



# IMPACTO DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DA MOBILIDADE ELÉTRICA NO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

**Palavras-Chave:** DEQUILÍBRIO DE TENSÃO, VEÍCULOS ELÉTRICOS, SISTEMA FOTOVOLTAICO

**Autores(as):**

**DANIEL CUNHA DE OLIVEIRA, FEEC-UNICAMP**

**Prof<sup>(a)</sup>. Dr<sup>(a)</sup>. FERNANDA C. T. ARIOLI (orientador(a)), FEEC-UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO

A busca por redução das emissões de gases de efeito estufa é uma das protagonistas na elaboração de políticas públicas para um futuro sustentável, sendo a geração renovável e eletrificação do setor de transporte urbano exemplos de destaque. A geração solar fotovoltaica (FV) tem se destacado mundialmente como uma das principais fontes de energia nos últimos anos, com instalação de aproximadamente 168 GW em 2021, 21% maior que o ano anterior; cumulativamente, são 940 GW instalados [1]. No Brasil, este tipo de geração de energia elétrica cresceu significativamente após a resolução nº 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [2]. Este crescimento vem sendo impulsionado pela redução do preço dos painéis e do inversor FV [3].

Com investimentos sendo feitos em grande escala, nota-se o desenvolvimento do setor de mobilidade elétrica pelo aumento contínuo do número de veículos elétricos (VEs) ao longo da última década. No ano de 2020 mais de 10 milhões de VEs formavam a frota mundial, dos quais 6,8 milhões são veículos totalmente elétricos; quantidade que é 42% maior que o ano anterior [4]. No Brasil, o cenário de VEs ainda é incipiente, mas apresenta sinais de crescimento. No estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), há uma previsão de que até 2030 haja um aumento de 180 mil VEs vendidos por ano [5]. Com tantos VEs, e a possibilidade de recarga nas residências e/ou locais de trabalho, deve-se analisar o sistema elétrico com propósito de avaliar impactos das recargas. Assim como os microgeradores FV, os carregadores de VEs estão disponíveis para conexões monofásicas, bifásicas ou trifásicas.

Na literatura técnica há estudos que avaliam os impactos das conexões desequilibradas tanto para o caso de geradores FV [6] quanto para os VEs [7]. No entanto, esses estudos não apresentam um comparativo direto entre os impactos de cada modo de conexão, o que auxiliaria o engenheiro planejador a elaborar esquemas de balanceamento entre carga e geração do sistema elétrico.

Entre os impactos técnicos associados à conexão desequilibrada de recursos energéticos distribuídos está o desequilíbrio de tensão, que em um sistema trifásico está relacionado a alterações nas magnitudes e/ou nos ângulos dos fasores de tensão que fazem com que as grandezas das três fases deixem de ter a mesma magnitude e defasagem de 120° entre si. As principais causas desse fenômeno, tipicamente associadas a sistemas de distribuição de energia

elétrica, são: (a) desequilíbrio topológico, representado por linhas com valores de impedância própria distinta entre as fases, e diferenças nas impedâncias mútuas entre as fases e entre as fases e o solo, aliadas à não transposição das linhas de distribuição; (b) desbalanço no carregamento das fases; (c) defeitos em equipamentos da rede, como curto-circuito entre espiras em transformadores ou geradores, ou a queima do fusível de proteção em uma das fases de equipamentos instalados na rede de média tensão, dentre outras causas. Nas redes de baixa tensão, onde estão presentes cargas desbalanceadas e ramais bifásicos e monofásicos, encontram-se as principais fontes de desequilíbrio da rede de distribuição.

Como resultados do desequilíbrio de tensão destacam-se o aumento das perdas de potência e danos causados a cargas trifásicas, como é o caso dos motores de indução trifásicos, podendo surgir oscilações de torque, diminuição da velocidade do rotor, além de ruídos. Os desequilíbrios verificados nas correntes podem ser de 6 a 10 vezes superiores aos observados nas tensões, levando ao aquecimento dos enrolamentos do motor e causando danos permanentes em seu isolamento [8].

## METODOLOGIA

Para a realização das análises desse projeto, foram implementados dois modelos distintos: uma estação de recarga para os veículos elétricos e um gerador de energia fotovoltaica. Para realizar a modelagem do VEs no OpenDSS (software utilizado para as simulações da rede elétrica), é necessário analisar como ele se comporta diante do sistema elétrico de potência, ou seja, observar seu comportamento quando ele está conectado à rede elétrica. Nesta situação, a rede elétrica fornece energia para o veículo elétrico, mas especificamente para o seu *pack* de baterias, o que propicia o seu carregamento. Assim, o veículo elétrico está consumindo energia da rede e armazenando-a, de forma que é possível modelá-lo no OpenDSS como uma carga (*Load*), que para essa análise foi utilizada como uma carga de potência constante. Como o carregamento do VE depende intrinsecamente do carregador escolhido, será utilizado os dados elétricos específicos do carregador na modelagem da carga.

Já para realizar a modelagem do FV no OpenDSS, utilizou-se o *PVSystem* do OpenDSS, que é o módulo disponível para modelar o sistema fotovoltaico. Esse modelo combina o gerador fotovoltaico e o inversor em simulações de fluxo de potência série temporal com intervalo de tempo maior ou igual a 1 segundo. Devido a isso, o inversor pode encontrar o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico de forma rápida, o que simplifica a modelagem do painel e do inversor.

De modo a avaliar o nível de desequilíbrio que uma estação recarga ou uma estação de energia fotovoltaica pode causar, foram analisados os casos de estações monofásicas, bifásicas e trifásicas, observando todas as conexões possíveis entre as fases, de modo que seja possível mensurar o impacto na rede elétrica. Além disso, é esperado que as conexões trifásicas sejam conexões que tenham um menor impacto sobre o desequilíbrio do sistema, visto que a carga adicionada está dividida nas três fases do sistema. Usando essa mesma lógica, podemos perceber que as conexões monofásicas e bifásicas tendem a desequilibrar mais o sistema, visto que a carga é concentrada em uma (monofásico) ou duas fases (bifásico), o que gera uma diferença de tensão entre as fases. Dessa forma, é esperado que as conexões monofásicas tenham um impacto maior no desequilíbrio do sistema, ao passo que a conexão trifásica é a que menos contribui para isso. No entanto, quando o sistema está previamente desequilibrado, nem sempre a conexão trifásica contribui melhor para o desequilíbrio do sistema

Além disso, é necessário escolher uma rede elétrica com dados realísticos para realizar as simulações série-temporal desses sistemas, de modo que forneça testes válidos e realísticos. Ademais, para ajustar a tensão de fornecimento da rede para estação inserida, é necessário instalar um transformador entre uma barra presente previamente na rede e a barra que será criada para inserir o sistema a ser analisado. Além disso, para que a comparação entre os impactos causados por cada modelo possa ser feita de forma adequada, foi utilizada a mesma potência total instalada na barra criada, a mesma tensão entre as fases e um mesmo transformador trifásico para todos os tipos de conexões (monofásico, bifásico e trifásico) da estação inserida na rede.

O cálculo do fator de desequilíbrio é realizado utilizando a equação presente no módulo 8 do PRODIST [9], que é dada por:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$

Sendo  $\beta$  dado por:

$$\beta = \frac{V_{12}^4 + V_{13}^4 + V_{23}^4}{(V_{12}^2 + V_{13}^2 + V_{23}^2)^2}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi utilizada a rede elétrica IEEE 13 Barras [10], que é uma rede típica de energia já modelada com dados reais presente no software. Ela é uma rede que possui 13 barras, mas apesar de ela possuir poucas barras, ela possui uma configuração necessária para fornecer testes válidos e realísticos nas análises que foram feitas. Ademais, a rede possui cargas desbalanceadas em suas fases, ou seja, o circuito possui um desequilíbrio próprio. Isso quer dizer que as cargas não estão distribuídas nas fases do circuito de forma homogênea, o que gera um desequilíbrio na rede. Devido a isso, antes de ser realizada a análise dos efeitos causados pela inserção dos veículos elétricos ou da estação fotovoltaica nessa rede elétrica, é necessário observar o comportamento natural dessa rede, ou seja, analisar os seus dados antes da inserção dos modelos na rede.

Foram analisados os seguintes casos para ambos os sistemas estudados:

- Monofásico 1 (VEs ou PV monofásicos conectados na fase 1)
- Monofásico 2 (VEs ou PV monofásicos conectados na fase 2)
- Monofásico 3 (VEs ou PV monofásicos conectados na fase 3)
- Bifásico 12 (VEs ou PV bifásicos conectados nas fases 1 e 2)
- Bifásico 13 (VEs ou PV bifásicos conectados nas fases 1 e 3)
- Bifásico 23 (VEs ou PV bifásicos conectados nas fases 2 e 3)
- Trifásico (VEs ou PV trifásicos conectados nas três fases)

Para cada um dos casos que foram analisados, foi obtido o desequilíbrio em todas as barras trifásicas da rede, bem como também foi traçada as curvas de tensões ao longo do tempo para avaliar de uma forma mais detalhada e precisa o impacto causado pela inserção dos modelos analisados na rede elétrica.

A estação de recarga dos veículos elétricos atua como uma carga, consumindo energia da rede elétrica e, conseqüentemente, diminuindo a sua tensão. Já o sistema fotovoltaico atua de forma oposta, visto que ele fornece

energia para rede, fazendo com que a tensão da rede se eleve. Isso pode ser comprovado realizando a simulação do caso trifásico de ambos os sistemas, observando as tensões na barra 100, que é a barra onde o sistema será inserido.

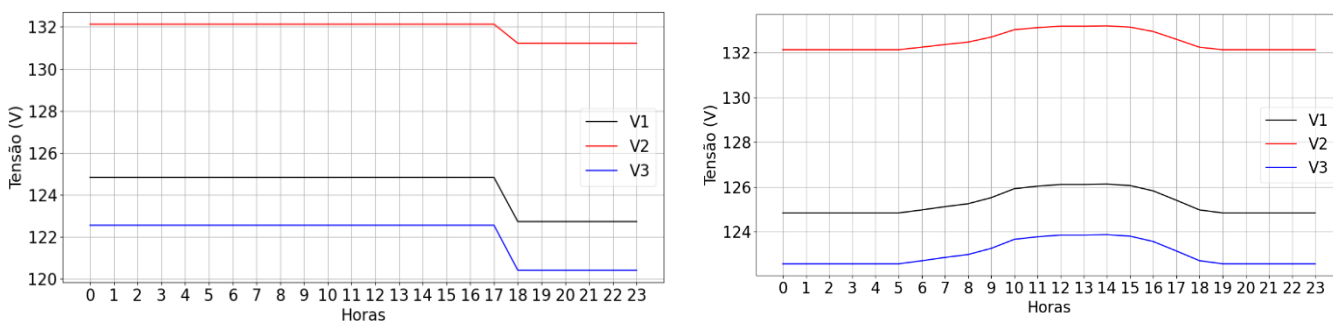


Figura 1: Tensões na barra 100 para o caso da estação de recarga trifásica e do sistema fotovoltaico trifásico, respectivamente

Foi realizado o cálculo do fator de desequilíbrio para todos os casos possíveis nos dois sistemas analisados, além de também ter sido realizado esse mesmo cálculo para a rede elétrica antes da inserção desses sistemas. Com isso, foi possível montar uma tabela da comparação do fator de desequilíbrio antes e depois de inserir o sistema analisado na rede, para verificar quais conexões mais contribuem para aumentar ou diminuir o desequilíbrio da rede.

Tabela 1: Comparação do fator de desequilíbrio antes e depois da inserção dos VEs na rede

Barra	Fator de Desequilíbrio (FD) em comparação com o caso 'Sem VEs' na rede						
	Monofásico 1	Monofásico 2	Monofásico 3	Bifásico 12	Bifásico 13	Bifásico 23	Trifásico
650	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,001
634	-0,103	0,063	0,125	0,063	-0,004	0,191	0,229
671	-0,058	-0,066	0,273	-0,075	0,166	0,214	0,247
675	-0,050	-0,075	0,270	-0,073	0,167	0,208	0,247
632	-0,128	0,121	0,103	0,059	0,016	0,193	0,236
680	-0,029	-0,119	0,352	-0,140	0,253	0,235	0,261
100	1,367	-1,139	1,763	-0,229	2,091	0,627	0,349

Tabela 2: Comparação do fator de desequilíbrio antes e depois da inserção do FV na rede

Barra	Fator de Desequilíbrio (FD) em comparação com o caso 'Sem FV' na rede						
	Monofásico 1	Monofásico 2	Monofásico 3	Bifásico 12	Bifásico 13	Bifásico 23	Trifásico
650	0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,000
634	-0,005	0,101	-0,131	0,135	-0,125	0,150	-0,020
671	0,019	0,186	-0,297	0,265	-0,249	0,098	-0,041
675	0,006	0,187	-0,294	0,263	-0,257	0,102	-0,042
632	0,060	0,065	-0,162	0,134	-0,069	0,117	-0,021
680	0,043	0,229	-0,374	0,330	-0,306	0,082	-0,051
100	0,709	1,630	-0,715	1,703	-0,893	0,915	-0,111

A marcação em vermelho indica que o fator de desequilíbrio naquela barra sofreu um aumento devido a inserção dos veículos elétricos ou do sistema fotovoltaico na rede. Já a marcação em verde, resultou na diminuição do fator de desequilíbrio.

Pelas tabelas acima, é possível perceber que nem sempre a conexão trifásica é a melhor opção do ponto de vista do desequilíbrio da rede, visto que como a rede já está previamente desequilibrada, há conexões que contribuem melhor para a diminuição do desequilíbrio e outras conexões que resultam em um aumento do mesmo.

## CONCLUSÕES

Assim, é de suma importância realizar a análise do comportamento da rede de acordo com cada tipo de conexão, visto que alguns casos podem aumentar de forma significativa o desequilíbrio da rede, ao passo que outras

conexões podem resultar em um desequilíbrio menor. Tendo o conhecimento das características da rede e sabendo o impacto que cada tipo conexão pode gerar, é possível escolher o melhor tipo de conexão para realizar a instalação da estação de recarga ou da estação fotovoltaica (ou de alguma outra carga qualquer).

Caso a rede esteja perfeitamente equilibrada, a melhor opção seria uma conexão trifásica, a fim de manter a rede equilibrada. No entanto, as redes elétricas, em geral, não estão totalmente equilibradas e as cargas conectadas nem sempre são trifásicas. Por conta disso, é necessário saber a quantidade de carga por fase presente na rede, para que seja possível escolher a melhor configuração para realizar a instalação da estação.

Portanto, é primordial saber informações das características da rede e o impacto que cada tipo de conexão causa, para que seja possível realizar a instalação com o menor impactado sobre o desequilíbrio, visto que os sistemas fotovoltaicos e os carros elétricos estão cada vez mais presentes no nosso cotidiano, e entender seus impactos na rede se faz muito necessário para realizar uma melhor modelagem e para evitar que ocorram problemas na rede.

---

## REFERÊNCIAS

- [1] SolarPower Europe, “Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026”, maio 2022. [Online]. Disponível em: <<https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2022/>>. Acessado em: Maio 2022.
- [2] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012”, abril 2012. [Online]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acessado em: Abr. 2021.
- [3] IRENA – International Renewable Energy Agency, “Average total installed costs of residential solar PV systems by country”. [Online]. Disponível em: <<https://www.irena.org/costs/Charts/Solar-photovoltaic>>. Acessado em: Maio 2022.
- [4] IEA – International Energy Agency, “Global EV Outlook 2021: Towards cross-modal electrification,” Paris, França, 2021. [Online]. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>>. Acessado em: Maio 2022.
- [5] EPE – Empresa de Pesquisa Energética, “Plano Decenal de Expansão de Energia: 2021 - 2030”, 2020. [Online]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/planodecenal-de-expansao-de-energia-2030>>. Acessado em: Maio 2022.
- [6] X. Su, M. A. S. Masoum e P. J. Wolfs, "Optimal PV Inverter Reactive Power Control and Real Power Curtailment to Improve Performance of Unbalanced Four-Wire LV Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 967-977, Jul. 2014, doi: 10.1109/TSTE.2014.2313862.
- [7] T. Barbosa, J. Andrade, R. Torquato, W. Freitas e F. C. Trindade, “Use of EV hosting capacity for management of low-voltage distribution systems”, in *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 13, pp. 2620-2629, Jul. 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1791
- [8] Power Quality in Electrical Systems, “Power Quality Basics: Voltage Unbalance”. [Online] Disponível em: <http://www.powerqualityworld.com/2011/06/voltage-unbalance-power-quality-basics.html>.
- [9] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST” [Online]. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>>. Acessado em: fevereiro 2023.
- [10] IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee [On-line]. Disponível em: <<https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acessado em: fevereiro 2023