

CÁLCULO DO PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Lucas Simões Borges¹
Renan Souza Moura¹
Caio César Branco Nunes¹
Cristian Adolfo Alvez¹
Antonio Carlos Zambroni de Souza²

¹Instituto Federal de Minas Gerais

²Universidade Federal de Itajubá

DOI: 10.47168/rbe.v28i3.730

RESUMO

Este trabalho apresenta uma maneira de se obter o ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência de forma otimizada. Para tal fim, utilizou-se a técnica de busca do algoritmo genético para determinar um fator de aceleração que, quando aplicado ao Método da Continuação, diminui o tempo necessário para encontrar o ponto de máximo carregamento. A metodologia proposta foi aplicada ao sistema teste de 14 barramentos do IEEE e ao sistema sul sudeste brasileiro com todos os limites operacionais considerados. Os resultados demonstraram que a utilização do fator de aceleração, encontrado pelo algoritmo genético, permitiu uma diminuição do tempo computacional de 62,8% e 48,1% nos sistemas de 14 barramentos do IEEE e sul sudeste, respectivamente. Esta diminuição do tempo computacional pode ser vantajosa ao se realizar estudos de planejamento e operação que requerem executar o Método da Continuação repetidamente, como no caso da reconfiguração da rede para maximizar a margem de carga.

Palavras-chave: Estabilidade de tensão; Método da Continuação; Algoritmo genético; Otimização computacional.

ABSTRACT

This work presents a way to obtain the maximum loading point of electrical power systems in an optimized way. For this purpose, the genetic algorithm search technique was used to determine an acceleration factor which, when applied to the Continuation Method,

decreases the time needed to find the maximum loading point. The proposed methodology was applied in the IEEE 14-bus test system and in the south-southeast Brazilian system with all operational limits considered. The results showed that the use of the acceleration factor, found by the genetic algorithm, allowed a reduction of the computational time of 62.8% and 48.1% in the IEEE 14-bus and south-southeast systems, respectively. This decrease in the computational time can be advantageous when carrying out planning and operation studies that require running the Continuation Method repeatedly, as in the case of network reconfiguration to maximize load margin.

Keywords: Voltage stability; Continuation Method; Genetic Algorithm; Computational optimization.

1. INTRODUÇÃO

Prever o ponto de máximo carregamento de forma rápida tem sido uma preocupação para os operadores de sistemas elétricos de potência, pois permite realizar intervenções, caso sejam necessárias, de modo a evitar condições operativas indesejadas (ADEBAYO et al. 2020; GHALJEHEI et al. 2017).

Uma das técnicas que calcula o máximo carregamento de sistemas elétricos de potência é o Método da Continuação (GUIMARÃES et al. 2011; NETO et al. 2017). Este método, sendo uma das ferramentas nos estudos de estabilidade de tensão (KUNDUR et al. 2004), pode ter a sua velocidade ajustada através do fator de aceleração. Considerando também que o fator de aceleração é diferente para cada sistema analisado, este trabalho apresenta, como contribuição científica, uma forma de obter um fator de aceleração que, quando aplicado ao Método da Continuação, reduza o tempo computacional necessário para calcular o ponto operativo máximo de sistemas elétricos de potência.

A busca de um melhor fator de aceleração será por meio da técnica do algoritmo genético. A utilização de algoritmos evolutivos tem a vantagem de não necessitar de conhecimentos prévios dos sistemas analisados (KAGAN et al. 2009), o que facilita a sua aplicação como, por exemplo, em (CHOI et al. 2022; SUN et al. 2021) que otimizaram a utilização de potência reativa em sistemas de elétricos de potência.

Três formas diferentes de cálculos do ponto de máximo carregamento são demonstradas como resultados neste artigo: passo fixo, Método da Continuação sem algoritmo genético e Método da Continuação com algoritmo genético. Em todas as simulações, os limites operacionais dos sistemas testes, 14 barras IEEE e sul sudeste, são considerados.

Este artigo é dividido da seguinte forma. Após uma breve introdução, a seção 2 é responsável por apresentar o referencial teórico de forma que a metodologia indicada na seção 3 possa ser compreendida. Por fim, resultados e conclusões são demonstrados, respectivamente, nas seções 4 e 5.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estabilidade de tensão e curva de máximo carregamento

O ponto operacional de um sistema elétrico de potência é afetado por diferentes intensidades de distúrbios. Distúrbios pequenos como, por exemplo, o aumento de carga elétrica, mudança de tap de transformadores, chaveamento de banco de capacitores/indutores, entre outros, podem ser analisados por meio de equações algébricas, pois usualmente causam pequenas excursões das variáveis de estado (KUNDUR et al. 2004).

Formada por sucessivos cálculos de fluxo de potência, a curva PV (MONTEIRO et al. 2017), ou curva de máximo carregamento, utiliza como distúrbio o aumento de carga e demonstra o nível de tensão associado, conforme indicado pela Figura 1.

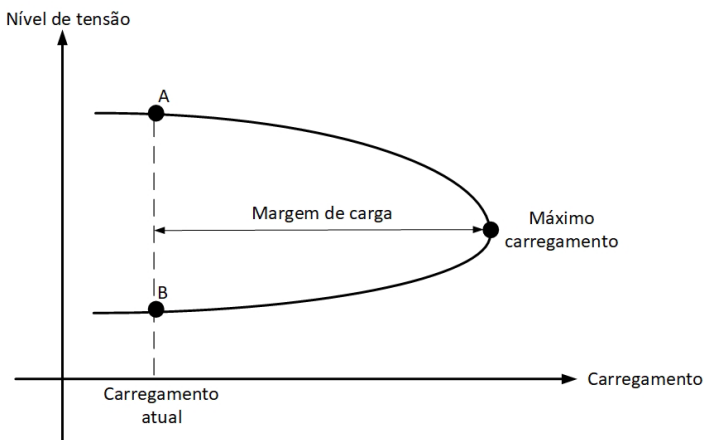


Figura 1 - Curva PV genérica

O ponto A da curva PV é considerado estável sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, pois uma análise de sensibilidade indica que o aumento do carregamento resulta em uma diminuição do ní-

vel de tensão, algo esperado quando se atende uma carga do tipo potência constante. Como o ponto B apresenta características opostas ao ponto A, qualquer condição operativa em torno do ponto B deve ser evitada, sendo considerada instável.

A distância entre o ponto operativo atual e o máximo carregamento é definido como margem de carga. Um sistema elétrico deve sempre operar com uma margem de carga segura, o que permite ao operador realizar intervenções, caso sejam necessárias. Vários trabalhos na literatura técnica buscam ampliar a margem de carga (KUMAR et al. 2020; MOURA et al. 2013; LIN et al. 2011) de sistemas elétricos de potência.

Uma forma de calcular a margem de carga é através do Método da Continuação, descrito a seguir.

2.2 Método da Continuação

O Método da Continuação é dividido em três etapas (GUIMARÃES et al. 2011):

- passo previsor;
- passo corretor, e
- parametrização no ponto de máximo carregamento.

O passo previsor permite calcular o incremento de carga ($\Delta\lambda$) durante a confecção da curva PV, conforme indicado pela equação (1).

$$\Delta\lambda = \frac{k}{\|VT\|} \quad (1)$$

Onde k é uma constante que determina a velocidade do passo e $\|VT\|$ é a norma do vetor tangente. O vetor tangente é definido pela equação (2).

$$\|VT\| = [J]^{-1} \times \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde $[J]$ e $\begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix}$ são, respectivamente, a matriz jacobiana considerando os valores de fluxo de potência convergidos para um determinado valor de carregamento e a matriz com todos os valores de carga ativa e carga reativa nominais.

O elemento do vetor tangente que tem o maior valor absoluto permite também identificar o barramento crítico, que é aquele mais sus-

ceptível a instabilidade de tensão durante a confecção da curva PV (GUIMARÃES et al. 2011).

Uma observação interessante é que os valores dos passos previsoires, calculados pela equação (1), são maiores para pontos operativos distantes do ponto de máximo carregamento e vão diminuindo à medida que o ponto operativo se aproxima do ponto de máximo carregamento. Esta característica é justificada pelo comportamento da matriz jacobiana utilizada na equação (2), pois quanto mais próximo do ponto de máximo carregamento, menor é o valor do determinante de $[J]$, o que resulta em maiores valores de $\|J^{-1}\|$ e menores valores de $\Delta\lambda$. Esta característica deixou bem popular a técnica do Método da Continuação utilizando o vetor tangente para a determinação rápida do ponto de máximo carregamento.

Uma vez definido o novo carregamento da curva PV pelo passo predictor, equação (1), deve-se obter o correspondente ponto da curva PV. Isso é feito ao executar o cálculo de fluxo de potência e corresponde a segunda etapa do método da Continuação, o passo corretor.

Por fim, uma vez atingido o ponto de máximo de carregamento, deve-se realizar uma nova parametrização das variáveis do sistema elétrico (etapa 3 do Método da Continuação). A razão disso é porque o ponto de máximo carregamento, além de estar associado com o ponto de colapso de tensão, pode ser caracterizado matematicamente por uma bifurcação sela-nó (NETO et al. 2017; CANIZARES, 1998). Em termos práticos, isso significa que não é possível obter por meio de um fluxo de potência convencional o ponto de máximo carregamento porque a matriz jacobiana do Método de Newton Raphson apresenta determinante nulo.

2.3 Utilização do algoritmo genético para determinar o fator de aceleração, k

Como o intuito é determinar o fator de aceleração que resulte na obtenção do ponto de máximo carregamento no menor tempo possível, os valores de k representam o espaço de busca.

De forma mais específica, os indivíduos são representados pelos valores de k por meio de uma codificação binária e o conjunto desses indivíduos formam a população. Durante o processo, os indivíduos são avaliados baseados na função objetivo representada pela equação (3).

$$\text{Função objetivo} = \text{minimizar } (t) \quad (3)$$

Onde, t é o tempo computacional para obter o ponto de máximo carregamento.

Após a avaliação dos indivíduos na equação (3), a técnica de seleção por torneio é utilizada para definir aqueles que participarão do processo de cruzamento.

No cruzamento dois indivíduos produzirão dois novos indivíduos. Para que isso seja possível, o número de indivíduos da população deve ser par. Assim, o número de indivíduos é equivalente ao número de barramentos do sistema. Caso o sistema apresente número ímpar de barramentos, é adicionado mais um indivíduo à população.

A etapa de cruzamento está sujeita a possibilidade de ocorrência de mutação. Por isso, definiu-se a probabilidade de ocorrência deste operador em 1%, o qual modifica a informação do *bit* (de “0” para “1”, ou vice-versa).

A cada geração obtida, os indivíduos são avaliados, e aquele que se mostrar mais apto a atender a função objetivo é armazenado. O processo é finalizado após 50 gerações e o resultado final é o melhor valor de k dentre os 50 valores armazenados.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consiste no cálculo do ponto de máximo carregamento através de três métodos diferentes, e a posterior comparação dos tempos computacionais obtidos. Tal metodologia será implementada com a seguinte ordem:

- 1 - cálculo do Fluxo de Potência para o valor de carga nominal;
- 2 - calcular a curva PV considerando passos fixos;
- 3 - calcular a curva PV através do Método da Continuação;
- 4 - calcular a curva PV através do Método da Continuação com o fator de aceleração obtido pelo algoritmo genético, e
- 5 - comparar o tempo computacional dos três métodos.

O fluxograma apresentado na Figura 2 ilustra os passos descritos anteriormente. Observe-se que o método 1 consiste em calcular o máximo carregamento que suporta o sistema utilizando incrementos fixos de carga (passos fixos), enquanto que o Método da Continuação determina os incrementos através dos passos previsor e corretor descritos na seção 2.2. Já o método proposto neste trabalho (método 3), utiliza o algoritmo genético para determinar o fator de aceleração k mais conveniente no método da continuação.

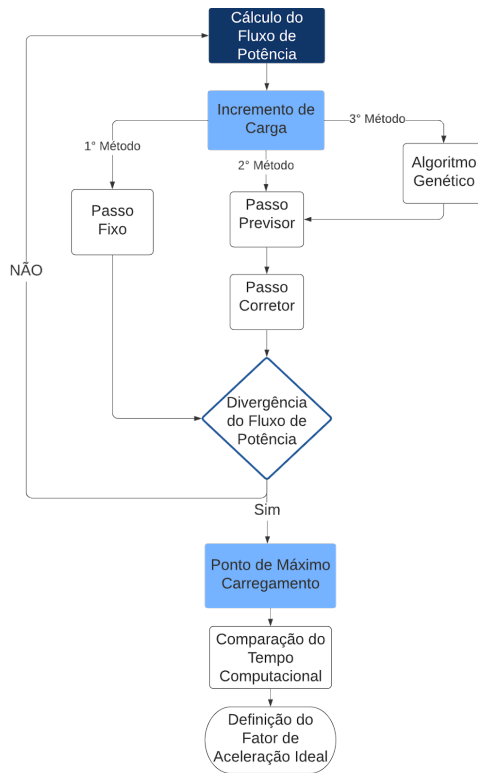


Figura 2 - Fluxograma da metodologia

4. RESULTADOS

Para cada um dos sistemas analisados, o incremento de carga é feito utilizando métodos distintos, passo fixo, Método da Continuação sem algoritmo genético e Método da Continuação com valor de k encontrado pelo algoritmo genético. Em todas as simulações, os limites operacionais dos sistemas foram considerados.

- Sistema teste do IEEE de 14 barramentos

I - Passo fixo

É definido um acréscimo de 1% de carga elétrica, mantendo-se o mesmo fator de potência a cada cálculo de fluxo de potência. As curvas obtidas são apresentadas na Figura 3.

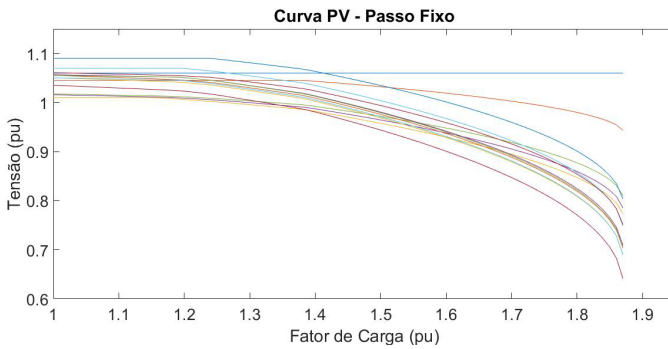


Figura 3 - Curvas PV – Passo Fixo, sistema 14 barramentos do IEEE

II - Passo predictor sem Algoritmo Genético

É utilizado um valor de k igual a 0,26 (MOURA et al. 2013) na implementação do Método da Continuação, cujas curvas PV obtidas estão indicadas na Figura 4.

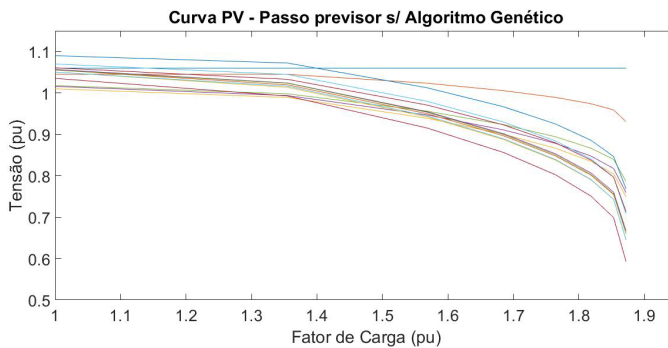


Figura 4 - Curvas PV – Passo predictor sem Algoritmo Genético, sistema 14 barramentos do IEEE

III - Passo predictor com Algoritmo Genético

Como a população inicial da técnica de busca pelo algoritmo genético é gerada de forma randômica, o algoritmo genético foi executado 20 vezes e o gráfico da Figura 5 demonstra em porcentagem o número de vezes que cada valor de k foi obtido como solução.

Ao analisar o gráfico da Figura 5, é possível perceber que a implementação do algoritmo genético indica a utilização de um fator de aceleração igual a 0,63.

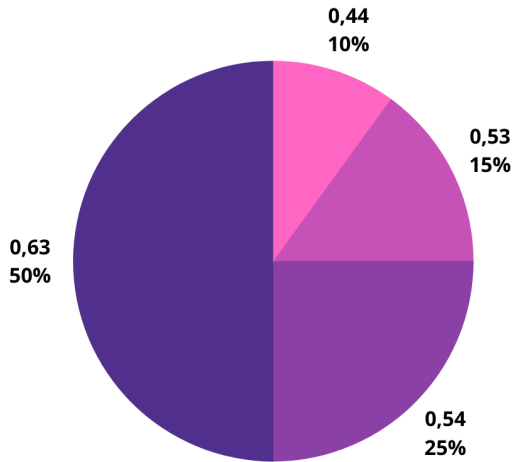


Figura 5 - Porcentagem de vezes que cada valor de k foi obtido como solução no sistema de 14 barramentos IEEE

Assim, ao utilizar o valor de k igual a 0,63 no Método da Continuação, são obtidas as curvas PV da Figura 6.

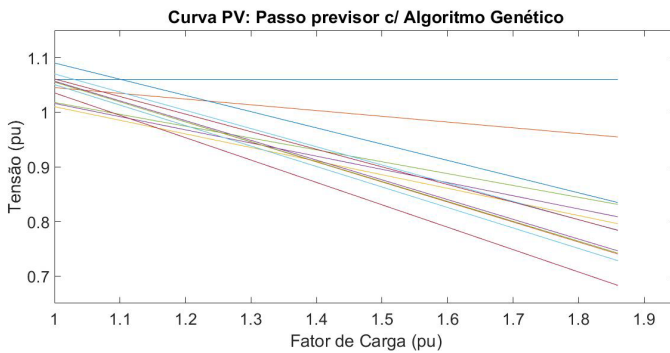


Figura 6 - Curvas PV – Passo predictor com Algoritmo Genético, sistema 14 barramentos do IEEE

A Tabela 1 apresenta as margens de carga obtidas para o sistema de 14 barramentos do IEEE. É possível perceber que os valores de margem obtidos por meio de diferentes métodos são bem próximos.

Tabela 1 – Margens de carga sistema de 14 barramentos

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,8700
Passo predictor s/ Algoritmo Genético	1,8720
Passo predictor c/ Algoritmo Genético	1,8600

- Sistema Sul-Sudeste

I - Passo fixo

Utilizando novamente um incremento de 1% de carga elétrica, mantendo-se o mesmo fator de potência, as curvas PV obtidas para o sistema sul-sudeste são apresentadas na Figura 7.

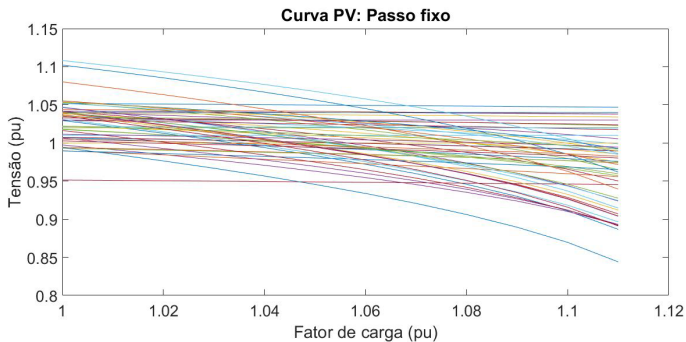


Figura - 7 Curvas PV – Passo Fixo, sistema sul-sudeste

II - Passo predictor sem Algoritmo Genético

É utilizado novamente um valor de k igual a 0,26 no Método da Continuação. As curvas PV obtidas estão representadas na Figura 8.

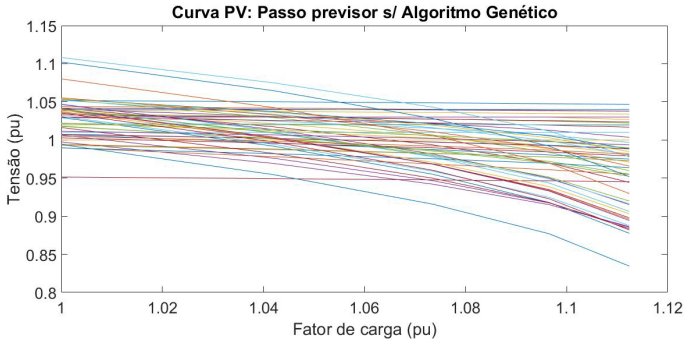


Figura 8 - Curvas PV – Passo predictor sem Algoritmo Genético, sistema sul sudeste

III - Passo predictor com Algoritmo Genético

Semelhante ao processo realizado para o sistema de 14 barramentos do IEEE, o Algoritmo Genético foi executado 20 vezes e o gráfico da Figura 9 demonstra em porcentagem o número de vezes que cada valor de k foi obtido como solução.

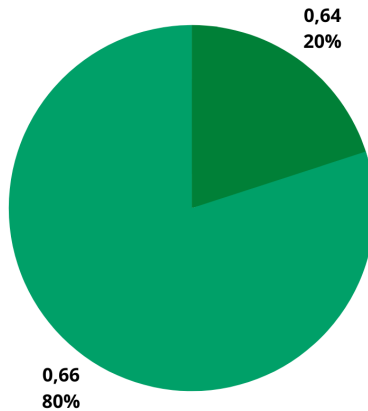


Figura 9 - Porcentagem de vezes que cada valor de k foi obtido como solução

De acordo com o gráfico da Figura 9, é possível perceber que a implementação do Algoritmo Genético indica a utilização de um fator de aceleração igual a 0,66. Ao utilizar este valor de k no Método da

Continuação, são obtidas as curvas da Figura 10.

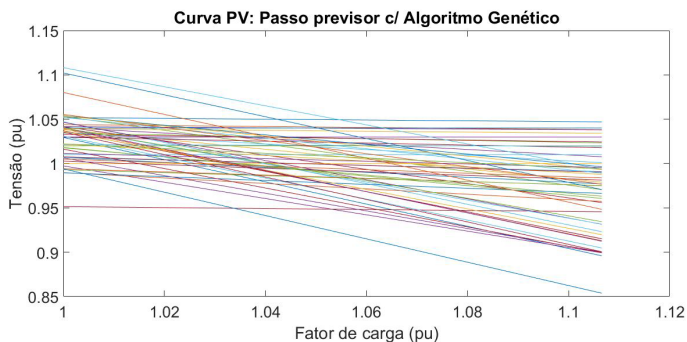


Figura 10 - Curvas PV – Passo predictor com Algoritmo Genético

É possível perceber pela Tabela 2 que os valores de margem obtidos por meio de diferentes métodos são bem próximos no sistema sul-sudeste.

Tabela 2 – Margens de carga sistema Sul - Sudeste

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,1100
Passo predictor s/ Algoritmo Genético	1,1124
Passo predictor c/ Algoritmo Genético	1,1066

- Validação dos resultados

Se comparados os valores obtidos por meio da simulação aos apresentados pelas referências através das Tabela 3 e 4, é possível perceber que são próximos. A diferença entre os valores pode ser justificada devido a divergência de parâmetros utilizados na simulação do cálculo do fluxo de potência como, por exemplo, critério de parada, entre outros. A divergência dos parâmetros utilizados reflete nos valores base obtidos e conseqüentemente na margem de carregamento obtida.

Tabela 3 – Comparação das margens de carga simuladas e apresentadas pelas referências para o sistema de 14 barramentos

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,8700
Passo predictor s/ Algoritmo Genético	1,8720
Passo predictor c/ Algoritmo Genético	1,8600
Apresentado por (Moura, 2016)	1,9110
Apresentado por (Moura et al, 2019)	1,9300
Apresentado por (Reis, 2019)	1,9400

Tabela 4 – Comparação das margens de carga simuladas e apresentadas pelas referências para o sistema Sul - Sudeste

Método	Margem de Carga [pu]
Passo fixo	1,1100
Passo predictor s/ Algoritmo Genético	1,1124
Passo predictor c/ Algoritmo Genético	1,1066
Apresentado por (Moura, 2016)	1,1200
Apresentado por (Moura et al, 2019)	1,1100
Apresentado por (Reis, 2019)	1,1100

- Comparação do tempo computacional

Para definição do ponto de máximo carregamento obtido por cada um dos métodos, foram registrados tempos diferentes para cada sistema analisado. O valor registrado é relacionado ao tempo cronometrado para que cada método obtivesse a curva PV e sua respectiva margem de carga. Além disso, é importante destacar que o tempo registrado para cada um dos métodos, assim como o tempo de treinamento do algoritmo genético, depende diretamente do computador utilizado, o que representa uma limitação da metodologia adotada. Assim, a Tabela 5 apresenta os tempos aferidos para cada um destes métodos.

Tabela 5 – Tempo computacional gasto por cada um dos métodos para os sistemas analisados

Sistema	Passo fixo [s]	Passo predictor s/ AG [s]	Passo predictor c/ AG [s]
14 barramentos	9,8616	1,7453	0,6482
Sul - Sudeste	22,2908	11,3955	5,9118

Por meio dos dados apresentados na Tabela 5, é notório que o método que exige maior tempo de processamento computacional é o dos passos fixos, pelo fato de apresentar um gráfico com número maior de pontos. Se compararmos o tempo obtido através da implementação do algoritmo genético com o método do passo fixo, houve uma redução do tempo computacional em aproximadamente 93,4% para o sistema teste do IEEE de 14 barramentos e de 73,5% para o sistema Sul-Sudeste.

Comparando o Método da Continuação em que é aplicado o algoritmo genético ao Método da Continuação convencional, temos uma redução de aproximadamente 62,8% para o sistema teste do IEEE de 14 barramentos e de 48,1% para o sistema Sul-Sudeste.

5. CONCLUSÕES

A técnica de busca do algoritmo genético permitiu calcular um fator de aceleração que, quando aplicado ao Método da Continuação, obtém o ponto de máximo carregamento com um menor tempo computacional. A ferramenta desenvolvida pode auxiliar os operadores de sistemas de potência nos estudos de planejamento e operação, pois permite determinar de forma eficiente o máximo nível de carregamento que o sistema suporta, antes que ocorram problemas de estabilidade de tensão. Esta diminuição do tempo computacional é muito vantajosa ao realizar estudos que requerem calcular por várias vezes o nível de carregamento, como no caso da reconfiguração da rede para maximizar a margem de carga, ou ao avaliar a margem de carga numa rede que integra montantes significativos de geração renovável. Como trabalhos futuros, sugere-se a comparação de diferentes algoritmos evolutivos no cálculo do fator de aceleração.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, Fapemig, Inerge e IFMG-Campus Formiga pelo suporte a este artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBAYO, I. G.; SUN, Y. (2020), Performance evaluation of voltage stability indices for a static voltage collapse prediction. 2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica, DOI: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219832, Nairobi, Quênia.

CANIZARES, C. A. (1998). Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle-node bifurcations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Vol. 45, artigo número: 45, DOI: 10.1109/81.662696.

CHOI, J.; LEE, K. Y. (2022). *Probabilistic Power System Expansion Planning with Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems*. Wiley-IEEE Press, DOI: 10.1002/9781119819042.ch10, ISBN eletrônico: 9781119684190.

GHALJEHEI, M.; SOLTANI, Z.; HAGGI, H.; GOLKAR, M. A. (2017). Integrated power market with RESs and load uncertainties using scenario-based method in order to voltage collapse probability relief. *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, DOI: 10.1109/IranianCEE.2017.7985221, Teerão, Irã.

GUIMARÃES, P.; FERNANDEZ, U.; OCARIZ, T.; MOHN, F. W.; SOUZA, A.C. Z. (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), DOI: 10.1109/DRPT.2011.5994153, Weihai, China.

KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B.; KAGAN, H. (2009). *Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência*. Editora Blucher, Edição 1, ISBN-10: 8521204728, ISBN-13: 978-8521204725.

KUMAR, R.; MITTAL, A.; SHARMA, N.; DUGGAL, I. V.; KUMAR, A. (2020). PV and QV curve analysis using series and shunt compensation. 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), DOI: 10.1109/PIICON49524.2020.9112917, Sonipat, India.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; CUTSEM, T. V.; 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*, Washington DC, USA, v.19, n. 2, p. 1387-1401.

LIN, C.; JIANG, J. N.; TANG, C. Y.; RUNOLFSSON, T. (2011). A study on the impact of control on PV curve associated with doubly fed induction generators. 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, DOI: 10.1109/PSCE.2011.5772583, Phoenix, Estados Unidos.

MONTEIRO, M. R.; SOUZA, A. C. Z.; LOPES, B. I. L. (2017). Influence of Renewable Generation in Voltage Collapse Indexes. 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Santa Margherita Ligure, Itália.

MOURA, R. S. (2016). Estudo do efeito do tipo da curva QV em simulações dinâmicas em sistemas elétricos de potência. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

MOURA, R. S.; MARUJO, D.; SOUZA, A. C. Z.; LOPES, B. I. L. (2013). Blocking reactive power Generation as a voltage control measure. 22nd International Conference on Electricity Distribution, artigo número 0532, Estocolmo, Suécia.

MOURA, R. S.; REIS, C. F.; PEDROSA, R. K. R; NEVES, T. R. (2019). Estudos sobre a capacidade de hospedagem de geração distribuída em sistemas elétricos de potência utilizando algoritmo genético. ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 7, n. 1, e00452. DOI: 10.29069/forscience.2019v7n1.e452.

NETO, A. B.; ALVES, D. A. (2017). Singularities analysis of the jacobian matrix modified in the continuation power flow: performance evaluation. IEEE Latin American Transactions, Vol. 15, artigo número 11, DOI: 10.1109/TLA.2017.807041.

REIS, C. F. (2019). Estudos Sobre A Capacidade De Hospedagem De Geração Distribuída Em Sistemas Elétricos De Potência Utilizando Algoritmo Genético. Instituto Federal de Minas Gerais. Formiga – MG.

SUN, L.; ZHUO, F.; YANG, Z.; YI, H.; YIN, X. (2021). Optimal Voltage/Var Control of PV Inverters in Distribution Network Based on Genetic Algorithm. 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), DOI: 10.1109/PEAS53589.2021.962826, Shanghai, China.