

APLICAÇÃO DE SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL PARA AUMENTO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Ewerton Luiz Ferreira

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário. Bairro São Pedro, Juiz de Fora - MG
ewerton.ferreira@engenharia.ufjf.br

Leonardo Willer de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário. Bairro São Pedro, Juiz de Fora - MG
leonardo.willer@ufjf.edu.br

Edimar José de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário. Bairro São Pedro, Juiz de Fora - MG
edimar.oliveira@ufjf.edu.br

RESUMO

Este artigo propõe uma metodologia de otimização baseada em técnica meta-heurística bioinspirada para a maximização da estabilidade de tensão de sistemas de distribuição, através de reconfiguração de redes elétricas. A técnica utilizada baseia-se na meta-heurística denominada Sistema Imunológico Artificial. O problema de otimização apresenta restrições de rede e operacionais, como a estrutura radial e conexa da rede e os limites de tensão nodal. Testes com sistemas conhecidos da literatura são realizados para demonstrar o impacto de se considerar a estabilidade de tensão como o objetivo do problema de reconfiguração.

PALAVRAS CHAVE. Sistema Imunológico Artificial, Reconfiguração, Estabilidade de Tensão.

Área principal: EN - PO na Área de Energia

ABSTRACT

This paper proposes an optimization methodology based on a metaheuristic technique to increase the voltage stability of electrical distribution systems through the network reconfiguration. The technique used is based on the metaheuristic known as Artificial Immune System. The optimization problem presents network and operational constraints, as the radial structure and the limits of nodal voltage. Tests with well-known systems of the literature are performed to demonstrate the impact of considering the voltage stability as the objective of the optimal reconfiguration problem.

KEYWORDS. Artificial Immune System, Reconfiguration, Voltage Stability.

Main area: EN – Operational Research in the Energy Area

1. Introdução

Um sistema elétrico de potência pode ser dividido em quatro segmentos: geração, transmissão, distribuição e consumo. Dentre esses, destaca-se 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) e as perdas técnicas (Oliveira et al., 2014; Alonso et al., 2014) ao longo da cadeia produção-transporte-consumo de energia elétrica. A reconfiguração consiste na determinação da topologia radial e conexa da rede, através da definição dos estados (aberto/fechado) de chaves manobráveis (Kalantar et al., 2006).

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 (Guiping 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). O índice de estabilidade de tensão proposto em (Pujara e Vaidya, 2011) é utilizado no presente trabalho. Este índice identifica a barra crítica do sistema sob o ponto de vista do colapso de tensão e pode variar em um intervalo de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior é a estabilidade. Demonstra-se para vários casos de carregamento crítico que a barra indicada pelo índice é a primeira a entrar em colapso de tensão.

O problema de reconfiguração do SDE 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, como as técnicas meta-heurísticas, incluindo-se métodos bioinspirados (Barbosa et al., 2013) como o Sistema Imunológico Artificial (SIA).

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. Em (Kayal et al., 2011; Guimarães et al., 2004), redes neurais artificiais e um algoritmo de busca tabu são aplicados para a reconfiguração visando aumento de estabilidade, respectivamente. Oliveira et al. (2014) tratam a minimização de perdas técnicas através de reconfiguração utilizando SIA, onde os autores avaliam o impacto de representar diferentes níveis de carga. Alonso et al. (2014) também propuseram a aplicação de SIA para a reconfiguração de SDE visando redução de perdas.

Seguindo esta linha de pesquisa, o presente trabalho apresenta um modelo para o problema de reconfiguração que visa à maximização de estabilidade de tensão do SDE. A técnica de otimização aplicada é o SIA, ainda pouco explorada na literatura para a reconfiguração com foco no problema de estabilidade. Outra contribuição deste trabalho é a comparação entre os resultados do problema de reconfiguração quando se considera a máxima estabilidade de tensão

como função objetivo e quando se considera a minimização de perdas. 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 da literatura para comparar os resultados do modelo de otimização entre os objetivos de máxima estabilidade e mínima perda.

2. Modelagem do Problema de Reconfiguração

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia visando maximizar a estabilidade de tensão pode ser formulado através de sua função objetivo (*FOB*) e respectivas restrições, conforme modelado a seguir.

$$\text{Max } FOB = \min_m IET(m) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} [CH_{km} \cdot P_{km}] = 0 \quad (1.1)$$

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} [CH_{km} \cdot Q_{km}] = 0 \quad (1.2)$$

$$CH_{km} = 0 \text{ ou } 1 \quad (1.3)$$

$$V_k, V_m \geq V_{min} \quad (1.4)$$

$$\text{Radialidade e Conectividade} \quad (1.5)$$

Em que $\min_m IET(m)$ é o menor índice de estabilidade de tensão entre as barras do sistema, que indica a barra crítica; 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 ; Ω_k é o conjunto de barras diretamente ligadas à barra k por trecho de distribuição; CH_{km} é o valor associado à chave manobrável acoplada ao trecho $k-m$; P_{km} e Q_{km} são os fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no trecho $k-m$; V_k é o módulo de tensão da barra k ; V_{min} é o limite mínimo de tensão.

A modelagem também considera as restrições de radialidade e conectividade da rede elétrica, representadas em (1.5). Em outras palavras, 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 índice de estabilidade de tensão (Pujara e Vaidya, 2011) para uma barra m , terminal de um trecho que se inicia na barra k , é calculado conforme Equação (2).

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

Em que r_{km} e x_{km} são a resistência e a susceptância do trecho $k-m$, respectivamente.

3. Metodologia Proposta

Este artigo propõe a aplicação da técnica meta-heurística Sistema Imunológico Artificial para maximizar a estabilidade de tensão de SDE através de reconfiguração de redes. Para tanto, utiliza-se o algoritmo de otimização CLONR proposto em (Oliveira et al., 2014), que é baseado no SIA e dedicado ao problema de reconfiguração para perdas mínimas.

3.1 Fundamentação Teórica sobre o SIA

O SIA consiste em uma meta-heurística inspirada no sistema imunológico natural dos vertebrados (Silva e Zuben, 2002). No sistema imunológico natural, a célula B é o componente responsável por produzir e secretar anticorpos como resposta aos agentes patogênicos. Cada célula B possui um único padrão de receptor, só podendo reconhecer um tipo antigênico específico. A relação entre receptor e o antígeno é definida como a afinidade de ligação (Resende et al., 2011).

A ativação da célula B ocorre quando a afinidade entre receptor-antígeno é superior a um valor limite. Assim, inicia-se o processo denominado maturação de afinidade, que é dividido em duas etapas. Inicialmente, a atuação conjunta dos mecanismos de seleção clonal e hipermutação somática possibilita a exploração local da região de soluções. Em contrapartida, na outra etapa, o mecanismo de geração de novas células, ou edição de receptores, permite que o processo de busca saia de sub-regiões de ótimos locais, através da inserção de diversidade populacional. Assim, as duas etapas executam funções complementares para a maturação de afinidade.

3.2 Algoritmo CLONR

O algoritmo CLONR proposto em (Oliveira et al., 2014) é baseado no algoritmo de seleção clonal de (Silva e Zuben, 2002; Resende et al., 2011), em que os fundamentos da técnica SIA (Castro e Zuben, 1999; Castro e Zuben, 2000) são aplicados a problemas de natureza combinatória. O fluxograma do algoritmo CLONR é mostrado na Figura 1.

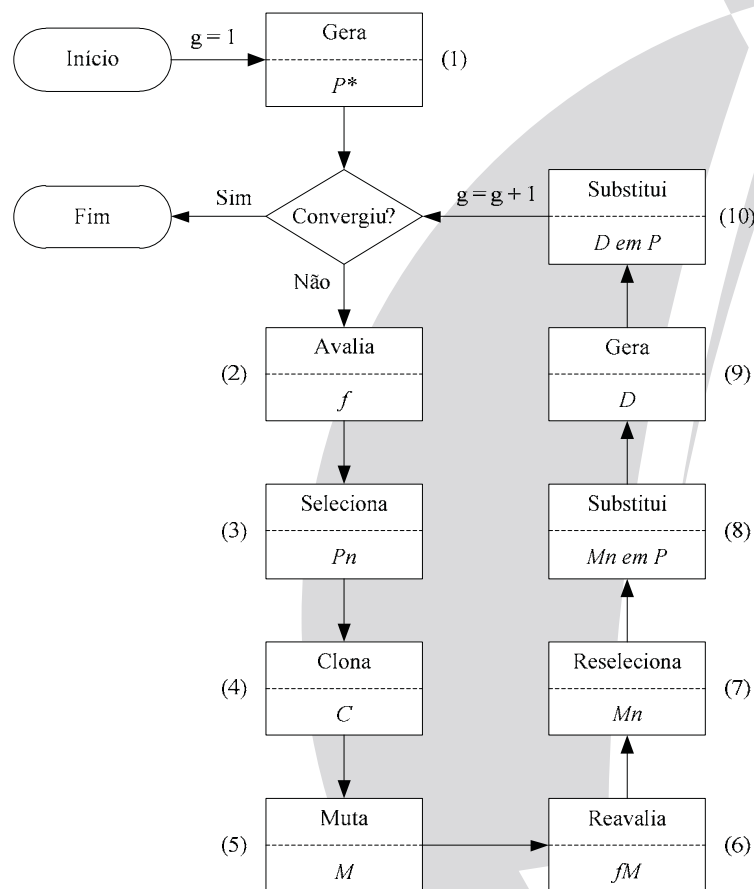


Figura 1: Fluxograma do algoritmo CLONR.

No problema de reconfiguração via técnica SIA, não existe um antígeno para ser reconhecido, mas uma função objetivo a ser otimizada. Neste trabalho, esta função será definida como a estabilidade de tensão. As etapas do algoritmo da Figura 1 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 $[N \times L]$, onde N é o número de anticorpos e L é o número de atributos de cada anticorpo. 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. Ou seja, quanto maior o índice de estabilidade, maior é a 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 (3).

$$N_c(i) = \text{round}(\beta \cdot f^*(i)) \quad (3)$$

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 (4).

$$f^*(i) = \{1 + \exp[-(f(i) - \bar{f})/\delta^*]\} \quad (4)$$

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 (5).

$$p(i) = \exp(-r \cdot f_C^*(i)) \quad (5)$$

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 f_M dos anticorpos de M : ocorre o processo descrito no Passo 2 para determinar o vetor afinidade f_M .

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

Passo 8: Substituição dos anticorpos de P pelos anticorpos de M_n : 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 (Barbosa et al., 2013).

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.

4. Resultados

Nesta seção, são apresentados os estudos de casos realizados para avaliar o aumento da estabilidade de tensão de 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 (V_{min}) igual a 0,9 p.u.. Os testes foram realizados utilizando-se um microcomputador Intel® Core™ i5, 2,50 GHz, 2,50 GHz, 4,00 GB de memória RAM. O algoritmo foi implementado utilizando-se o software MATLAB® versão R2014a.

Para avaliar o impacto da estabilidade de tensão como objetivo do problema de reconfiguração, comparações são realizadas com resultados do algoritmo proposto considerando-se minimização de perdas técnicas como função objetivo. Ou seja, para cada caso, duas análises são realizadas:

Análise-1: considera a maximização da estabilidade de tensão como função objetivo, conforme formulado na Equação (1).

Análise-2: considera a minimização de perda técnica como função objetivo, conforme (Oliveira et al., 2014; Barbosa et al., 2013; Resende et al., 2011).

Para cada análise, o algoritmo foi executado dez vezes, e em todas as execuções, a mesma solução foi encontrada para uma mesma análise, demonstrando assim a robustez do algoritmo. A Tabela 1 apresenta os valores utilizados para os parâmetros do SIA, que foram determinados empiricamente através de testes preliminares.

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

Parâmetro	NAb	β	r	d	$gmax$	$gstop$
Valor	$2*NCK$	3	0.2	1	50	15

Em que NCK representa o número de chaves manobráveis do sistema e os demais parâmetros foram descritos anteriormente.

4.1 Caso 1: Sistema de 16 barras

O sistema de 16 barras da literatura (Civanlar et al., 1988) é composto por três alimentadores, 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 e sua tensão é de 23 kV. A topologia inicial é mostrada na Figura 2.

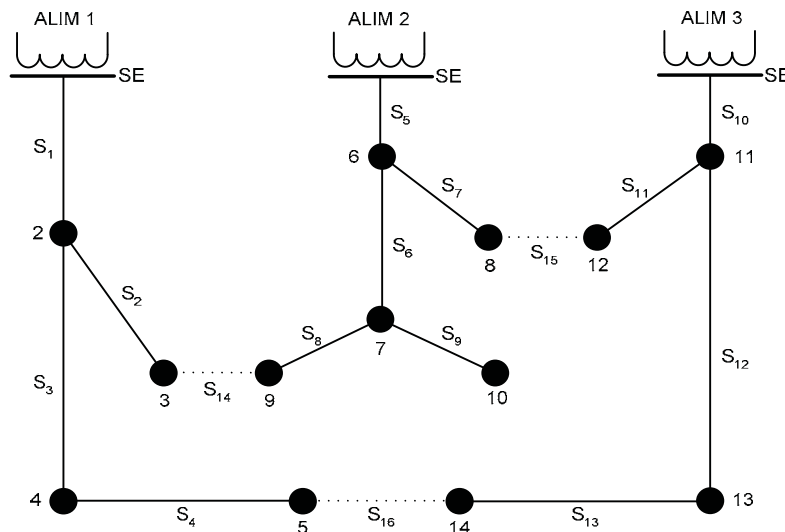


Figura 2: Topologia inicial do sistema de 16 barras (Civanlar et al., 1988).

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos da aplicação do algoritmo CLONR para o sistema de 16 barras.

Tabela 2: Resultados obtidos para o sistema de 16 barras.

	Chaves abertas	<i>IET</i>	Barra crítica	V_{min} (p.u.)	Perdas (kW)
Inicial	14, 15, 16	0,8824	10	0,9613	511,4356
Análises-1 e 2	7, 8, 16	0,8908	10	0,9716	466,1267

Observa-se que a aplicação do algoritmo proposto implica no aumento do índice de estabilidade (*IET*), ou seja, na melhoria da estabilidade de tensão do sistema. Neste caso, as Análises-1 e 2 conduziram à mesma topologia, ou seja, para este caso, a topologia que maximiza a estabilidade de tensão é a mesma que minimiza as perdas. Este resultado é o mesmo encontrado em (Barbosa et al., 2013) para minimização de perdas.

4.2 Caso 2: Sistema de 33 barras

Para o segundo estudo de caso foi utilizado 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 de interconexão ou normalmente abertas (NA), e sua topologia inicial é mostrada na Figura 3.

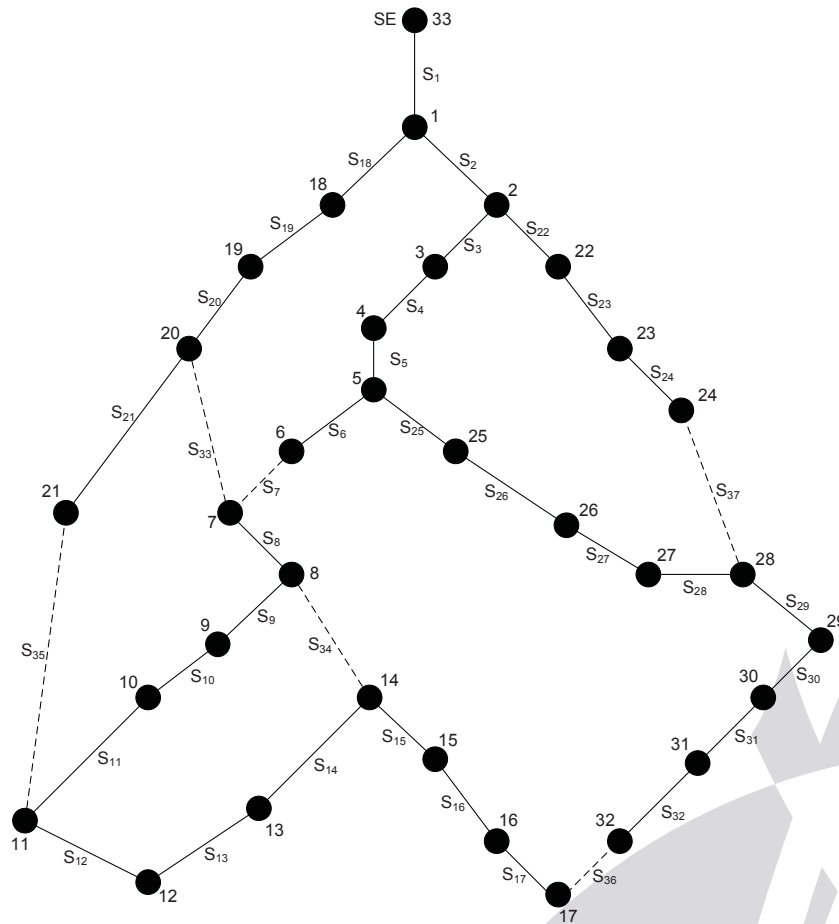


Figura 3: Topologia inicial do sistema de 33 barras (Baran e Wu, 1989).

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo proposto para o sistema de 33 barras.

Tabela 3: Resultados obtidos para o sistema de 33 barras.

	Chaves abertas	<i>IET</i>	Barra crítica	V_{min} (p.u)	Perdas (kW)
Inicial	33, 34, 35, 36, 37	0,6951	17	0,9131	202,6771
Análise-1	7, 9, 14, 28, 32	0,7850	31	0,9413	139,9782
Análise-2	7, 9, 14, 32, 37	0,7735	31	0,9378	139,5513

Para o sistema de 33 barras, nota-se que o algoritmo proposto encontra topologias diferentes para a maximização da estabilidade de tensão (Análise-1) e para a minimização de perdas (Análise-2).

Na Análise-1, 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 do índice utilizado. 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. Portanto, verifica-se que os dois objetivos considerados no

presente trabalho não são conflitantes, pois quando se minimiza a perda, melhora-se a estabilidade de tensão, e vice-versa, conforme Tabelas 2 e 3. Porém, o compromisso entre estes dois objetivos, ou seja, a prioridade entre as duas melhorias operativas é estabelecida pela escolha da função objetivo, conforme mostrado na Tabela 3.

As Figuras 4 e 5 mostram a evolução, durante o processo iterativo do algoritmo proposto, do índice de estabilidade de tensão na Análise-1 e da perda de potência na Análise-2, respectivamente.

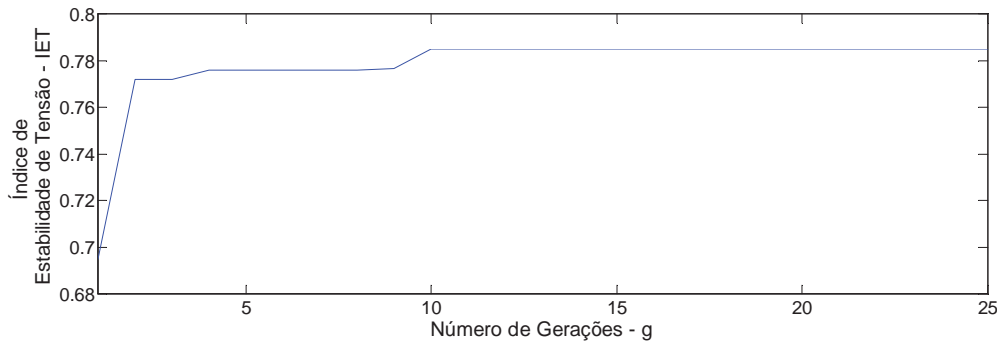


Figura 4: Evolução do *IET* (Análise-1).

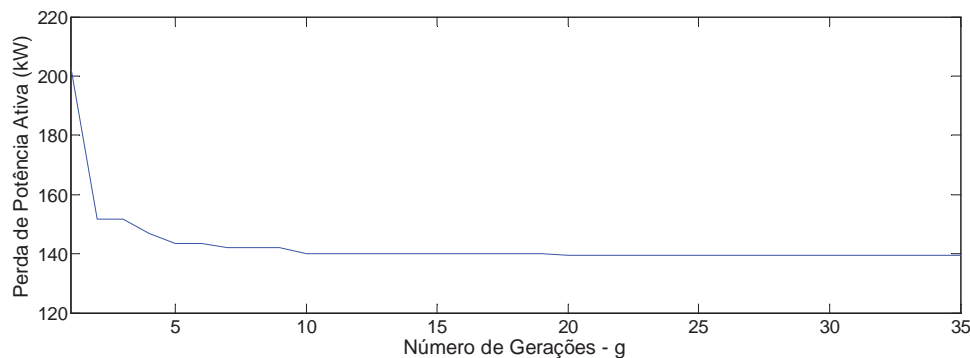


Figura 5: Evolução da perda técnica (Análise-2).

5. Conclusão

Este trabalho apresentou uma aplicação da técnica sistema imunológico artificial para a maximização da estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia através da reconfiguração de redes elétricas. Para tanto, utilizou-se um algoritmo de seleção clonal da literatura dedicado ao problema de reconfiguração, substituindo-se a minimização de perdas pela maximização de estabilidade de tensão como função objetivo. Comparações entre os resultados da reconfiguração considerando-se a perda mínima ou a estabilidade máxima como objetivo do modelo de otimização foram realizadas. Como conclusões, verificou-se que estes objetivos não são conflitantes entre si, embora a escolha da função estabeleça uma ordem de prioridade entre os mesmos. O algoritmo proposto demonstrou robustez e eficácia para a reconfiguração ótima de redes elétricas, opção ainda pouco investigada na literatura para o problema de estabilidade.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao apoio da FAPEMIG, CAPES, CNPq, INERGE, e ao apoio do grupo de pesquisa 'Otimização Heurística e Bioinspirada', da UFJF.

Referências

- Ahmad, N. H., Rahman T. K. A. e Aminuddin N.** (2012), Multi-objective quantum-inspired artificial immune system approach for optimal network reconfiguration in distribution system, *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO)*, 384-388.
- Kayal, P., Chanda, S. e Chanda, C.K.** (2011), An ANN based network reconfiguration approach for voltage stability improvement of distribution network, *Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference on*, 1-7.
- Guimaraes, M.A.N., Lorenzetti, J.F.C. e Castro, C.A.** (2004), Reconfiguration of distribution systems for stability margin enhancement using tabu search, *Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on*, 2, 1556-1561.
- Oliveira, L. W., Oliveira, E. J., Gomes, F. V., Silva Jr., I. C., Marcato, A. L. M., Resende, P. V.C.** (2014), Artificial Immune Systems Applied to the Reconfiguration of Electrical Power Distribution Networks for Energy Loss Minimization, *International Journal Electrical Power and Energy Systems*, 56, 64-74.
- Alonso, F. R., Oliveira, D.Q., De Souza, A.C.Z e Lopes, B.I.L.** (2014), Distribution system reconfiguration using artificial immune systems, *North American Power Symposium (NAPS), 2014*, 1-6.
- Kalantar, M., Dashti R. e Dashti R.** (2006), Combination of Network Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction in Distribution System With Based Genetic Algorithm, *Proc. 41st International Universities Power Engineering Conference (UPEC '06), Newcastle upon Tyne, UK*, 1, 308-312.
- Mahmoud, G. A.** (2012), Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks Using Catastrophe Theory, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 6, 7, 612-618.
- Guiping, D., Yuanzhan, S. e Jian X.** (2009), A New Index of Voltage Stability Considering Distribution Network, *Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2009)*, 1-4.
- Zheng, C. e Kezunovic, M.** (2010), Distribution System Voltage Stability Analysis with Wind Farms Integration, *North American Power Symposium (NAPS)*, 1-6.
- Pujara, A. J. e Vaidya, G.** (2011), Voltage Stability Index of Radial Distribution Network, *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, 180-185.
- Barbosa, F. S. V., Vicente L. M., Oliveira, L. W., Gomes F. V. e Silva Jr, I. C.** (2013), Reconfiguração e Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição via Sistemas Imunológicos Naturais, *XV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Brasil*, 1-8.
- Silva, L. N. C. e Zuben, F. J. V.** (2002), Learning and optimization using the clonal selection principle, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 6, 3, 239-251.
- Resende, P. V. C., Oliveira, L. W., Oliveira, E. J., Gomes, F. V., Oliveira, A. R., Variz, A. M. e Silva Jr., I. C.** (2011), Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Via Sistemas Imunológicos Artificiais, *9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE)*, 1-5.
- Castro, L. N. e Zuben, F. J. V.** (1999), Artificial Immune Systems: Part I – Basic Theory and Applications. *Technical Report TR-DCA*, 01/99.
- Castro, L. N. e Zuben, F. J. V.** (2000) Artificial Immune Systems: Part II – A Survey of Applications. *Technical Report DCA-RT*, 02/00.
- Monticelli, A. J.**, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Edgard Blücher, São Paulo, 1983.
- Civanlar, S., Grainger, J. J. e Yin, H.** (1988), Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction, *IEEE Trans. Power Delivery*, 3, 3, 1217-1223.
- Baran, M. E. e Wu, F. F.** (1989), Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Trans. Power Delivery*, 4, 2, 1401-1407.