

ANÁLISE DE IMPACTOS DA INSERÇÃO DE RECURSOS DISTRIBUÍDOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Paulo S. dos Santos Jr¹ (IC), Leonardo Peixoto de Moura¹ (PG), Claudia E. da Matta¹ (PQ), Eliane V. N. Lorenci¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Geração fotovoltaica. *Openss*. Qualidade da energia elétrica. Rede de distribuição ativa Sistemas de distribuição de energia elétrica.

Introdução

O consumo anual de energia elétrica vem apresentando padrões de crescimento sistemático em todo o mundo, impondo assim uma capacidade crescente de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (MELIN e CAMIOTO, 2019). Diante de um cenário crescente de demanda por energia elétrica, com grandes potências de geração de energia sendo explorados, seguido de uma maior consciência no que tange a preservação do meio ambiente, a solução para a autossuficiência energética recai sobre a geração com fonte renováveis de energia (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Segundo o relatório *Renewable capacity highlights* (IRENA, 2020), em 2020, a capacidade global de geração renovável era de 2.537 [GW]. Deste total, a energia hidrelétrica é responsável pela maior parcela, com uma capacidade de 1.190 [GW]. A energia eólica e solar são as com maior contribuição depois da hidrelétrica, com capacidades de 623 e 586 [GW], respectivamente. As outras energias renováveis consideradas no relatório são: bioenergia com 124 [GW], geotérmica com 14 [GW], além de 500 [MW] de energia marinha.

Por conta de tais informações descritas acima, o objetivo gera desta iniciação científica foi a análise de impactos da inserção de recursos distribuídos no sistema elétrico.

Os objetivos específicos foram: modelar no *software OpenDSS* os componentes da microrrede da Unifei; apresentar um estudo de comportamento do fluxo de potência ativo e reativo, fator de potência, perfil de tensão do alimentador; avaliar os impactos causados pelo alto nível de penetração de geradores fotovoltaicos.

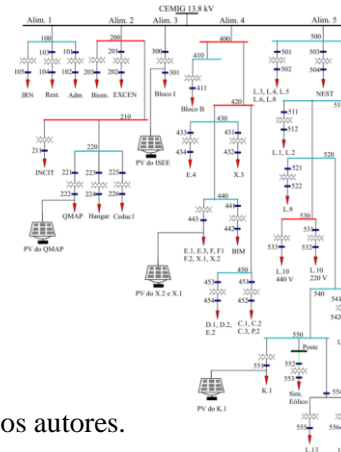
Este trabalho encontra-se organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta a metodologia. A Seção 3 mostra os resultados obtidos e análise. Por fim, a Seção 4 compreende a conclusão deste artigo.

Metodologia

Esta é uma pesquisa de natureza aplicada que se caracteriza por seu interesse prático.

O estudo compreende a utilização de dados reais. Neste sentido, foram adquiridos dados necessários para o dimensionamento do sistema da microrrede Unifei. Para isso foram levantadas informações sobre os cabos usados nessa rede, dados de placa de todos os transformadores, dados do consumo diário de cada prédio e os dados de geração dos painéis fotovoltaicos existentes do Campus. A Figura 1 ilustra o diagrama unifilar simplificado da microrrede Unifei e a localização dos seus geradores fotovoltaicos.

Figura 1. Diagrama Unifilar Simplificado da Microrrede Unifei.



Fonte: os autores.

Primeiramente, para a simulação foi feito a demanda de carga e potência fotovoltaica com curvas diárias: nesta situação, as curvas de demanda e geração fotovoltaica são consideradas ao longo de um período de 24 horas, com *stepsiz*e de 1 hora. Este estudo visa atender a situações mais realísticas, considerando as curvas de demanda de carga e as variações da energia fotovoltaica em função das oscilações diárias de temperatura dos módulos e da radiação solar.

Foi investigado o comportamento da rede de distribuição ativa da Unifei, levando em consideração curvas diárias, tanto para cargas quanto para geração

fotovoltaica. O objetivo das análises é avaliar os efeitos no perfil de tensão, na corrente e na potência do sistema. As análises foram divididas em três simulações:

- Cenário base: o sistema foi considerado sem a presença de geradores fotovoltaicos;
- Cenário 1: consideraram-se apenas geradores fotovoltaicos existentes no campus para as mesmas condições de carga do cenário base. Este cenário possui uma potência instalada nominal CA de 530,5 kW;
- Cenário 2: optou-se por um aumento do número de geradores conectados na rede e conseqüentemente o aumento da capacidade de geração fotovoltaica, submetendo-os às mesmas condições de carga dos outros cenários. Este cenário possui uma potência instalada nominal CA de 1100 kW.

Os cenários de consumo escolhidos para todos os prédios da Unifei são de 20 de outubro. Esse dia foi escolhido com base em suas características de consumo. O dia 20 de outubro foi o dia que apresentou as características de alto consumo de energia, por se tratar de um dia letivo e com maior concentração de alunos devido à época de provas, portanto, esse dia será o de carga pesada.

Os estudos foram realizados para dois modos de simulação. O modo *SnapShot* é utilizado para estudos que desejam conhecer as condições limites do circuito, ou seja, as cargas máxima e mínima. O segundo modo, o modo diário, geralmente realiza o cálculo do fluxo de potência 24 vezes, que corresponde a todas as horas do dia, e analisa situações que podem ocorrer em um dia, tais como coexistência de geração máxima e consumo mínimo e vice-versa.

A separação entre os casos com o número atual e número maior de geradores fotovoltaicos instalados no *campus* da Unifei teve como objetivo a análise da situação atual e um possível caso de autossuficiência energética.

Resultados e discussão

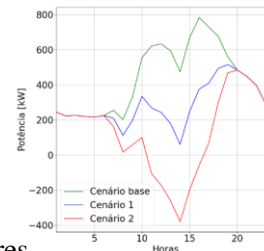
A simulação do sistema em condições de alto consumo diário de energia (carga pesada ou carga alta) com medições do dia de 20 de outubro é mostrada a seguir.

DEMANDA DE CARGA VISTA PELO ALIMENTADOR DA CEMIG

Os efeitos dos geradores fotovoltaicos dos cenários 1 e 2 no alimentador da Cemig são apresentados na Figura 2. A potência reativa fornecida pelo alimentador da Cemig não muda significativamente, como pode ser visto na Figura 3, pois, nos cenários 1 e 2, há apenas pequenas flutuações na intensidade da corrente. Como resultado, as flutuações nas perdas reativas também são baixas. Essas pequenas oscilações na potência reativa do alimentador podem ser observadas

das 10h00 às 14h00.

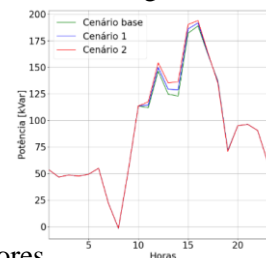
Figura 2. Impacto na Potência Ativa Causado pelo Aumento SFV na rede – Carga Pesada.



Fonte: os autores.

A partir dessas análises constata-se que o sistema fotovoltaico contribuiu para o abastecimento das cargas do sistema e com isso a necessidade de energia ativa fornecida pela concessionária foi reduzida. Observou-se também que apenas o cenário 2 apresentou fluxo de potência reverso, o que indica que a geração acima do consumo ocorreu apenas neste cenário. O sistema apresentou uma pequena flutuação devido às perdas reativas do sistema.

Figura 3. Impacto na Potência Reativa Causado pelo Aumento SFV – Carga Pesada.

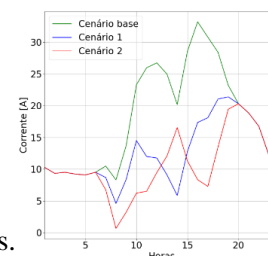


Fonte: os autores.

IMPACTOS NO FATOR DE POTÊNCIA DO ALIMENTADOR DA CEMIG

A Figura 4 mostra os desempenhos do fator de potência ao longo de um dia para os cenários base, 1 e 2, ou seja, sem sistema fotovoltaico instalado, com sistemas fotovoltaicos com potência nominal CA instalado de 530,5 kW, e com um sistema instalado com uma potência nominal CA de 1100 kW, respectivamente.

Figura 4. Impacto no Fator de Potência em decorrência do aumento da penetração fotovoltaica - Carga Pesada.



Fonte: os autores.

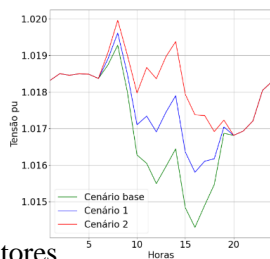
A análise do fator de potência em um cenário de carga alta demonstra que o aumento da penetração da

potência fotovoltaica provoca um aumento no intervalo de violação do excesso reativo, como consequência com um efeito negativo no parâmetro da qualidade da energia elétrica (QEE) relacionado ao fator de potência.

FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Os cenários 1 e 2 apresentam uma curva de tensão, que demonstram que o fenômeno de desequilíbrio de tensão não pôde ser observado mesmo com alta penetração fotovoltaica. A Figura 5 compara os efeitos da geração fotovoltaica no aumento do nível de tensão. Como pode ser visto, o aumento do nível de tensão é proporcional ao aumento da penetração fotovoltaica.

Figura 5. Impacto no Perfil de Tensão Causado pelo Aumento do Nível de Penetração de Potência Fotovoltaica – Carga Pesada.



Fonte: os autores.

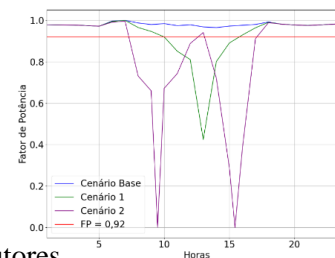
FLUTUAÇÃO DE CORRENTE

A Figura 6 mostra o comportamento da corrente no alimentador da Cemig no cenário de carga pesada. No cenário básico, a corrente se comporta de forma semelhante à potência ativa consumida no sistema, o que era de se esperar, uma vez que a corrente varia com a variação do consumo.

As curvas para os cenários 1 e 2 mostram reduções de corrente significativas em comparação com o cenário base. No cenário 1, os picos máximos passam a assumir valores de 11,8 e 17,4 A, correspondendo a uma redução, em comparação ao cenário base, de 56% e 48%, respectivamente. Nos gráficos de corrente de cenários de carga alta, o fenômeno do fluxo reverso de potência não pode ser reconhecido com certeza, uma vez que os mínimos podem não caracterizar a inversão da direção do fluxo de potência, mas sim a mudança da demanda de carga naquele momento.

A partir das análises é possível inferir que a presença de geradores fotovoltaicos no sistema é vantajosa no cenário de carga alta, uma vez que o gerador auxilia no abastecimento das cargas e, assim, reduz a demanda pela potência ativa fornecida pela alimentação e, consequentemente, uma redução na corrente nas linhas, aliviando o sistema de distribuição.

Figura 6. Comportamento da Corrente no Alimentador da Cemig – Carga Pesada.



Fonte: os autores.

VARIAÇÃO DE ENERGIA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ATIVA DA UNIFEI

A instalação de geradores fotovoltaicos nas redes de distribuição pode reduzir as perdas, que se deve à menor distância entre o gerador e a carga, minimizando o fluxo de potência nas linhas e, consequentemente, a intensidade das correntes que circulam na rede. Porém, esse benefício depende do nível de penetração desses geradores no sistema, pois pode haver um fluxo reverso de potência com grandes correntes.

A dinâmica da troca de energia entre alimentador, cargas e geradores fotovoltaicos, com diferentes cenários de penetração fotovoltaica e de consumo, pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Energia Ativa obtidas do Fluxo de Potência (kWh).

Carga	Cenário	Cemig	Carga	Perdas	PV
Pesada	Base	10309,83	9884,01	425,80	0,00
	1	6876,30	9884,05	432,89	3440,65
	2	3226,44	9884,05	448,68	7106,28

Fonte: os autores.

Deve-se destacar que a energia alimentada pelos sistemas fotovoltaicos no cenário 2 é 107% maior que no 1. Observa-se que o cenário 2 para a carga pesada representa o cenário com maior valor de perdas de energia, sendo consistente por se tratar de cenários caracterizados por alta geração fotovoltaica que apresentam aumento do fluxo reverso de potência e consequentemente as perdas no sistema devido ao aumento da corrente.

Na carga pesada, o aumento das perdas em relação ao cenário base, são 1,67% (cenário 1). Considerando o cenário 2, em que a geração instalada em kWp corresponde à demanda contratada da Unifei, o valor das perdas aumenta em relação ao cenário base 5,37% para a carga pesada.

ANÁLISES DOS RESULTADOS

Com base nestes resultados, podem ser verificados os efeitos significativos da instalação de geradores fotovoltaicos em uma rede de distribuição, no qual os resultados mostram a influência do fluxo de potência reversa no baixo fator de potência e nas perdas de energia ativa, bem como na alimentação de potência ativa em caso de aumento de tensão.

Desta maneira, é possível mitigar estes efeitos,

sendo esses não necessariamente negativos, causados pela elevada penetração da geração fotovoltaica, por meio de possíveis soluções técnicas como compensação reativa, controle de tensão através de reguladores de tensão e armazenamento de energia.

Foram selecionados cinco tópicos que se relacionam com a qualidade da rede de distribuição. As principais conclusões de cada tópico, levando em consideração os dois estudos de caso, são apresentadas a seguir:

1. Fluxo de potência reverso: o cenário de carga pesada com potência atualmente instalada no *campus* não apresentou fluxo reverso; o fluxo reverso de potência é a principal causa da deterioração dos parâmetros de qualidade de energia, sendo importante entender em que situação ocorre esse fenômeno.
2. Perfil de tensão: o perfil de tensão da rede permanece estável em todos os cenários e condições; não foram observados casos de sobretensão.
3. Flutuação de corrente: o estudo realizado mostrou que as oscilações da corrente devido ao aumento da potência da rede não causaram o problema de sobrecarga na rede de distribuição.
4. Fator de potência: o fator de potência deve ser considerado ao integrar geradores fotovoltaicos na rede do *campus*, pois seu valor cai significativamente se gerarem próximo ao consumo das cargas;
5. Perdas técnicas: em todos os cenários examinados, as perdas ativas e reativas aumentaram para todas as condições de carga impostas nas simulações, já que isso advém do aumento de geradores no sistema.

Conclusões

A geração fotovoltaica é uma alternativa promissora no campo da geração de energia elétrica, pois inclui conceitos atuais como geração descentralizada com fonte de energia renovável. O panorama da capacidade fotovoltaica instalada no Brasil e mundialmente, tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos, principalmente em operação paralela à rede elétrica. Portanto, é importante estudar o comportamento do sistema de distribuição em caso de alta penetração dos sistemas fotovoltaicos, para que seu funcionamento seja devidamente planejado, garantindo assim a qualidade da energia elétrica fornecida e a confiabilidade do sistema elétrico. Extensas pesquisas foram realizadas para verificar os principais estudos sobre os efeitos da conexão de geração distribuída. Com base nos trabalhos encontrados na literatura especializada, foi possível orientar os casos e simulações tratados nos estudos.

O objetivo principal deste trabalho foi modelar a rede elétrica do campus da Unifei e verificar os efeitos em alguns parâmetros deste sistema de distribuição com alta penetração de sistemas fotovoltaicos. De uma forma geral, pode-se dizer que o objetivo foi alcançado, pois as

simulações computacionais foram capazes de fornecer resultados relevantes sobre o comportamento do sistema de distribuição em regime permanente sob diferentes condições de penetração fotovoltaica.

A escolha dos casos examinados durante as simulações foi considerada apropriada, pois os estudos seguiram uma complexidade crescente. Estudou-se a rede de distribuição ativa da Unifei com demanda de carga e potência fotovoltaica controladas. Este caso apresentou resultados relevantes ilustrando a relação entre o carregamento do sistema e o nível de penetração fotovoltaica. Porém, este primeiro caso não apresentava condições suficientes para representar a real interação entre o sistema elétrico e os geradores. Para simular os casos de forma mais realista, foi necessário incluir as curvas de demanda e geração fotovoltaica. Com base nas curvas utilizadas, foi visto que o período de máxima geração fotovoltaica correspondia ao período de alta demanda, no caso da curva da carga pesada.

Por fim, pode se dizer que a investigação da conexão de geradores fotovoltaicos em sistemas de distribuição de energia elétrica é um tópico extenso com várias direções de pesquisa possíveis. Neste trabalho, concentrou-se na instalação de geradores fotovoltaicos em uma rede de distribuição real e escolheram-se alguns tópicos relacionados ao desempenho para verificar as consequências da conexão desses sistemas.

Agradecimento

Agradeço, ao PIBIC Unifei pelo apoio dado a esta pesquisa de iniciação científica. Agradeço também, às professoras Cláudia Eliane da Matta e Eliane V. N. Lorenci pela orientação nesse trabalho. Agradeço aos professores do grupo aPTIs SG2 pelos ensinamentos acadêmicos e pessoais durante o tempo do projeto. Por fim, agradeço à Professora Camila Paes Salomon, aos colegas, Leonardo Peixoto de Moura, Karen Adrielle de Faria Silva e Matheus Machado Markovits.

Referências

IRENA. Renewable energy capacity highlights 31 march 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2020.pdf. Acesso em: 12 abril 2021.

MELIN, M.F.M.; CAMIOTO, F. A importância de incentivos governamentais para aumentar o uso da energia solar. *Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, v. 14, n. 5, p. 89.

NASCIMENTO, B. D. N.; LORENCI, E. DE; MINAMI, J. S. A Necessidade de Modernização da Rede Elétrica. In: SOUZA, OLIVEIRA, I. C. Análise Econômica da Inserção de Painéis Fotovoltaicos no Campus da UNIFEI - Itajubá com Simulação de Monte Carlo. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2019.