

## INFLUÊNCIA DE GERADORES EÓLICOS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA CURVA QV EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

BORGES, Geiciani Natália da Silva<sup>1</sup>; ALVEZ, Cristian Adolfo<sup>2</sup>; MOURA, Renan Souza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudante do curso de Engenharia Elétrica do IFMG-Campus Formiga, bolsista PIBIC. E-mail: [geiciani1999@gmail.com](mailto:geiciani1999@gmail.com).

<sup>2</sup>Professor coorientador do IFMG-Campus Formiga. E-mail: [cristian.alvez@ifmg.edu.br](mailto:cristian.alvez@ifmg.edu.br).

<sup>3</sup>Professor orientador do IFMG-Campus Formiga. E-mail: [renan.moura@ifmg.edu.br](mailto:renan.moura@ifmg.edu.br).

**Resumo:** Este artigo analisou a influência de geradores eólicos e painéis fotovoltaicos na curva QV, uma das ferramentas muito utilizadas em estudos de estabilidade de tensão. Para que este estudo fosse realizado, simulações computacionais foram executadas em um sistema teste de distribuição de energia elétrica padronizado pelo IEEE. Consideraram-se diferentes inserções de potência eólica e fotovoltaica gerada durante o cálculo da margem de potência reativa da curva QV. Os resultados demonstraram que a inserção de geradores eólicos e painéis fotovoltaicos alteram os valores das margens de potência reativa da curva QV de forma distintas.

**Palavras-chave:** Curva QV. Geração eólica. Geração fotovoltaica. Fluxo de potência reverso.

### 1 INTRODUÇÃO

Qualquer sistema elétrico de potência está sujeito a distúrbios que alteram o seu ponto operativo. A área de estudos responsável por analisar o comportamento de um sistema sob o ponto de vista de tensão após a ocorrência de um distúrbio é a estabilidade de tensão (KUNDUR et al., 2004).

Uma das ferramentas mais utilizadas em estudos de estabilidade de tensão é a curva QV (MANJUL; RAWAT, 2018), representada pela Figura 1. Esta curva relaciona o nível de tensão e a sua respectiva potência reativa, sendo formada por sucessivos cálculos de fluxo de potência (MONTICELLI; GARCIA, 2011). O ponto A da curva QV é considerado estável, pois o aumento de tensão resulta em uma elevação da potência reativa, o que é algo esperado durante a instalação, por exemplo, de um banco de capacitores shunt. O ponto B apresenta um comportamento oposto ao do ponto A, o que permite classificá-lo, sob o ponto de vista da estabilidade de tensão, como instável.

Um outro ponto notável da curva QV é a margem de potência reativa indicada na Figura 2. A margem é definida como a distância entre o ponto de mínimo da curva e o eixo de tensão (MOHN; ZAMBRONI DE SOUZA, 2006). Quando o ponto de mínimo da curva QV apresenta valor positivo, a margem é classificada como positiva. Caso contrário, a margem de potência reativa da curva QV é negativa, conforme indicado na Figura 2.

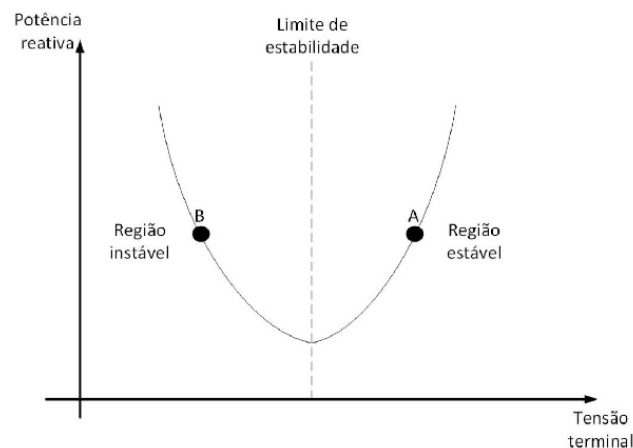


Figura 1 - Curva QV genérica.  
Fonte: Autores, 2021.

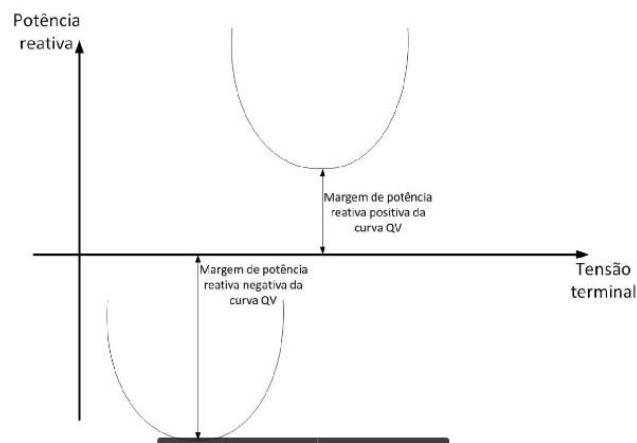


Figura 2 - Margens positivas e negativas das curvas QV.  
Fonte: Autores, 2021.

A margem de potência reativa é um indicativo de robustez em termos de estabilidade de tensão. Os autores de (MOURA et al., 2016) identificaram que a margem positiva da curva QV está associada com a instabilidade de tensão e propuseram, por meio da lógica fuzzy, alterar o tipo de margem da curva QV de positiva para negativa. Algo também foi realizado anos após em [6], utilizando a técnica do algoritmo genético.

Por meio da Resolução Normativa ANEEL n°482/2012, atualizada pela Resolução Normativa n°687/2015, um consumidor conectado no sistema de distribuição de energia elétrica pode gerar energia elétrica na forma de geração distribuída e obter créditos de energia (ANEEL, 2021a).

Embora sistemas fotovoltaicos sejam os mais utilizados como geração distribuída (ANEEL, 2021b), pequenas centrais hidrelétricas, geradores a biomassa, turbinas eólicas, entre outras, também podem ser utilizados.

---

Assim, este artigo pretende calcular margens de potências reativas das curvas QV considerando diferentes potências fornecidas pelos geradores eólicos e painéis fotovoltaicos. Tais cálculos permitirão conhecer o impacto destas fontes na estabilidade de tensão do sistema teste.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho foi executada por meio de simulações computacionais. As seguintes atividades foram desenvolvidas.

1. Modelagem trifásica do sistema de distribuição de 4 barramentos do IEEE;
2. Cálculo do fluxo de potência trifásico no sistema de distribuição de 4 barramentos do IEEE;
3. Cálculo da curva QV com a presença de gerador eólico no sistema de distribuição de 4 barramentos do IEEE.
4. Cálculo da curva QV com a presença de painel fotovoltaico no sistema de distribuição de 4 barramentos do IEEE.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de 4 barramentos do IEEE descrito em (KERSTING, 2012) foi modelado computacionalmente. As curvas QV do barramento de geração, sem a presença de um gerador eólico ou painel fotovoltaico, estão indicadas na Figura 3.

As curvas obtidas na Figura 3 apresentaram margens positivas de potência reativa. Além disso, uma análise de sensibilidade de tensão e potência reativa indica que a região de operação é instável. Em seguida, foi adicionado ao sistema um gerador eólico no barramento 4. Os resultados da margem de potência reativa da curva QV com a presença do gerador eólico estão indicados na Tabela 1.

A modelagem do painel fotovoltaico considerou a mesma potência do gerador eólico, mas operando com um fator de potência unitário. Os resultados da margem de potência reativa da curva QV com a presença do painel fotovoltaico estão indicados na Tabela 2.

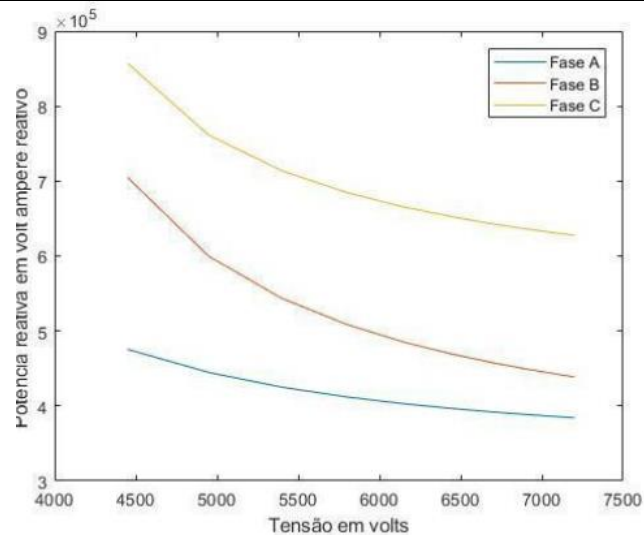


Figura 3 - Curvas QV para o sistema de 4 barramentos do IEEE sem presença de um gerador eólico ou painel fotovoltaico.

Fonte: Autores, 2021.

Tabela 1 – Margens da curva QV no sistema de distribuição com Gerador eólico.

	-10 [kW]	-100 [kW]	-300 [kW]	-500 [kW]	-700 [kW]	-1000 [kW]	-1720 [kW]
Potência reativa Fase A	-7.93185 24e+05	-7.93185 24e+05	-7.830930 2e+05	-7.83093 02e+05	-7.830930 2e+05	-7.8309302 e+05	-7.8309302 e+05
Potência reativa Fase B	-8.74232 63e+05	8.742326 3e+05	-8.720065 4e+05	-8.72006 54e+05	-8.720065 4e+05	-8.7200654 e+05	-8.7200654 e+05
Potência reativa Fase C	-4.96621 68e+05	-4.96621 68e+05	-4.892393 3e+05	-4.89239 3e+05	-4.892393 3e+05	-4.8923933 e+05	-4.8923933 e+05

Fonte: Autores, 2021.

Tabela 2 – Margens da curva QV no sistema de distribuição com Painel fotovoltaico.

	-10 [kW]	-100 [kW]	-300 [kW]	-500 [kW]	-700 [kW]	-1000 [kW]	-1720 [kW]
Potência reativa Fase A	4.150521 8e+05	4.151173 9e+05	4.0941065 e+05	4.177300 0e+05	4.177300 0e+05	4.1773000 e+05	4.247964 8e+05
Potência reativa Fase B	2.687211 3e+05	2.687211 3e+05	2.6996057 e+05	2.699605 7e+05	2.699605 7e+05	2.6996057 e+05	2.854245 4e+05
Potência reativa Fase C	5.589698 1e+05	5.524850 3e+05	5.5248503 e+05	5.524850 3e+05	5.524850 3e+05	5.3157983 e+05	5.256655 0e+05

Fonte: Autores, 2021.

## 4 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos, é possível perceber que quando o gerador eólico é adicionado ao sistema, a curva QV apresenta margens negativas de potência reativa, enquanto a curva QV gerada pela operação do painel fotovoltaico apresenta margens positivas de potência reativa. A razão disso é que o gerador eólico absorve potência reativa do sistema, enquanto que o painel fotovoltaico apenas fornece potência ativa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o setor de Pesquisa e Extensão do IFMG-Campus Formiga pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687/2015**. Brasília, DF: ANEEL. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: jun. 2021.

ANEEL. **Geração Distribuída**. Brasília, DF: ANEEL. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp). Acesso em: jun. 2021.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. 3rd. ed., Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.

KUNDUR, P. et al. Definition and Classification of Power System Stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 2, p. 1387–1401, 2004.

MANJUL, N.; RAWAT, M. S. **PV/QV Curve based Optimal Placement of Static Var System in Power Network using DigSilent Power Factory**. IEEE 8th Power India International Conference (PIICON). Kurukshetra: IEEE, 2018.

MOHN, F. W.; ZAMBRONI DE SOUZA, A. C. Tracing PV and QV curves with the help of a CRIC continuation method. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 3, p. 1115–1122, 2006.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. 2. ed., São Paulo: Editora da Unicamp, 2011.

MOURA, R. S. et al. Effects of QV curves in the dynamic behaviour of power systems. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 10, n. 12, p. 2861–2870, 2016.

## Como citar este trabalho

BORGES, G. N. S.; ALVES, C. A.; MOURA, R. M. Influência de geradores eólicos e painéis fotovoltaicos na curva qv em sistemas de distribuição de energia elétrica. *In: SEMINÁRIO DE PESQUISA E INOVAÇÃO (SemPI), V., 2022. Formiga. Anais eletrônicos [...]. Formiga: IFMG – Campus Formiga, 2022. Disponível em: <https://www.formiga.ifmg.edu.br/seminarios/>.*