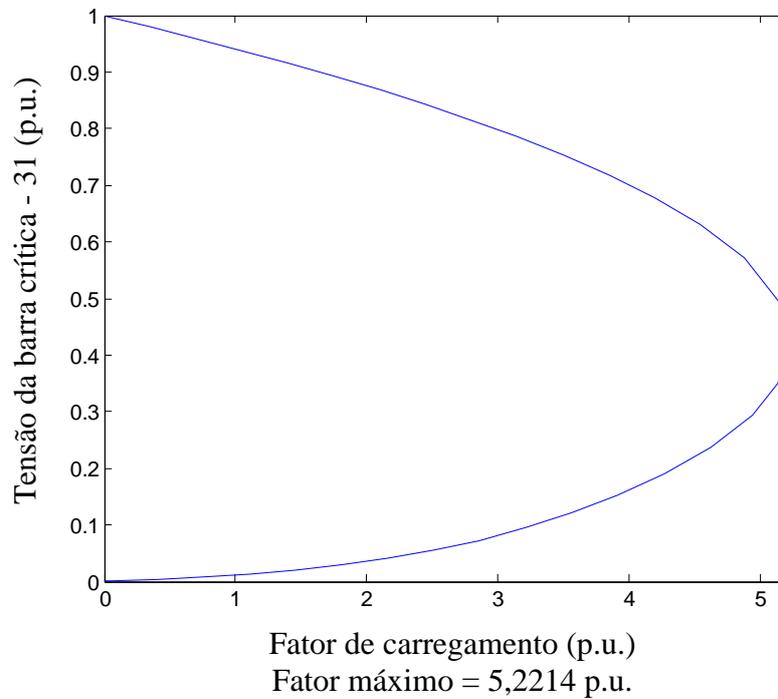
Fig. 10: Evolução das perdas técnicas, Análise 2.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

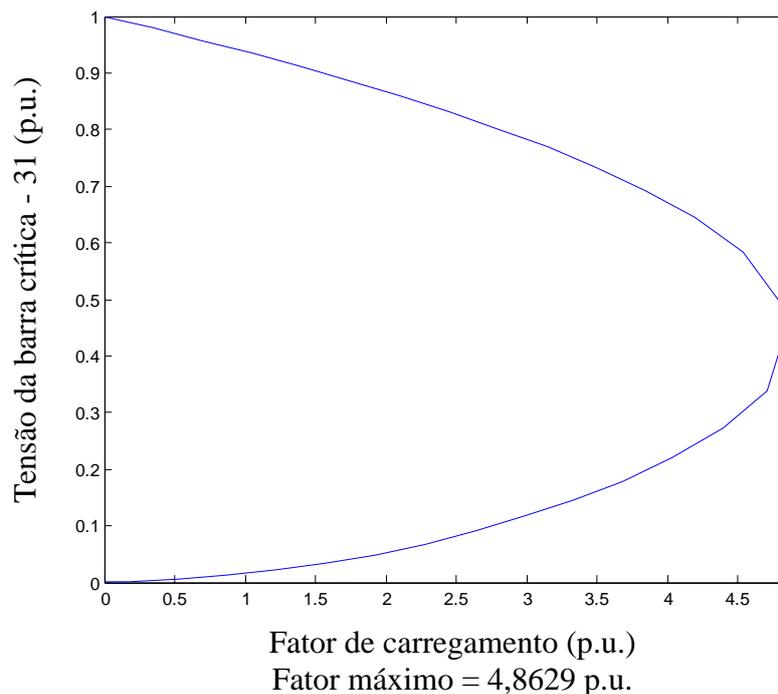
A reconfiguração visando aumento de estabilidade de tensão proporciona maior confiabilidade ao sistema, tal fato é ilustrado a partir das Curvas P-V para as Análises – 1.1 e 2 (Figuras 11 e 12, respectivamente).

Fig. 11: Evolução do índice de estabilidade de tensão, Análise 1.1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Fig. 12: Evolução das perdas técnicas, Análise 2.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Percebe-se que o fator de carregamento quando se opta por maximizar a estabilidade de tensão é maior que o fator ao optar por minimizar perdas. O tempo computacional neste caso foi de aproximadamente noventa segundos.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia de reconfiguração de redes radiais de distribuição via técnica meta-heurística Sistemas Imunológicos Artificiais. O trabalho visou otimizar três objetivos do Sistema de Distribuição de Energia, que são maximizar a estabilidade de tensão, minimizar as perdas técnicas de energia e maximizar o balanceamento de cargas entre alimentadores. Para tanto, utilizou-se um algoritmo de seleção clonal da literatura com dedicação para reconfiguração, dois índices de estabilidade de tensão e formulação para o cálculo das perdas e do balanceamento.

Foi feita uma avaliação do impacto de se considerar a aplicação do algoritmo para cada um dos três objetivos citados de forma individual. Conclui-se que os objetivos não são conflitantes entre si, eles possuem uma relação de compromisso, a escolha de qual objetivo deseja-se atuar varia de acordo com as necessidades operacionais do trabalho.

A ferramenta de reconfiguração considera a topologia inicial em malha, e a partir desta topologia, executa um processo passo a passo de abertura de chaves até que uma configuração radial e conexa seja obtida. Portanto, as restrições de radialidade e conectividade foram adequadamente tratadas pelo algoritmo de reconfiguração proposto.

Vale destacar que a representação de limites físicos e operacionais do sistema aumenta a complexidade da reconfiguração, podendo causar grande impacto nas soluções obtidas.

O algoritmo proposto demonstrou robustez e eficácia na determinação da reconfiguração que otimiza os objetivos considerados. Destaca-se que a opção de maximizar a estabilidade de tensão e o balanceamento entre cargas no alimentadores em sistemas de distribuição através de reconfiguração via sistemas imunológicos artificiais é ainda pouco explorada na literatura.

6.1 Sugestões Para Estudos Futuros

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida neste trabalho e tendo em vista os resultados obtidos, os seguintes tópicos tornam-se promissores para trabalhos futuros:

- Formulação do próprio índice de estabilidade de tensão baseado em um circuito equivalente de distribuição;
- Representar curvas de carga com duração e tarifas para minimizar o custo associado às perdas técnicas;
- Utilizar técnica multi-objetivo para compor os três objetivos em apenas uma função objetivo, considerando critérios de Pareto para resolver o problema.

REFERÊNCIAS

AHMAD, N. H.; RAHMAN, T. K. A.; AMINUDDIN, N. Multi-objective quantum-inspired Artificial Immune System approach for optimal network reconfiguration in distribution system. In: **Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International**. IEEE, 2012. p. 384-388.

ALONSO, F. R. et al. Distribution system reconfiguration using artificial immune systems. In: **North American Power Symposium (NAPS), 2014**. IEEE, 2014. p. 1-6.

BARAN, Mesut E.; WU, Felix F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Transactions on power Delivery**, v. 4, n. 1, p. 725-734, 1989.

BETTONI, Luiz MM et al. Uma aproximação linear para modelagem matemática do balanceamento de cargas em redes de distribuição. **Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 286-297, 2009.

CHIOU, Ji-Pyng; CHANG, Chung-Fu; SU, Ching-Tzong. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.

CIVANLAR, Seyhan et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Trans. Power Del.;(United States)**, v. 3, n. 3, 1988.

COELHO, Guilherme Palermo. **Redes imunológicas artificiais para otimização em espaços contínuos: uma proposta baseada em concentração de anticorpos**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

DE CASTRO, Leandro Nunes; VON ZUBEN, Fernando J. Learning and optimization using the clonal selection principle. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 3, p. 239-251, 2002.

DE CASTRO, Leandro Nunes; VON ZUBEN, Fernando José. Artificial immune systems: Part I—basic theory and applications. **Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de, Tech. Rep**, v. 210, 1999.

DE CASTRO, Leandro Nunes; VON ZUBEN, Fernando José. Artificial immune systems: Part II—A survey of applications. **FEEC/Univ. Campinas, Campinas, Brazil**, 2000.

DE CASTRO, Pablo Alberto Dalbem. **Sinergia entre Sistemas Imunológicos Artificiais e Modelos Gráficos Probabilísticos**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

DENG, Ping; SUN, Yuanzhan; XU, Jian. A new index of voltage stability considering distribution network. In: **2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**. IEEE, 2009. p. 1-4.

EMINOGLU, U.; HOCAOGLU, M. H. A NETWORK TOPOLOGY-BASED VOLTAGE STABILITY INDEX FOR RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS. **International Journal of Power & Energy Systems**, v. 29, n. 2, p. 131, 2009.

GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique Pacca L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Elsevier, 2005.

GUIMARAES, Marcos AN; LORENZETI, Jorge FC; CASTRO, Carlos A. Reconfiguration of distribution systems for stability margin enhancement using tabu search. In: **Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on**. IEEE, 2004. p. 1556-1561.

KALANTAR, Mohsen; DASHTI, Rahman; DASHTI, Reza. Combination of network reconfiguration and capacitor placement for loss reduction in distribution system with based genetic algorithm. In: **Proceedings of the 41st international universities power engineering conference**. IEEE, 2006. p. 308-312.

KAYAL, Partha; CHANDA, Sayonsom; CHANDA, C. K. An ANN based network reconfiguration approach for voltage stability improvement of distribution network. In: **Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference on**. IEEE, 2011. p. 1-7.

MAHMOUD, G. A. Voltage stability analysis of radial distribution networks using catastrophe theory. **IET generation, transmission & distribution**, v. 6, n. 7, p. 612-618, 2012.

MANTOVANI, José RS; CASARI, Fernando; ROMERO, Rubén A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Controle and Automacao**, p. 150-159, 2000.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. E. Blucher, 1983.

OLIVEIRA, Leonardo W. et al. Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 56, p. 64-74, 2014.

OLIVEIRA, Leonardo W. et al. Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 20, n. 2, p. 233-246, 2009.

PUJARA, Avani Jigar; VAIDYA, Geetanjali. Voltage stability index of radial Distribution network. In: **Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International Conference on**. IEEE, 2011. p. 180-185.

RESENDE, P. V. C. et al. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica via sistemas imunológicos artificiais. In: **Proc 9th Latin-American congress on electricity generation and transmission Mar del Plata Argentina**. 2011. p. 5.

SETA, F. S. et al. Alocação Ótima de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição via Sistemas Imunológicos Artificiais e Fluxo de Potência Ótimo. **Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ**, 2013.

SOUZA, Alexandre AA de. **Modelos matemáticos para auxílio ao planejamento e projeto de redes secundárias de distribuição**. 2002. 129 f. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Informática Industrial)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba.

SOUZA, Alexandre AA de; NEVES JR, Flávio; LOPES, Heitor Silvério. Sistema de avaliação da rede secundária de distribuição utilizando Algoritmos Genéticos. **Espaço Energia, Curitiba-PR, nro**, v. 5, p. 34-41, 2006.

ZHENG, Ce; KEZUNOVIC, Mladen. Distribution system voltage stability analysis with wind farms integration. In: **North American Power Symposium (NAPS), 2010**. IEEE, 2010. p. 1-6.