

# Uma Proposta de Operação dos Sistemas de Transmissão considerando Redes de Distribuição Ativas via Sistemas Imunológicos Artificiais

Diogo Marujo

Antonio Carlos Zambroni de Souza

Benedito Isaías de Lima Lopes

Bruno de Nadai Nascimento

Francisco Martins Portelinha Jr.

ISEE - Instituto de Sistemas Elétricos e de Energia

Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, Brasil

diogomarujo@hotmail.com

Denisson Queiroz Oliveira

IEE – Instituto de Energia Elétrica

Universidade Federal do Maranhão

São Luiz, Brasil.

denissonqo@gmail.com

**Abstract**—Com a presença cada vez maior de fontes de geração distribuída conectadas aos sistemas de distribuição, é necessário considerar a possibilidade do fluxo de potência entre os sistemas de transmissão e de distribuição se tornar bidirecional. Neste caso, a operação e o planejamento devem considerar a coordenação dos equipamentos existentes para controle de tensão em ambos os sistemas. Esta coordenação é proposta neste trabalho através de um controlador que recebe informações dos equipamentos de controle de tensão e fontes de geração distribuída e fornece *setpoints* para estes equipamentos. Para isso é realizado um processo de otimização que utiliza a técnica de sistemas imunológicos artificiais. Discussões são realizadas através de um estudo de caso, que considera um sistema de transmissão ligado a uma rede de distribuição ativa. Os limites de tensão e geração são considerados.

**Index Terms**— Estabilidade de Tensão, Geração Distribuída, Redes de Distribuição Ativas.

## I. INTRODUÇÃO

Fontes de geração conectadas ao sistema de distribuição (SD) representam uma das grandes inovações observadas nos últimos anos em sistemas elétricos de potência (SEP). Este cenário tornou-se plausível principalmente devido aos consideráveis avanços na área de eletrônica de potência, permitindo obter maior flexibilidade no controle das fontes de geração. O surgimento do conceito de *smart-grids*, sobretudo no que diz respeito à medição e comunicação entre os agentes presentes no sistema, também tem propiciado diversos avanços em direção as redes elétricas do futuro.

Diversas referências encontradas na literatura destacam os benefícios resultantes da utilização de geração distribuída (GDs) [1]-[2]. Contudo, apesar dos diversos benefícios, alguns desafios são observados, tais como: adequação dos equipamentos já existentes; determinação de novas fontes e gerenciamentos das fontes já existentes; avaliação dos desvios

de frequência resultantes do balanço carga/geração; análise do desempenho da rede de transmissão seja por sobretensão, sobrecarga ou problemas de estabilidade. Evidentemente que cada um dos pontos supracitados demanda estudos específicos. Este artigo tem como foco avaliar o último dos itens, isto é, avaliar a interação entre os sistemas de transmissão e distribuição quando da presença de GDs.

O impacto causado pela conexão de GDs nos sistemas de transmissão (ST) é avaliado nas referências [3]-[7]. Por outro lado, a conexão de GD nos sistemas de distribuição (SD) é amplamente abordada na literatura. Em [8] destaca-se a existência de um limite para a conexão de GD nos SD. Diante deste cenário, os autores apresentam estratégias de controle cujo objetivo é maximizar a penetração de GD no sistema. Em [9] utiliza-se programação linear para maximizar a penetração de geração eólica no SD. A intermitência das GDs conectadas ao SD é apresentada de maneira cronológica em [10], considerando a utilização de simulação dinâmica. A alocação de perdas em SD com GD é abordada em [11].

Conforme destacado, a maioria dos trabalhos considera a conexão de GD ou nos SD ou nos ST, ou seja, o planejamento e operação considera a operação de ambos de forma desacoplada. Entretanto, com o aumento da penetração de GD e consequentemente formação de redes de distribuição ativas (RDA), este cenário pode levar a conclusões precipitadas. Todavia, a representação completa dos sistemas de transmissão e distribuição demanda um grande esforço computacional. Em [12] é proposta uma metodologia unificada de solução trifásica dos SD e solução monofásica do ST que permite investigar o impacto da alta penetração de geração distribuída em todo o sistema (ST e SD). A interação entre os sistemas é obtida de maneira estática, usando processamento paralelo. Do ponto de vista dinâmico, esta interação é abordada em [13], através de uma formulação que

representa em detalhes os SD que participam efetivamente da resposta dinâmica, enquanto os demais SD são representados através de modelos simplificados. Como continuidade, uma proposta de controle preditivo para avaliar esta interação dinâmica e a presença RDA é estudada em [14].

Considerando o interesse recente pela interação existente entre os ST e SD, este artigo tem por objetivo apresentar uma metodologia que permita avaliar o impacto em ambos os sistemas, considerando a conexão de GD nos SD, bem como contribuir na ideia de que, num futuro próximo, o planejamento e a operação dos ST e SD deverá ser feita de maneira global. O desacoplamento de ambos os sistemas, quando da presença em grande escala de GD, só será possível caso indicadores do comportamento do SD visto pelo ST (e vice-versa) sejam propostos e representem de maneira adequada eventuais mudanças em ambos os sistemas. Se esta premissa for desconsiderada, GDs conectadas ao SD poderão ser subaproveitadas ou até deteriorar a operação do ST. Este objetivo é alcançado através da proposta de processo de otimização via sistemas imunológicos artificiais (SIA) aplicado em um estudo de caso. A aplicação de SIA neste artigo visa determinar as configurações dos diversos elementos controláveis existentes nos sistemas investigados, tais como posições de tapes de dispositivos reguladores de tensão, *setpoint* de tensões em barras do tipo tensão controlada (PV) e potência ativa das unidades de geração despacháveis. Pode-se observar que este é um problema de natureza combinatória, sendo, portanto, possível aplicar de técnicas de computação evolutiva.

Além desta seção introdutória, este artigo é organizado da seguinte forma: a seção II apresenta a descrição do problema abordado, destacando a necessidade de um controlador capaz de monitorar e coordenar a interação entre os ST e SD quando da presença de GD. Na seção III é apresentada a formulação da metodologia de otimização utilizada. Os resultados obtidos quando da aplicação da metodologia proposta é apresentada através de um estudo de caso na seção IV. Na seção V são apresentadas as conclusões.

## II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Com o advento da GD, as redes de distribuição estão passando por uma fase de transição. O fluxo de potência, anteriormente unidirecional, não necessariamente fluirá do ST para o SD. Em um futuro próximo, existe a possibilidade de este fluxo ser bidirecional, graças ao surgimento das RDAs. De acordo com [1], RDAs são definidas como redes nas quais o transporte de energia é bidirecional, tal que, em alguns momentos do dia, as fontes de geração a elas ligadas podem gerar uma quantidade de potência superior à necessária para suprir sua carga, resultando na inversão do fluxo de potência. Neste caso, a energia passa a ser exportada para o ST (do SD para o ST). Como consequência, as redes de distribuição sem GD e cujo fluxo continua a ser unidirecional, passaram a ser denominadas como redes de distribuição passivas (RDP). A Fig. 1 mostra este novo cenário.

De acordo com a Fig. 1, a inserção de GD nos SD pode influenciar no modo de operação tanto dos SD quanto no ST. Do ponto de vista dos SD, pode-se alcançar a redução de perdas e melhora no perfil de tensão. Esta melhora está

condicionada a dois aspectos principais: a localização das fontes de geração e o montante gerado por cada fonte. Na fase de planejamento do sistema, é importante dispor de uma metodologia para alocação ótima de fontes de GD, principalmente no que diz respeito às fontes despacháveis. Na operação do sistema, dada à flexibilidade obtida através da conexão destas fontes via conversores eletrônicos de potência, é necessário realizar o controle coordenado entre as fontes de potência reativa. Fontes de geração, reguladores de tensão, capacitores, o LTC das subestações que conectam o ST e os SD devem ser controlados de modo que a carga seja atendida, respeitando os limites de tensão e qualidade estabelecidos e o montante excedente de potência seja exportado para o ST.

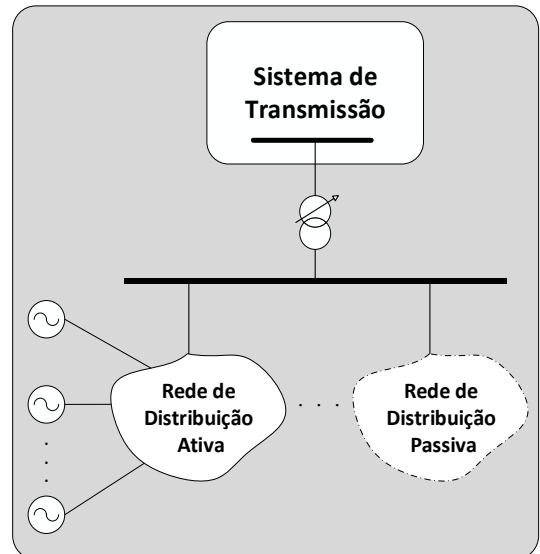


Figura 1. Nova Arquitetura dos Sistemas Elétricos

Além das questões técnicas, restrições econômicas devem ser consideradas. Fontes não despacháveis tais como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, em condições normais, devem gerar a maior quantidade de potência ativa possível, (respeitando as respectivas curvas de vento e de radiação solar incidente). Dispositivos de armazenamento podem ser usados como suporte para complementar o montante gerado pelas fontes despacháveis. Contudo, em algumas situações de emergência, é necessário utilizar a capacidade que os GD possuem de gerar potência reativa, como por exemplo, após uma contingência ou em situações nas quais o montante de geração é superior a carga. Em relação a potência reativa, o SD pode ser visto pelo ST como uma compensação reativa local. Apesar da intermitência, essa compensação pode resultar na melhoria do perfil de tensão do ST, maximização da margem de carga, redução de perdas e dos custos relacionados à aquisição de equipamentos para compensação de potência reativa.

Diante deste contexto, é necessária uma arquitetura de gerenciamento central que ajudaria a operar o SD de maneira ótima bem como auxiliar na operação do ST. Neste trabalho, isto é feito através de um controlador que tem como entrada as informações de potência ativa, reativa e tensão das fontes de GD, tensão terminal de barras controladas por reguladores de tensão e capacitores, e do LTC da subestação.

### III. METODOLOGIA PROPOSTA

#### A. O Controlador

Os dados das fontes de GD, dados de carga, parâmetros da rede e estado dos equipamentos, são considerados como entradas do controlador, o qual determinará os novos *setpoints* das fontes de geração distribuída (potência ativa e reativa gerada das fontes que operam no controle PQ, tensão e potência ativa gerada nas fontes que possuem controle de tensão terminal, ou seja, que operam no modo PV), bem como as referências de tensão das barras controladas por LTC, reguladores e capacitores. Ao final ter-se-á uma condição operativa em que o SD opere dentro dos limites estabelecidos, com melhoria no perfil de tensão, aumento da margem de carga e suporte ao ST. A Fig. 2 apresenta o controlador proposto.

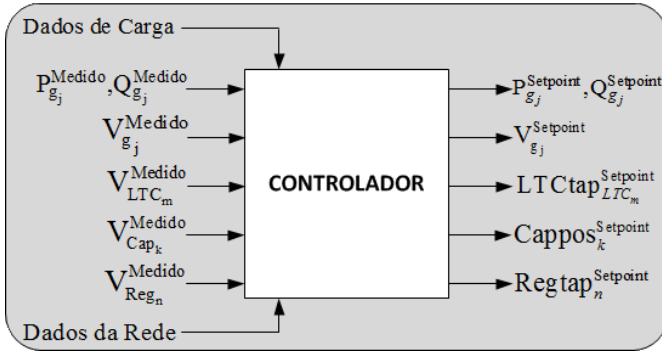


Figura 2. Controlador Proposto

Assume-se que exista um sistema de comunicação capaz de receber as medições e, em seguida, enviar o *setpoint* para os elementos do sistema. Em intervalos de tempo definidos, novos dados estarão disponíveis. A partir destes dados, o controlador executará a metodologia de otimização, conforme proposto na seção III, retornando como saída os novos valores de referência dos equipamentos e fontes de geração.

#### B. Otimização via Sistemas Imunológicos Artificiais

A metodologia empregada neste artigo aplica a técnica evolutiva conhecida como Sistema Imunológico Artificial (SIA). Algoritmos dessa categoria são empregados com sucesso em problemas onde se deseja determinar uma solução ótima dentro de um espaço amostral muito grande. O SIA, em particular, foi aplicado durante o desenvolvimento desse trabalho por ser uma técnica robusta, de aplicação simples, e cujo processo de busca não produz uma população convergente em torno de um ponto do espaço amostral. Exemplos na literatura demonstram a viabilidade em diversas aplicações semelhantes [15]-[16]. Até o presente momento, não foram encontradas na literatura aplicações semelhantes à apresentada neste artigo usando outras técnicas evolutivas. Exemplos de aplicação do SIA na solução de outros problemas são mostrados em [17].

Conforme descrito anteriormente, a função objetivo proposta neste artigo é a maximização da margem de carga do sistema, conforme descrito em (1) e sujeito às restrições descritas logo abaixo.

$$\text{Max} \left[ \sum_{(i,j) \in \beta} P_{Li} \right] \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} P_{Gj}^{\min} &\leq P_{Gj} \leq P_{Gj}^{\max} \\ Q_{Gj}^{\min} &\leq Q_{Gj} \leq Q_{Gj}^{\max} \\ V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max} \\ LTCtap_m^{\max} &\leq LTCtap_m \leq LTCtap_m^{\max} \\ Regtap_n^{\max} &\leq Regtap_n \leq Regtap_n^{\max} \\ Cappos_k^{\max} &\leq Regtap_k \leq Regtap_k^{\max} \end{aligned}$$

onde:

$P_{Gj}^{\max}, P_{Gj}^{\min}$ : Geração ativa máxima e mínima do gerador  $j$ ;

$Q_{Gj}^{\max}, Q_{Gj}^{\min}$ : Geração reativa máxima e mínima do gerador  $j$ ;

$V_i^{\max}, V_i^{\min}$ : Tensão máxima e mínima na barra  $i$ ;

$LTCtap_m^{\max}, LTCtap_m^{\min}$ : Variação máxima e mínima do tape do LTC;

$Regtap_n^{\max}, Regtap_n^{\min}$ : Variação máxima e mínima do tape do regulador de tensão;

$Cappos_k^{\max}, Regtap_k^{\max}$ : Variação máxima e mínima de chaveamento do capacitor;

$P_{Li}$ : Carga na barra  $i$ ;

$\beta$ : Conjunto de barras que devem ter sua carga maximizada.

$i, j, m, n, k$ : Número de total de barras, de GD, de LTCs, de reguladores e de capacitores, respectivamente.

Para atingir o objetivo proposto de maximizar (1) algumas variáveis do problema foram definidas e descritas anteriormente. São essas variáveis que devem ser determinadas durante o processo evolutivo visando à maximização da função objetivo, sendo, portanto, partes do anticorpo. São elas: potências ativas geradas e tensões terminais dos GDs; tape do LTC e dos reguladores; chaveamento de bancos de capacitores. O processo evolutivo executado é descrito a seguir na Fig. 3:

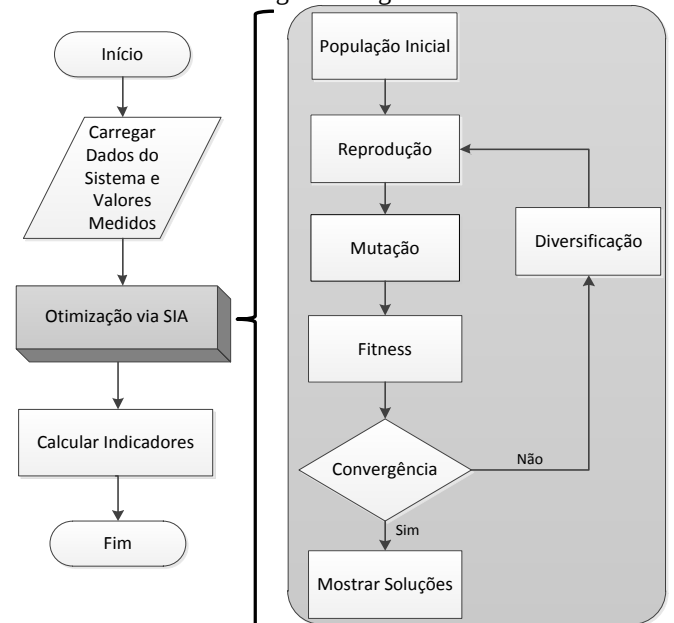


Figura 3. Fluxograma do Processo de Otimização

Para iniciar a descrição do processo evolutivo é necessário primeiro demonstrar o formato dos anticorpos, que são as soluções propostas pelo SIA para o problema. Nesse caso, o anticorpo proposto tem dimensão determinada pelos tapes dos  $m$  LTCs existentes no sistema, seguido por  $j$  posições determinando o *setpoint* da tensão nas  $j$  barras com GD, as  $j$  potências ativas geradas nas unidades despacháveis  $n$  tapes de regulares e  $k$  posições de capacitores. A Fig. 4 expressa essa ideia de forma mais clara, considerando apenas a presença apenas de  $m$  LTCs e  $j$  geradores distribuídos.

|                    |     |                    |                |     |                |                 |     |                 |
|--------------------|-----|--------------------|----------------|-----|----------------|-----------------|-----|-----------------|
| LTCap <sub>1</sub> | ... | LTCap <sub>m</sub> | V <sub>1</sub> | ... | V <sub>j</sub> | Pg <sub>1</sub> | ... | Pg <sub>j</sub> |
|--------------------|-----|--------------------|----------------|-----|----------------|-----------------|-----|-----------------|

Figura 4. Anticorpo Proposto para o Problema

O processo evolutivo se inicia determinando a população inicial do problema. É essa população inicial composta por anticorpos que vão fazer parte no processo evolutivo na busca por melhores soluções. Conforme descrito anteriormente, cada anticorpo possui dimensão  $n + m + k + 2 * j$ . O número de indivíduos na população inicial é arbitrário.

O passo seguinte é o de reprodução. Nesse passo, cada um dos anticorpos da população dá origem a uma quantidade  $x$  de clones. Cada grupo de  $x$  clones são cópias iguais ao indivíduo original. Neste trabalho foram considerados 10 clones.

Após a reprodução, deve ser executada a mutação dos indivíduos da população. Durante essa etapa cada um dos indivíduos clonados na etapa anterior sofre uma mutação aleatória em suas características originais. Durante esse estudo a mutação é aplicada a 20% das características do indivíduo. Caso esse número resulte em um algoritmo não inteiro, ele é aproximado para o maior inteiro.

O próximo passo consiste na etapa de seleção, ou fitness. É nessa etapa que toda a população de clones que sofreram mutação na etapa anterior é avaliada de acordo com o resultado da função objetivo proposta. Os clones são classificados de acordo com esse resultado, sendo possível determinar e escolher os indivíduos mais aptos para continuar no processo evolutivo e extinguir os indivíduos menos aptos.

Após o processo de seleção é necessário testar os critérios de convergência do algoritmo. Nesse caso foram usados como critérios de parada uma quantidade máxima de gerações de indivíduos. Caso um desses critérios seja atingido, o processo de busca é interrompido. Caso contrário, ele continua para a próxima etapa.

Esta nova etapa se chama diversificação. Nela os anticorpos menos aptos são substituídos por novos indivíduos na continuação da busca. Esse mecanismo é responsável por inserir maior diversificação na população e busca incluir novos pontos de busca dentro do espaço amostral. Além disso, também evita a explosão populacional, que computacionalmente é traduzida pelo aumento exponencial da memória usada para armazenar as soluções. Assim, os anticorpos menos aptos são extintos. O algoritmo volta para a etapa de reprodução, incrementa a contagem de gerações, e continua sendo executado até que um dos critérios de convergência seja atingido.

#### IV. RESULTADOS

Nesta seção, o controlador proposto é avaliado através da realização de um estudo de caso. Para isso, foi utilizado o sistema de transmissão IEEE 9 Barras [18]. Três geradores síncronos são conectados as Barras 1, 2 e 3. As cargas estão localizadas nas Barras 5, 6 e 8. As demais barras são consideradas barras de passagem.

Como o objetivo é avaliar o comportamento das redes de distribuição ativas, a carga conectada a Barra 6 foi substituída por um sistema de distribuição composto por 75 barras [14]. Ademais, para simular a presença de GD e a possibilidade de fluxo bidirecional, foram conectados 8 geradores de 6,9MVA as barras 1102, 1105, 1108, 1112, 1121, 1132, 1145 e 1166. Estes geradores representam geradores síncronos que são conectados ao sistema através de conversores de potência. Estes geradores também poderiam ser eólicos do tipo DFIG sendo, neste caso, necessário respeitar as curvas de vento. Dado o acoplamento via conversores eletrônicos de potência, estes também podem gerar montante especificados de potência ativa e reativa. As demais barras de carga são representadas por uma injeção líquida de potência ativa e reativa, tendo em vista que estas são redes de destruição passivas. A conexão entre o ST e este SD e é realizado através de um LTC que representa a subestação. O diagrama dos sistemas estudados é apresentado no apêndice.

Para facilitar a comparação do caso base, LTCs, reguladores, capacitores e tensões terminais são ajustados para o valor nominal (1pu). Todavia, este SD não apresenta reguladores e capacitores. Além disso, considera-se que cada um dos geradores está gerando 6MW de potência ativa. Neste cenário, o fluxo de potência ativa do ST (barra 6) para o SD (barra 1100) é de -28.17MW+22.56MVAR, ou seja, o fluxo de potência ativa flui do SD para o ST enquanto o de potência reativa é oposto (do ST para o SD). A potência base do sistema é de 100MVA.

O processo de otimização proposto na seção III foi desenvolvido em MATLAB e aplicado ao caso base. Durante os estudos realizados foram considerados os seguintes parâmetros para o algoritmo SIA: população inicial de 10 anticorpos, criação de 10 clones por indivíduo na fase de mutação, e máximo de 5 gerações. As 8 tensões e as 8 potências ativas geradas referentes aos GD ligados ao SD bem como o tape do LTC da subestação compreendem o conjunto de 17 variáveis de controle, sendo estes determinados via otimização. Para cada um dos anticorpos obtidos como solução, calcula-se a margem de carga, utilizando o método da continuação[19]. A viabilidade das soluções otimizadas é então avaliada considerando as restrições estabelecidas. Caso não ocorram violações, a solução é considerada viável. Em seguida, os anticorpos com soluções viáveis são ordenados de acordo com a margem de carga obtida. Perdas e o fluxo de potência ativa também são calculados. Assim, é gerada uma lista com as possíveis soluções, sendo estas ordenadas em ordem decrescente (maiores margens de carga estão no topo da lista). A Tabela I apresenta uma análise comparativa em relação às cinco respostas melhores ranqueadas.

Em comparação com o caso base, note que o processo de otimização resultou no aumento da margem de carga do

sistema (conforme coluna 2), A solução melhor ranqueada resultou no aumento de aproximadamente 7,33% na margem. As perdas ativas dos casos otimizados sempre foram menores que as obtidas no caso base. Outro fator importante diz respeito ao valor e sentido do fluxo de potência do ST para o SD. Em todos os casos o fluxo de potência ativa flui do SD para o ST. Entretanto, melhores margens de carga são obtidas quando o fluxo de potência ativa do SD para o ST é reduzido (em comparação com o caso base).

TABELA I. COMPARAÇÃO DE INDICADORES ENTRE O CASO BASE E A METODOLOGIA PROPOSTA

| Rank      | MC (pu) | Perdas (pu) | Fluxo ST para SD (pu) |
|-----------|---------|-------------|-----------------------|
| Caso base | 0,7092  | 0,0618      | -0,2817 + j0,2256     |
| 1         | 0,7612  | 0,0594      | -0,2104 - j0,1252     |
| 2         | 0,7610  | 0,0597      | -0,2086 - j0,1251     |
| 3         | 0,7604  | 0,0586      | -0,1984 + j0,1969     |
| 4         | 0,7603  | 0,0599      | -0,2054 - j0,1249     |
| 5         | 0,7602  | 0,0594      | -0,2182 + j0,1978     |

A título de comparação, considere as colunas 2 e 4 da Tabela II, que mostra a potência ativa gerada nas fontes de GD conectadas ao SD e a barra swing do ST. São confrontadas as respostas obtidas no caso base com a solução melhor ranqueada, ou seja, com maior margem de carga, denominada a partir de agora como Rank 1. Dado que a potência ativa gerada em barras PVs é fixa (considerando que os limites são respeitados), os valores gerados pelas barras PVs ligadas ao ST foram omitidas da Tabela II sendo, portanto, desconsiderados do somatório final representado pela última linha da Tabela II. As tensões terminais nas barras com GD são apresentadas nas colunas 3 e 5 da Tabela II. Note que, apesar de especificadas como 1 pu no caso base, estas têm seu valor alterado, já que atingem os limites de geração de potência reativa.

TABELA II. COMPARAÇÃO ENTRE AS POTÊNCIAS GERADAS E TENSÕES DO CASE BASE E NO RANK 1 (CASO COM MAIOR MARGEM DE CARGA)

| Barra | Caso Base                  |                      | Rank 1                              |                      |
|-------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
|       | Potência Ativa Gerada (pu) | Tensão Terminal (pu) | Potência Ativa Gerada (pu) – Rank 1 | Tensão Terminal (pu) |
| 1102  | 0,06                       | 1,0068               | 0,0475                              | 1,0250               |
| 1105  | 0,06                       | 1,0068               | 0,0465                              | 1,0250               |
| 1108  | 0,06                       | 1,0297               | 0,0505                              | 1,0250               |
| 1112  | 0,06                       | 1,0333               | 0,0600                              | 1,0250               |
| 1121  | 0,06                       | 1,0190               | 0,0450                              | 1,0250               |
| 1132  | 0,06                       | 1,0000               | 0,0560                              | 1,0313               |
| 1145  | 0,06                       | 1,0000               | 0,0460                              | 0,9995               |
| 1166  | 0,06                       | 1,0000               | 0,0590                              | 1,0056               |
| Swing | 0,1846                     | 1,0400               | 0,2547                              | 1,0400               |
| Total | 0,6646                     | -                    | 0,6652                              | -                    |

De acordo com a Tabela II, pode-se concluir ainda que nem sempre despachar a maior quantidade de potência ativa

nos geradores ligados ao SD resultará em uma melhora nas condições operativas do ST. A solução otimizada resultou em praticamente o mesmo montante de potência ativa gerada. Contudo, ocorreu o redespacho de potência ativa e reativa, o que explica a melhora na margem de carga e nas perdas do sistema. No caso de fontes despacháveis, esta condição representa a economia no custo relacionado à compra da fonte primária (óleo e gás, por exemplo).

No que diz respeito ao fluxo de potência reativa, melhores soluções são obtidas quando SD fornece potência reativa para o ST, conforme observadas nas soluções ranqueadas como 1 e 2 (linhas 3 e 4 e colunas 2 e 4 da Tabela II). De certa forma, este resultado indica que a rede de distribuição ativa pode “emular”, em certas condições, uma compensação de potência reativa. A Fig. 5 e a Fig. 6 apresentam uma comparação dos níveis de tensão entre o caso base e a solução Rank 1 no ST e nos SD. Note que o caso otimizado melhora as tensões do ST. Em relação ao SD, os níveis oscilam: alguns são maiores no caso base e outros são menores. Contudo, todas as tensões permanecem na faixa (entre 0,95 e 1,05 pu). Na solução Rank 1, o LTC da subestação foi alterado de 1 pu (caso base) para 1,0625 (Rank 1).

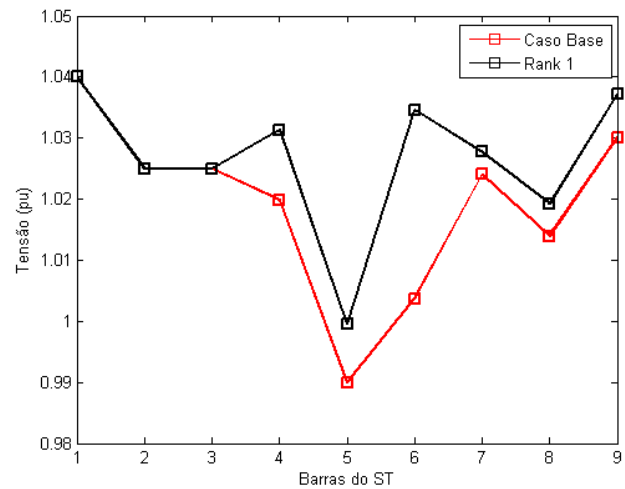


Figura 5. Comparação entre as tensões no ST

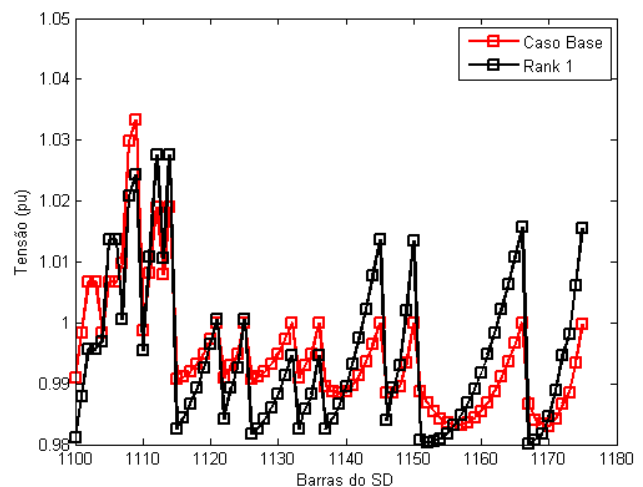


Figura 6. Comparação entre as tensões no SD

## V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia de controle de fontes de GD ligados ao sistema de distribuição tendo como foco a melhora nas condições operativas do sistema de transmissão. Para atingir este objetivo, foi explorada uma das características presentes nas redes de distribuição ativas: o fluxo de potência pode ser bidirecional.

O foco do trabalho era propor um controlador que fosse capaz de executar uma metodologia de otimização via sistemas imunológicos artificiais tal que maximizasse a margem de carga e reduzisse as perdas dos sistemas, através do controle das potências ativas geradas e tensões nas fontes de GD, LTCs das subestações, reguladores de tensão e capacitores. Os resultados obtidos validam a metodologia apresentada e indicam que a mesma é eficaz na melhora da estabilidade de tensão do sistema de transmissão.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, IET Renewable Energy Series 6, 2009.
- [2] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp 195-204, Apr. 2001.
- [3] Y.C. Chen, A.D. Dominguez-Garcia, "A Method to Study the Effect of Renewable Resource Variability on Power System Dynamics," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 1978-1989, May 2012.
- [4] J.G. Sootweg, W.L. Kling, "Impacts of distributed generation on power system transient stability," in *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 862-867.
- [5] A. M. Azmy, I. Erlich, "Impact of distributed generation on the stability of electrical power system", in *Proc. 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1056-1063.
- [6] M. K. Donnelly, J.E. Dagle, D. J. Trudnowski, G. J. Rogers, "Impacts of the distributed utility on transmission system stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, pp.741-746, May 1996.
- [7] M. Reza, P. H. Schavemaker, J. G. Sootweg, J.G., W. L. Kling, "Impacts of Distributed Generation Penetration Levels on Power Systems Transient Stability," in *Proc. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 2150-2155.
- [8] G. Strbac, "Impact of dispersed generation on distribution systems: a European perspective" in *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp.118-120.
- [9] S. N. Liew, G. Strbac, "Maximising penetration of wind generation in existing distribution networks," in 2002 IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, pp. 256-262.
- [10] D. M. Falcão, G. N. Taranto C.C.O. Hincapié, "Chronological Simulation of the Interaction between Intermittent Generation and Distribution Network," in *Proc. 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, pp. 1-8.
- [11] L.F. Ochoa · M. Escobar · A. Padilha-Feltrin, "Alocação de perdas em sistemas de distribuição com geração distribuída", in *Proc.2006 XVI Congresso Brasileiro de Automática CBA*.
- [12] A. B. de Almeida, "Um Modelo Unificado para Análise de Geração Distribuída nos Sistemas de Transmissão e Distribuição," Tese de Doutorado, Dept. Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- [13] P. Aristidou, T. Van Cutsem, "A parallel processing approach to dynamic simulations of combined transmission and distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 72, pp. 58-65, Nov. 2015.
- [14] P. Aristidou, G. Valverde, T. Van Cutsem, "Contribution of Distribution Network Control to Voltage Stability: A Case Study," *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 1, Sept. 2015.
- [15] D. Marujo, D. Q. Oliveira, B. I. L. Lopes, A. C. Zambroni de Souza, "Bloqueio da Tensão de Campo em Máquinas Síncronas usando Sistemas Imunológicos Artificiais" In *Proc. 2013 X Latin-American Congress on Electric Power Generation*, pp. 1-6.
- [16] D. Q. Oliveira, D. Marujo, M. V. Santos, B. D. Bonatto, H. Arango, A. C. Zambroni de Souza, L. F. N. Delboni, J. M. Carvalho Filho, P. M. Silveira, L. A. Felber, M. F. Braga Jr, "Multiobjective Voltage Control in Smart Distribution Power Systems". In *Proc. 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Latin America*, pp. 1-6.
- [17] D. Dasgupta, S. Yu, F. Nino, "Recent Advances in Artificial Immune Systems: Models and Applications," *Applied Soft Computing*, vol. 11, pp. 1574-1587, Mar. 2011
- [18] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, John Wiley & Sons, 2003.
- [19] D. Marujo, A. C. Zambroni de Souza, B. I. Lima Lopes, M. V. Santos, K. L. Lo, "On Control Actions Effects by Using QV Curves," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp.1298-1305, May. 2015.

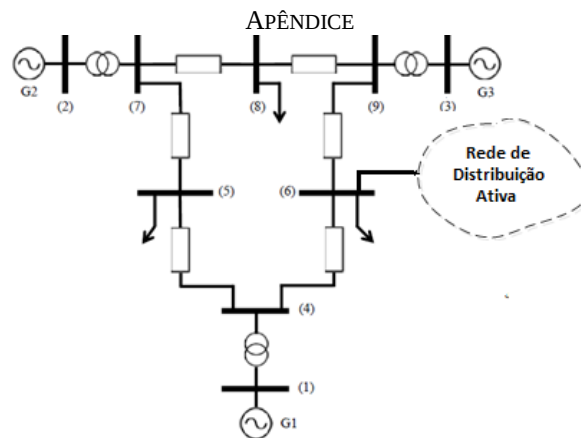


Figura 7. Sistema de Transmissão

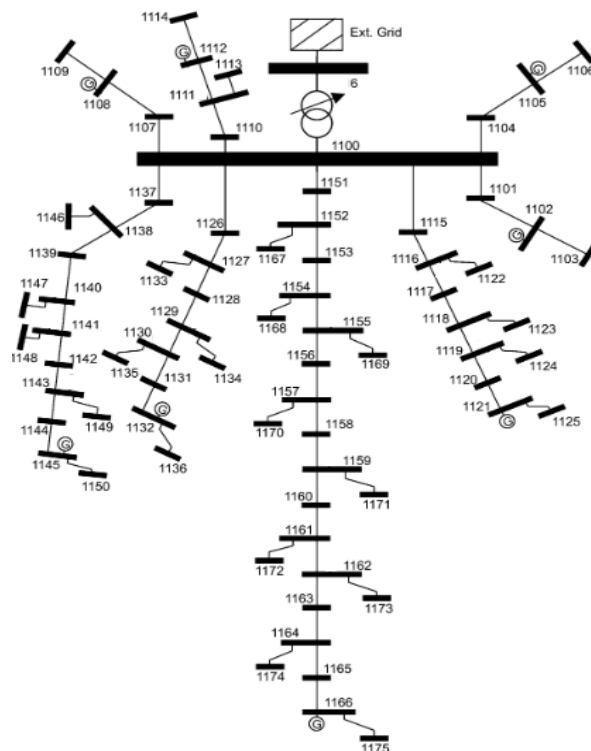


Figura 8. Rede de Distribuição Ativa  
Adaptado de [14]