# Utilização de algoritmo genético para otimizar curvas QV em estudos de estabilidade de tensão

R. S. Moura\*. G.F. Alvarenga\*\*. A.C. Zambroni de Souza\*\*\*

\*Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga, 35570-660 Brasil (Tel: 37-3322-8432; e-mail: renan.moura@ ifmg.edu.br). \*\*Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 37500-903 Brasil (e-mail: galvarenga111@yahoo.com.br) \*\*\* Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 37500-903, Brasil, (e-mail: zambroni@unifei.edu.br)}

Abstract: This paper presents a methodology based on genetic algorithm that allows to change the type of reactive power margin of QV curve in the voltage stability studies. A positive margin of this curve is directive related to voltage instability phenomenon, so the use of the proposed approach mitigates this problem. The results are compared with other published work that suggest the change of the type of margin through fuzzy logic. Three test systems and a Brazilian real system are utilized in the simulations with all operational limits considered. The technique using a genetic algorithm proved to be efficient to change a positive margin of QV curve into a negative margin.

Resumo: Este artigo apresenta uma metodologia baseada em algoritmo genético que permite a mudança do tipo de margem de potência reativa da curva QV em estudos de estabilidade de tensão. Uma margem positiva desta curva é diretamente relacionada com o fenômeno de instabilidade de tensão, então o uso da abordagem proposta mitiga este problema. Os resultados são comparados com outro trabalho publicado que sugere a mudança do tipo de margem através da lógica *fuzzy*. Três sistemas testes e um sistema real brasileiro são utilizados nas simulações com todos os limites operacionais considerados. A técnica usando algoritmo genético mostrou ser eficiente para alterar uma margem positiva da curva QV em margem negativa.

Keywords: genetic algorithm; QV curve; voltage stability.

Palavras-chaves: algoritmo genético; Curva QV; estabilidade de tensão.

## 1. INTRODUÇÃO

Estabilidade de tensão é a área que estuda o comportamento de um sistema elétrico de potência quando submetido a um distúrbio que altera o ponto de equilíbrio (Kundur et al. 2004). Dependendo da intensidade do distúrbio, o sistema apresenta condições operacionais inaceitáveis como a instabilidade/colapso de tensão.

Dentro deste contexto, é usual utilizar a curva QV para obter a margem de potência reativa de um barramento inserido no sistema elétrico. Quanto maior a margem de potência reativa indicada pela curva QV, maiores são as chances de um sistema se manter estável após a ocorrência de um distúrbio.

Em (Mousavi et al. 2012) é proposto o uso da decomposição de Benders para melhorar a margem da curva QV e ampliar a distância entre o ponto operativo e ponto de colapso de tensão. De maneira similar, os autores de (Bujal et al. 2014) detectaram quais fatores de potência resultam em maiores margens de potência reativa da curva QV.

Em (Jabri et al. 2015) estudos de expansão de sistemas elétricos de potência em Musandam, uma pequena ilha de Omã, foram realizados utilizando a análise modal de curvas

QV e PV (curva de máximo carregamento). Em (López et al. 2015) um método para avaliação de estabilidade de tensão da planta de potência de Itaipu usando estimadores de estado detecta que perdas em linhas de transmissão diminuem as margens fornecidas pelas curvas PV e QV.

A influência de fontes renováveis na margem de potência reativa da curva QV também sido objeto de estudo de vários pesquisadores. Em (Rawat et al. 2016) é mostrado que a diminuição da injeção de potência reativa eólica resulta em diminuição desta margem. O trabalho de (Amarasekara et al. 2016) estabelece que a margem de estabilidade de tensão de todo o sistema melhora quando geradores eólicos são inseridos em barramentos com pouco suporte de potência reativa indicado pela curva QV. A intermitência das fontes renováveis nos valores da margem da curva QV é analisada em (Monteiro et al. 2017), enquanto que as margens de potência reativa da curva QV são utilizadas em (Martíneza et al. 2017) para definir os melhores locais para inserir geração distribuída.

A curva QV pode apresentar margens positivas e negativas. Em (Moura et al. 2016) é demonstrado que uma margem positiva da curva QV está relacionada com instabilidade dinâmica e é proposto alterar o tipo de margem, de positiva para negativa, utilizando a lógica fuzzy.

Entretanto, o uso de lógica fuzzy requer o conhecimento prévio dos sistemas analisados. Com o objetivo de atenuar esta desvantagem indicada em (Moura et al. 2016), este artigo propõe utilizar algoritmo genético como ferramenta evolutiva para realizar a mudança do tipo de margem da curva QV, sendo então a maior contribuição do artigo. Tal metodologia será avaliada em vários sistemas testes com todos os limites operacionais considerados.

O uso de algoritmos meta-heurísticos como o algoritmo genético tem sido usado amplamente em estudos de planejamento e operação de sistemas elétricos inteligentes (Verma et al. 2018). Um algoritmo genético adaptativo é proposto em (Zhang et al. 2018) para resolver problemas de energias solares e eólicas intermitentes. Problemas de reconfiguração de redes de distribuição e alocação ótima de geração distribuída baseados em algoritmo genético são discutidos em (Guo et al. 2018) e (Narayanan et al. 2018), respectivamente.

Este trabalho é dividido em Seções. Após uma breve introdução do problema abordado neste artigo na Seção 1, a Seção 2 é responsável por indicar os conceitos básicos para que o leitor possa entender a metodologia proposta na Seção 3. Resultados obtidos através do emprego da metodologia e conclusões estão presentes nas Seções 4 e 5, respectivamente. Por fim, agradecimentos e as referências bibliográficas utilizadas são apresentados.

#### 2. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1 Curva QV e seus problemas associados com o tipo de margem

A curva QV relaciona o nível de tensão de um barramento em relação a potência reativa injetada. É formada através de sucessivos cálculos de fluxo de potência, podendo ser obtida para barramentos de geração e de carga (Guimarães et al. 2011).

A margem de potência reativa da curva QV indica o quanto de potência reativa um determinado barramento pode transferir para o sistema e é a distância entre o ponto mínimo da curva e o eixo da variável de tensão. A margem é definida como positiva quando o ponto de mínimo da curva é positivo. Caso contrário, a margem será considerada do tipo negativa, conforme pode ser visualizado na Figura 1. A Figura 1 também indica duas regiões de operação: uma estável e outra instável. Na região estável qualquer aumento de potência reativa resulta em um aumento de tensão, o que é algo esperado quando, por exemplo, um capacitor é instalado na rede elétrica.

Regiões instáveis da curva QV devem ser evitadas. Com este propósito, ações de controle devem ser desenvolvidas para mudar o ponto operativo de um barramento baseado na informação obtida através da curva QV. Em (Marujo et al. 2015) é mostrado uma forma de modificar um ponto operativo da curva localizado na região instável para uma região estável. Os autores de (Moura et al. 2016) propuseram uma maneira de mudar o tipo de margem da curva QV usando lógica fuzzy e justificaram a necessidade desta mudança ao demonstrarem que a instabilidade dinâmica de tensão está associada com a margem positiva.

Embora os resultados apresentados em (Moura et al. 2016) sejam satisfatórios, o uso da lógica fuzzy requer um conhecimento prévio do sistema, podendo não ser aplicada em todas configurações de rede. Assim, este artigo propõe a resolução deste tipo de problema usando algoritmo genético. O algoritmo genético permite resolver problemas de otimização sem a necessidade de um conhecimento prévio do sistema desde que a função objetivo esteja bem formulada.



Fig. 1 Margens da curva QV e regiões de estabilidade

#### 2.2 Formulação matemática da técnica de algoritmo genético aplicada em sistemas elétricos de potência

Como a intenção é transformar uma margem positiva da curva QV em uma margem do tipo negativa, a mudança será obtida através da inserção de pontos de geração nos sistemas analisados.

Os valores de potências a serem inseridos serão obtidos através da técnica de busca do algoritmo genético. Cada indivíduo é formado por potências ativas e reativas geradas de barramentos pertencentes a área crítica do sistema, ou seja, cada valor de potência é um gene do indivíduo. Para determinar a área crítica, a técnica do Vetor Tangente (Martíneza et al. 2017) foi utilizada. O Vetor Tangente é capaz de determinar o barramento crítico, que é aquele que apresenta a maior variação de tensão após a ocorrência de um distúrbio. A área crítica é formada pelo barramento crítico e pela primeira e segunda vizinhanças como indicado pela Tabela 1.

Tabela 1: Áreas críticas dos sistemas analisados

Sistemas	Barramentos da área crítica
5 barramentos	3,4,5
9 barramentos	1,2,4,5,6,7,8
IEEE 14 barramentos	4,6,7,9,10,12,13,14

Sistema sul sudeste	6,8,63,64
brasileiro	

A função objetivo é definida como a soma de todas as margens negativas das curvas QV dos geradores presentes em cada sistema elétrico analisado, como indicado por (1), após a inserção da geração nos barramentos pertencentes a área crítica:

$$Função objetivo = min \left( \sum_{\substack{n \in \mathbb{Z} \\ n \in ativa \\ negativa \\ decada \\ curvaQV}} Margensde \right)$$
(1)

O estágio de cruzamento ocorrerá com dois indivíduos selecionados pela técnica da Roleta Viciada e resultarão em dois novos indivíduos. Como o cruzamento requer que o número de indivíduos de uma população seja par, definiu-se que o número de indivíduos é igual ao número de barramentos e, em situações que o número de barramentos seja ímpar, será adicionado mais um indivíduo a população.

Depois do estágio de cruzamento, o operador de mutação é acionado, representando 1% de chance de modificar cada gene dos indivíduos.

Durante a evolução da população, o melhor indivíduo de cada geração é armazenado. O resultado do algoritmo genético é o indivíduo com a melhor função objetivo depois de 50 gerações.

#### 3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida por este artigo seguiu três passos:

- 1. Obtenção de margens positivas da curva QV para cada sistema analisado.
- 2. Obtenção do barramento crítico e suas respectivas áreas críticas para cada sistema analisado pela técnica do Vetor Tangente.
- 3. Para a condição de carregamento que resulta em margem positiva da curva QV, a técnica do algoritmo genético descrita na Seção 2.2 é utilizada.

Para desenvolver o passo 1 da metodologia, o fator de carga  $(\lambda)$  é usado para alterar a carga do sistema como indicado por (2), (3) e (4), onde  $P_{g1(i)}$ ,  $P_{c1(i)}$  e  $Q_{c1(i)}$  são a potência ativa gerada nominal, a carga ativa nominal e carga reativa nominal do barramento *i*, respectivamente.

$$P_{g(i)} = P_{g1(i)} \times \lambda \tag{2}$$

$$P_{c(i)} = P_{c1(i)} \times \lambda \tag{3}$$

$$Q_{l(i)} = Q_{c1(i)} \times \lambda \tag{4}$$

#### 4. RESULTADOS

Como pode ser observado nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, quanto maior o fator de carga, menor é o suporte de potência reativa dos sistemas testes, pois maior é o consumo realizado pelas cargas. A diminuição do suporte de potência reativa faz com que as margens de potência reativa das curvas QV se tornem positivas para fatores de carga próximos do ponto de colapso de tensão.

Tabela 2. Evolução das margens de potência reativa das
curvas QV com o aumento do carregamento para o
sistema com 5 barramentos

Fator de carga	Margem de potência reativa dos			
em p.u.	geradores em p.u.			
	#1	#2		
1,0	-0,72	-0,39		
1,1	-0,69	-0,32		
1,2	-0,67	-0,23		
1,3	-0,63	-0,14		
1,4	-0,59	-0,03		
1,5*	-0,54	+0,10		

Tabela 3. Evolução das margens de potência reativa das
curvas QV com o aumento do carregamento para o
sistema com 9 barramentos

Fator de carga	Margem de potência reativa dos						
em p.u.	geradores em p.u.						
	# 1	#1 #2 #3					
1,0	-0,38	-0,42	-0,71				
1,1	-0,14	-0,23	-0,55				
1,2	-0,04	-0,02	-0,36				
1,3	+0,26	+0,20	-0,14				
1,4*	+0,57	+0,44	+0,12				
1,5	+0,89	+0,70	+0,40				

Tabela 4. Evolução das margens de potência reativa das curvas QV com o aumento do carregamento para o sistema com 14 barramentos do IEEE

Fator	Margem de potência reativa dos geradores em						
de	p.u.						
carga	#1	#2	#3	#6	#8		
em p.u.							
1,0	-0,44	-4,73	-1,38	-0,92	-0,64		
1,1	-0,27	-4,41	-1,27	-0,84	-0,61		
1,2	-0,07	-3,99	-1,15	-0,75	-0,56		
1,3	+0,16	-3,47	-1,02	-0,66	-0,52		
1,4	+0,26	-2,88	-0,87	-0,56	-0,46		
1,5	+0,53	-2,28	-0,70	-0,44	-0,39		
1,6	+0,84	-1,76	-0,50	-0,31	-0,29		

1,7	+1,24	-0,95	-0,25	-0,16	-0,16
1,8*	+1,80	-0,11	+0,06	+0,02	+0,03

### Tabela 5. Evolução das margens de potência reativa das curvas QV com o aumento do carregamento para o sistema sul sudeste brasileiro

Fator de	Margem de potência reativa dos geradores						
carga em		em p.u.					
p.u.	#1	#1 #2 #3 #17 #					
1,0	-12,02	-6,47	-4,27	-8,87	-5,04		
1,1*	-9,33	-0,45	+1,51	-7,81	-4,90		
Fator de	Margen	n de potêr	ncia reativ	a dos ger	adores		
carga em			em p.u.				
p.u.	# 19	# 20	#26	#29	#30		
1,0	-7,76	-10,72	-13,23	-4,72	-6,45		
1,1*	-7,48	-9,69	-4,97	+4,21	-0,62		
Fator de	Margen	n de potêr	ncia reativ	a dos ger	adores		
carga em	em p.u.						
p.u.	# 31	# 43	#44	#45	# 46		
1,0	-8,77	-4,39	-5,20	-2,37	-8,61		
1,1*	+2,55	+2,97	+1,28	-0,77	-0,22		

O algoritmo genético é aplicado para os fatores de carga indicados por \* nas Tabelas 2, 3, 4 e 5. Os resultados da aplicação do algoritmo genético estão indicados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. É possível observar que os valores das margens negativas de curvas QV dos geradores foram obtidos com a inserção de potência gerada, ativa e reativa, em todas as barras pertencentes à área crítica.

## Tabela 6. Resultados da aplicação do algoritmo genético no sistema com 5 barramentos

Fator de	Margem de	Resultado da	
carga em p.u.	reativa dos	função objetivo	
	em	p.u.	
	# 1	#2	-0,65
1,5	-0,65	0,04	
Potência	Barrament	os pertencent	tes a área crítica
gerada	# 3	# 4	# 5
inserida			
Ativa	0,20	0,18	
Reativa	0,55	0,34	1,17

Tabela 7. Resultados da aplicação do algoritmo genético no sistema com 9 barramentos

Fator de carga em p.u.	Margem de gera	Resultado da função objetivo			
	#1	-1,72			
1,4	-0,88				
	Barramentos pertencentes a área crítica				

Potência gerada inserida	#1	#2	#4	# 5	#6	#7	# 8
Ativa	0,28	0,24	- 0,67	0,39	1,31	- 0,14	0,48
Reativa	0,47	- 0,90	0,62	0,04	- 0,76	- 0,14	- 0,78

## Tabela 8. Resultados da aplicação do algoritmo genético no sistema com 14 barramentos do IEEE

Resultado d	-15,85				
Fator de	1,8				
Margem de potência reativa dos geradores em p.u.					
# 1	#2	#3	#6	# 8	
-2.61	-6,56	-1,97	-2,86	-1,86	
Potência gerada	Barramentos pertencentes a área				
inserida	crítica				
	#4	#6	#7	# 9	
Ativa	-0,41	-0,44	2,00	0,29	
Reativa	1,42	-1,60	1,03	2,04	
Potência gerada					
inserida	# 10	# 12	# 13	# 14	
Ativa	-0,39	0,57	-0,35	0,12	
Reativa	0,92	0,27	0,64	0,43	

## Tabela 9. Resultados da aplicação do algoritmo genético no sistema sul sudeste brasileiro

Res	-81,26				
]	1,1				
Margem de potência reativa dos geradores em p.u.					
#1	#2	#3	# 17	#18	
-10,87	-4,45	-2,50	-7,93	-4,91	
# 19	#20	# 26	# 29	#30	
-7,51	-10,32	-10,76	-6,09	-3,84	
# 31	# 43	# 44	# 45	# 46	
-3,38	-0,36	-1,46	-1,61	-5,30	
Potência gerada inserida	Barrame	ntos pertence	entes a área	a crítica	
	Bus 6	Bus 8	Bus 63	Bus 64	
Ativa	0,43	0,65	2,05	0,80	
Reativa	-1,11	-0,21	-0,55	-0,29	

Em relação ao trabalho publicado em (Moura et al. 2016), é possível afirmar que o algoritmo genético também consegue

transformar uma margem de potência reativa da curva QV de positiva para negativa. Entretanto, as diferenças indicadas na Tabela 10 podem ser observadas entre a técnica do algoritmo genético e a da referência (Moura et al. 2016).

Itens avaliados	Lógica fuzzy	Algoritmo genético	
Sistemas analisados	5 barramentos e sul sudeste brasileiro	5 barramentos, 9 barramentos, 14 barramentos e sistema sul sudeste brasileiro.	
Foi possível obter a margem negativa da curva QV a partir de uma margem positiva?	Sim	Sim	
Como ocorreu a aplicação do vetor tangente?	Como variável de entrada na lógica fuzzy.	Como delimitador da área crítica que recebeu as potências geradas encontradas pelo algoritmo genético.	
Existe a necessidade de um teste preliminar para conhecer o comportamento do sistema analisado?	Sim.	Não. O algoritmo genético é capaz de procurar a solução do sistema independentemente das particularidades de cada sistema.	
Existe a necessidade de aplicar a metodologia mais de uma vez para conseguir a margem negativa na curva QV?	Sim.	Não. O algoritmo genético testa todas as possibilidade dentro do espaço de solução possível.	

Tabela 10. Comparação entre as duas metodologias para obter margens positivas da curva QV

## 5. CONCLUSÕES

A técnica usando algoritmo genético provou ser eficiente para transformar uma margem positiva da curva QV em margem negativa. Em adição, esta técnica não precisa de um conhecimento prévio do comportamento do sistema, podendo ser aplicada em qualquer sistema elétrico que apresente problemas de instabilidade dinâmica de tensão com margens positivas da curva QV.

Como trabalhos futuros, pretende-se implementar a técnica de mudança de margem de potência reativa da curva QV através do algoritmo genético em regiões não pertencentes à área crítica dos sistemas analisados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPq, CAPES, Fapemig e Inerge pelo suporte parcial a este artigo. O primeiro autor também agradece o setor de Pesquisa e Extensão do IFMG-Campus Formiga pelo apoio técnico.

#### REFERÊNCIAS

- Alizadeh-Mousavi, O., Bozorg, M., Ahmadi-Khatir, A., Cherkaoui, R.. (2012). Reactive power reserve management: preventive countermeasure for improving voltage stability margin", 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA.
- Al-Jabri, Y., Hosseinzadeh, N., Al-Abri, R., Al-Hinai, A. (2015). Voltage stability assessement of a microgrid. Case study: Khasab power system in Oman. 2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition. Muscat, Oman.
- Amarasekara, H.W.K.M., Agalgaonkar, A.P., Perera, S., Meegahapola, L. (2016). Placement of variable-speed wind power generators in power systems considering steady-state voltage stability. 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). Wollongong, NSW, Australia.
- Bujal, N.R., Hasan, A.E., Sulaiman, M. (2014). Analysis of voltage stability problems in power system. 2014 4th International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship (ICE2T). Kuala Lumpur, Malaysia.
- Guimarães, P., Fernandez, U., Ocariz, T., Mohn, F.W., Zambroni de Souza, A.C. (2011). QV and PV curves as a planning tool of analysis, 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, China.
- Guo, Z., Li, X., Geng, J., Wu, B. (2018). Distribution network reconfiguration based on opposition learning genetic algorithm. 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Singapore.
- López, C.M.V., Silva, R.J.G.C., Zambroni de Souza, A.C. (2015). Use of the state estimator for voltage stability assessment of Itaipu Binacional Hydroeletric power plant, 2015 North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Anderson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., Vittal, V. (2004). Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, pp.1387-1401.
- Martíneza, R.D.F., Zambroni de Souza, A.C. (2017). Contigency analysis with the help of voltage stability tools. Proposals for corrective actions using distributed generation. 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Santa Margherita, Italy.
- Marujo, D., Zambroni de Souza, A.C., Lopes, B.I.L., Santos, M.V., Lo, K.L. (2015). On control actions effects by using QV curves. *IEEE Transactions on Power Systems*, volume 30, Issue 3.
- Monteiro, M.R., Zambroni de Souza, A.C., Lopes, B. I. L. (2017). The influence of renewable generation in voltage collapse indexes. 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Santa Margherita Ligure, Italy.
- Moura, R.S., Zambroni de Souza, A.C., Lopes, B.I.L., Mohn, F.W. (2016). Effects of QV curves in the dynamic behaviour of power systems. *IET Generation*, *Transmission & Distribution*, volume 10, issue 12.
- Narayanan, K., Ganesan, R.G., Manju, A. (2018). Optimal allocation of DG units to counteract load growth. 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Singapore.

- Rawat, M.S, Vadhera, S. (2016). Analysis of wind power penetration on power system voltage stability. 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India.
- Verma, P., Sanyal, K., Srinivasan, D., Swarup, K.S., Mehta, R. (2018). Computational intelligence techniques in smart grid planning and operation: a survey. 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Singapore.
- Singapore.
  Zhang, C., Chen, H., Liang, Z., Mo, W., Zheng, X., Hua, D. (2018). Interval voltage control method for transmission systems considering interval uncertainties of renewable power generation and load demand. *IET Generation, Transmission & Distribution*, volume 12, issue 17.