DOI: 10.48011/asba.v2i1.1243

Avaliação de Impactos da Inserção de Sistema Fotovoltaico na Rede Elétrica da Universidade de Brasília

Juliano V. Gregório*, Rafael A. Shayani, Sergio O. Frontim*****

**Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasil (e-mail: juliano.vieira3@hotmail.com)*
***Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasil (e-mail: shayani@unb.br*
****Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasil (e-mail: sergiofrontin@hotmail.com)*

Abstract: This work is a study of the distributed generation (DG) of solar power connected to the distribution network of the Darcy Ribeiro campus of the University of Brasília. It is known that radial distribution networks were designed to deliver a unidirectional power flow, but the insertion of DG can modify the flow patterns depending on the consumer units' demand curves and the power of the DG. This work aims to identify the impacts of the insertion of different DG configurations in the university's radial network and propose control measures, when applicable. To do that, a method is proposed to determine the electric model, the load curves of the consumer units and to simulate in OpenDSS. The results show that the power system of the University is robust to DG integration, allowing high penetration levels without extrapolating technical criteria. In addition, the insertion of DG was beneficial to the grid, as it reduced technical losses and the university's peak demand. Even when the penetration level reached 104.52%, with a maximum reverse flow of 3,252.33 kW, the voltages exceeded the limits adopted by only 2.98% of the time and could be corrected by the adoption simple measures.

Resumo: O presente trabalho é um estudo da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) conectada à rede de distribuição do campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. É sabido que as redes de distribuição radiais convencionais foram projetadas para atender a um fluxo de potência unidirecional, mas a inserção de GDFV pode modificar os padrões do fluxo dependendo das curvas de demanda das unidades consumidoras (UCs) e da potência da GDFV, ou seja, da irradiação solar incidente em determinado horário. Este trabalho tem como objetivo identificar os impactos da inserção de diferentes configurações de GDFV na rede radial da universidade e propor medidas de controle, quando aplicável. Para isso, propõe-se um método para a determinação do modelo elétrico, para a determinação das curvas de carga das UCs e para a simulação no programa OpenDSS. Os resultados mostram que o sistema elétrico da Universidade de Brasília é bastante robusto em relação à integração da GDFV, permitindo elevados níveis de penetração sem que haja a extrapolação dos critérios técnicos. Além disso, a inserção da GDFV foi benéfica ao sistema, pois reduziu as perdas técnicas e a demanda de pico da universidade. Mesmo quando o nível de penetração atingiu 104,52%, com fluxo reverso máximo de 3.252,33 kW, as tensões ultrapassaram os limites adotados em apenas 2,98% do tempo e poderiam ser corrigidas a partir da adoção de medidas simples.

Keywords: Distributed generation; solar energy; University of Brasilia; computational simulation.

Palavras-chaves: Geração distribuída, energia solar fotovoltaica, Universidade de Brasília e simulação computacional.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os efeitos da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) na rede de distribuição do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, com o objetivo de determinar os impactos causados por tal prática e verificar os limites de penetração da GDFV. A Universidade possuía 52.597 alunos matriculados em 2016, distribuídos em 4 campi universitários: Darcy Ribeiro, Gama, Planaltina e Ceilândia. Dentre eles, o campus Darcy Ribeiro é o maior. Possui uma área total de 3.950.579 m² e 552.171 m² de área construída (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2012). Por apresentar uma área tão extensa, o seu sistema de distribuição elétrica é complexo.

O modelo da rede elétrica de média tensão interna à Universidade e as curvas de carga das unidades consumidoras (prédios das faculdades e institutos) precisaram ser determinados. Após isso, foram simulados diferentes cenários de arranjos fotovoltaicos para determinação dos impactos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geração distribuída e geração centralizada

Em um sistema elétrico de potência convencional, os geradores estão localizados a longas distâncias dos centros de consumo, possuem uma grande potência de geração e usam extensas linhas de transmissão para alimentar os diversos consumidores. De modo contrário, a geração distribuída (GD) é caracterizada por sua localização próxima das cargas, que consomem diretamente a energia gerada, característica de fontes renováveis tal como a energia solar. Além das vantagens ambientais, a utilização de fontes renováveis de maneira distribuída pode reduzir os custos da eletricidade por dispensar a necessidade dos sistemas de transmissão de energia (SHAYANI, 2010). Dessa maneira, é de grande valia a instalação de GD, em especial nos grandes centros urbanos, onde há grande demanda por energia elétrica.

2.2 Impactos na Distribuição

A conexão de GD nos sistemas de distribuição pode causar alguns impactos na rede elétrica, dependendo do nível de penetração no sistema. Quanto maior o nível de penetração, mais severos tendem a ser os problemas causados. Também há benefícios com a utilização de GD, ambos são descritos nesta seção.

As redes com GC são consideravelmente mais previsíveis; os fluxos de potência e, consequentemente, o dimensionamento dos componentes, é bem definido. A energia flui de forma unidirecional, da subestação para os consumidores. De outro modo, com GD o fluxo de potência não se comporta de forma completamente previsível, visto que depende também da curva de geração instalada na unidade consumidora. Nessa nova configuração, o fluxo não é necessariamente unidirecional, e a subestação pode até receber ao invés de fornecer potência (SHAYANI, 2010).

A sobretensão nos sistemas de distribuição é um fenômeno que pode provocar problemas na rede e danos a equipamentos eletroeletrônicos a ela conectados; para não prejudicar os consumidores, deve ser mantida dentro dos níveis adequados. Quando há inversão no fluxo de potência devido à conexão de GD junto aos consumidores, ocorre uma inversão no sentido da corrente no ramal. Desse modo, devido à resistência dos condutores de distribuição, a tensão na carga passa a ser maior que a tensão de alimentação do circuito (SHAYANI, 2010; CAMARGOS, 2013).

Diz-se ocorrer uma sobrecorrente quando a corrente fluindo no dispositivo em questão é superior à corrente nominal para a qual ele foi projetado (CAMARGOS, 2013). Assim, as sobrecorrentes podem danificar os equipamentos e são um parâmetro importante no dimensionamento dos equipamentos e sistemas elétricos.

Após a adição de GD nos alimentadores, a simulação do fluxo de potência aumenta em complexidade de forma não trivial, e a magnitude das correntes elétricas, bem como sua direção de propagação, não são definidos apenas pelo valor nominal das cargas. Portanto, o processo de dimensionamento dos componentes se alterará substancialmente após a inserção da GD nos sistemas de distribuição.

Há uma série de benefícios relacionados à inserção de GDFV nos sistemas de distribuição das concessionárias. SHAYANI (2010) mostra que, quando a GDFV é combinada com sistemas de armazenamento de energia, pode-se reduzir o desequilíbrio de tensão entre as fases por meio da injeção de correntes propositalmente assimétricas; regular o fator de potência, os níveis de energia reativa e os níveis de tensão nos distribuidores; reduzir a demanda na ponta de carga; e melhorar a confiabilidade da rede. Além disso, pode haver redução nas perdas técnicas do sistema.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais (Estudo de Caso)

É necessário que se tenha uma série de informações acerca do sistema elétrico a ser estudado, entre elas pode-se citar: dados elétricos do alimentador, limites adequados de tensão, capacidade de condução de corrente, curvas típicas da demanda dos consumidores e valores da irradiância solar. Esses parâmetros são explicados a seguir.

3.1.1 Alimentador de distribuição do campus

O Google Mapas torna possível a visualização de imagens de satélite e das ruas mapeadas pela ferramenta *Google Street View*. Assim, é possível navegar virtualmente através das ruas e estudar as conexões elétricas presentes na maioria dos postes de distribuição elétrica

Portanto, a utilização das imagens de satélite em conjunto com as imagens das ruas do *Campus* Darcy Ribeiro possibilita realizar um mapeamento completo das partes visíveis da rede de distribuição. Utilizando a ferramenta de medida de distâncias presentes no mesmo programa, é possível medir a distância entre os pontos de conexão e estimar o comprimento dos condutores elétricos de média tensão. Os pontos de interesse, tais como transformadores, postes de distribuição e derivações, foram mapeados e, a partir desse mapeamento, o caminho dos condutores elétrico foi traçado.

O esquemático do sistema de distribuição do Campus mostrando o caminho dos condutores elétricos de média tensão é mostrado na Figura 1.



Figura 1 - Esquemático do sistema de distribuição do Campus mostrando o caminho dos condutores elétricos de média tensão.

3.1.1.2 Parâmetros elétricos de condutores e transformadores

Para a determinação das características elétricas dos condutores, tais como o seu diâmetro externo, o raio geométrico, resistência elétrica à corrente contínua e à corrente alternada (60 Hz), reatância indutiva e capacitiva e a capacidade de condução de corrente, foram consultados o Manual de Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço – CAA (série AWG) do fabricante *Nexans* e a norma CEB NTD 1.02 – Critérios para Projeto de Redes Aéreas Urbanas Convencionais. As características elétricas dos transformadores foram obtidas na literatura.

3.1.1.3 Níveis de tensão

O lado de alta tensão do alimentador possui tensão de 13.800 V e o lado de baixa tensão, 380 V. Considerou-se que a alimentação dos transformadores se dá em um ponto próximo da carga consumidora desse modo, apenas a queda de tensão nos condutores com tensão de 13.800 V será considerada.

3.1.1.4 Unidades consumidoras

Considera-se 50 unidades consumidoras localizadas na Gleba A do campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, representando os prédios das faculdades e institutos, que recebem a rede interna de média tensão e, por meio de transformadores internos aos prédios, fornecem baixa tensão às instalações.

3.1.2 Critérios de tensão e capacidade de condução de corrente

A Aneel estabelece, no seu Procedimento de Distribuição (PRODIST), a faixa de tensão considerada adequada nos sistemas de distribuição e que será adotada como critério de tensão neste trabalho, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de tensão adequada.

Tensão de Referência (V)	**Faixa de Tensão Adequada (V)**	**Faixa de Tensão Adequada (p.u.)**
13.800	12.834 ≤ Tensão ≤ 14.490	0,93TR ≤ Tensão ≤ 1,05TR

Fonte: ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 8, 2016. (Modificado)

De outro modo, a corrente elétrica fluindo nos dispositivos, sob efeito da GDFV, será comparada com a sua capacidade de condução de corrente, tanto para condutores quanto para transformadores. Nos casos em que a corrente obtida for superior à corrente nominal, o dispositivo – condutor ou transformador - estará em sobrecarga, e o processamento deve alertar o usuário sobre este impacto na rede.

3.1.3 Valores de irradiância solar, temperatura, eficiência e potência gerada pela GDFV

Quatro parâmetros importantes para o desempenho de painéis fotovoltaicos são os valores da irradiância solar no local de instalação, a variação da temperatura ao longo do dia, a eficiência dos painéis utilizados na instalação e a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos.

Os valores de irradiância solar média em Brasília foram obtidos através do programa *PVSyst*, que fornece a curva diária para dias típicos na cidade analisada. A partir da análise dos dados, observaram-se três possíveis curvas de irradiância solar: Irradiância Média exibe um dia típico ao longo dos anos analisados, Irradiância Máxima mostra o dia com a máxima irradiância registrada e Irradiância Mínima, o dia com a mínima irradiância em horário de pico (12h).

Há um perfil padrão de variação da temperatura na superfície dos painéis fotovoltaicos utilizado pelo *OpenDSS* e assumiu-se que diariamente os painéis estão sujeitos a tal curva de temperatura. Em relação à potência gerada pelos módulos fotovoltaicos, Camargos (2013) mostra que a potência gerada pela GDFV pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$P = I \times N \times \eta \times A \quad (1)$$

Em que:
P = potência gerada pela GDFV em watt (W);
I = irradiância solar em watt por m² (W/m²);
N = número de unidades consumidoras na barra;
η = eficiência do painel fotovoltaico; e
A = área destinada à instalação dos painéis.
Portanto, a potência gerada em cada unidade consumidora pode ser determinada a partir dos itens acima descritos.

3.1.4 GDFV na UnB

Pode-se utilizar a área dos telhados disponíveis para a instalação de painéis fotovoltaicos para se estimar a potência que pode ser gerada em prédios de interesse. Para mapear as áreas disponíveis nas edificações, utilizou-se o programa *Google Earth.* Após a determinação das áreas máximas disponíveis, calculou-se a área útil para instalação de painéis fotovoltaicos considerando-se que a porcentagem de aproveitamento do telhado é igual a 80% da área total para edificações antigas e, 50% para edificações com menos de 30 anos (Terragis Consultoria, 2014). Um cenário de referência foi modelado (caso ba-se) e comparado com um cenário de GDFV insta-lada no ICC Norte, ICC Sul, SG 11, CDT, CPD, PAT, PJC, BSA Norte e BSA Sul tendo como base a área útil de telhado disponível e com máxima irradiação solar.

3.2 Métodos

Propõe-se um método de avaliação dos impactos ocasionados pela introdução da GD em uma rede de distribuição.

3.2.1 Fatores de influência

A inclusão de GDFV nas redes de distribuição deve ser limitada pelos impactos causados no sistema, notavelmente os níveis de tensão e o limite térmico dos condutores e transformadores. A energia injetada na rede pela GDFV depende da geração fotovoltaica e do consumo da carga, ou seja, a produção local de energia subtraída do consumo. A geração de energia, por sua vez, depende da irradiância solar. Assim, dois fatores importantes a serem considerados nos estudos acerca da GDFV são: a irradiância solar e a demanda das unidades consumidores.

3.2.2 Irradiância Solar

Um dos fatores a serem considerados é a variação da irradiância solar incidente ao longo do dia, pois a produção fotovoltaica é notavelmente maior em horários com maior irradiância solar. Já no começo da manhã e no final da tarde, a produção é reduzida. Além disso, a irradiância pode ser alterada por efeitos climáticos diversos. Finalmente, pode-se considerar também a localização geográfica da GDFV. Observa-se que os países localizados próximos à linha do equador possuem recursos solares mais abundantes do que os localizados mais próximos aos polos.

3.2.3 Demanda das Unidades Consumidoras

A demanda das unidades consumidoras de energia elétrica depende do tipo de consumidor em que elas se enquadram: comercial, residencial ou industrial. Camargos (2013) mostra que "a variação de demanda influencia a injeção de potência e esta afeta diretamente o limite de penetração da GDFV, uma unidade consumidora pode alterar esse limite ao longo do dia, dependendo de qual tipo ela seja, e em diferentes dias da semana".

3.2.4 Métodos de simulação

O *Open Distribution System Simulator* (*OpenDSS*) é um programa destinado às análises de sistemas de distribuição de energia desenvolvido pela *Electric Power Research Institute* (EPRI), as análises são feitas no domínio da frequência. A estrutura do *OpenDSS* divide os circuitos elétricos em estruturas distintas, são elas: *Power Delivery Element* (*PDElement*), *Power Conversion Element* (*PCElement*), *Controls* e *General*.

O primeiro passo da simulação é inserir os parâmetros dos circuitos. Os componentes básicos do circuito são: alimentador, condutores, transformadores, reguladores, geradores e capacitores. Também são inseridas informações acerca das cargas e da GDFV. Os parâmetros inseridos e os passos da simulação são mostrados nos tópicos a seguir.

Os parâmetros dos componentes do sistema elétrico são inseridos utilizando a estrutura predefinida, de fácil acesso na documentação técnica do programa.
Os principais dados de entrada são as coordenadas geográficas das barras, geometria da linha de distribuição, condutores, transformadores, curvas de carga, medidores e monitoramento.

Após a inserção dos parâmetros no *OpenDSS*, a simulação do circuito é realizada através do acionamento do comando *solve*. A obtenção dos dados provenientes da simulação, tais como níveis de tensão, potências, correntes e perdas nos circuitos, são fundamentais para a análise do sistema elétrico de potência.

Ferraz (2015), mostra que os principais comandos utilizados para a extração dos dados são:

- *Show voltagesln*: mostra a tensão de fase-neutro em todas a barras;
- *Show powers kva*: mostra a potência ativa e reativa consumida em cada elemento do circuito;
- *Show losses*: mostra as perdas em cada elemento e as perdas totais nas linhas de transmissão e nos transformadores;
- *Plot Loadshape*: mostra a curva de carga;
- *Plot Monitor*: exibe a tensão ou potência de um elemento ao longo do tempo.

Com a execução do *OpenDSS* no modo *Daily*, ou seja, com a curva de carga diária, os comandos de exibição de valores tais como *show losses* exibem apenas os resultados obtidos na última interação. Assim, para a compreensão do comportamento ao longo do tempo, os dados são exportados e analisados com a ajuda do Microsoft Excel.
Há variações nas curvas de carga das unidades consumidoras em diferentes dias da semana, assim as simulações são realizadas para diferentes dias típicos. Além disso, o nível de penetração da GDFV é variado. Desse modo, é necessário alterar os dados importados ao *OpenDSS* e simular cada novo cenário analisado.

3.2.5 Hipóteses adotadas

O método utilizado para o estudo dos impactos causados pela inserção da GDFV na rede de distribuição adota as seguintes hipóteses (SHAYANI, 2010):

1. O sistema é trifásico, simétrico e equilibrado. Desse modo, apenas as impedâncias de sequência positiva são utilizadas e pode-se se analisar os resultados obtidos por fase, no sistema por unidade (p.u.);
2. Em regime permanente, nenhum equipamento está em sobrecarga;
3. As cargas e a GDFV mantêm sua potência constante para uma dada variação de tensão, ou seja, são modelados com potência constantes;
4. O fator de potência dos inversores é unitário, ou seja, a GDFV produz apenas potência ativa; e
5. Todos os geradores distribuídos estão próximos

entre si, assim a irradiância incidente sobre os painéis solares é idêntica para todas as instalações.

SHAYANI (2010) mostra que a adoção das hipóteses acima citadas não compromete o resultado das análises, pois apesar de poder existir consumidores desequilibrados ou com conexões monofásicas e bifásicas, a existência de muitos consumidores no ramal de distribuição permite obter um sistema elétrico aproximadamente balanceado.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção são apresentados os limites de penetração de GDFV na rede de distribuição do *Campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. O procedimento considera as variações nas curvas de carga das unidades consumidoras em dias úteis e finais de semana típicos e alteração da irradiância solar ao longo do dia. Um cenário de referência foi modelado (caso base) e comparado com um cenário de GDFV instalada no ICC Norte, ICC Sul, SG 11, CDT, CPD, PAT, PJC, BSA Norte e BSA Sul tendo como base a área útil de telhado disponível e com máxima irradiação solar

4.1 Cenário 1 (caso base) – Sem GDFV

O cenário base para o sistema elétrico da Universidade de Brasília é simulado com as curvas de demanda típicas das unidades consumidoras tanto para dias úteis quanto para os finais de semana, apresentadas na seção anterior. Analisa-se aqui o comportamento do sistema de distribuição em suas condições normais de operação, sem a presença de GDFV.

A tensão para as barras do CDT, CESPE e CPD apresentaram maiores variações de tensão durante o dia útil; as tensões variaram de 1,038 às 4:00 hora no CDT a 1,030 às 15:00 horas no CESPE. Assim, a tensão nas barras é menor nos horários de maior consumo, durante o dia, conforme Figura 2.

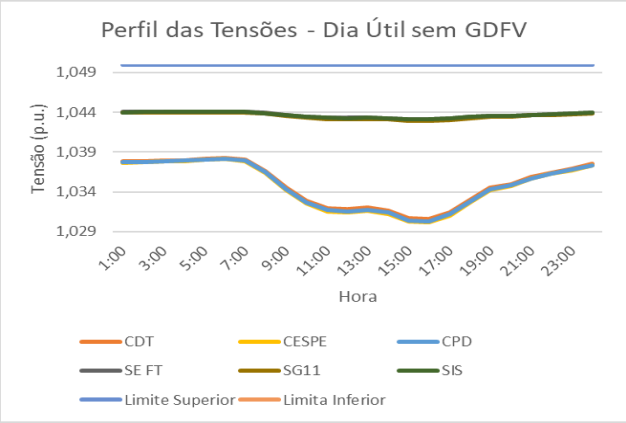


Figura 2. – Perfil das tensões durante dias úteis sem a inserção de GDFV exibindo as três barras com maior tensão (SIS, SG11 e SE FT) e as três barras com as menores tensões (CESPE, CPD e CDT).

Observa-se na Figura 3 que as tensões nas barras mais distantes do ramal de entrada apresentam maiores quedas de tensão, não apenas pela maior impedância elétrica ocasionada pela distância, mas também pelo menor diâmetro dos condutores nas conexões finais do alimentador e, consequentemente, maior impedância dos trechos. A Figura 3 mostra que a distância influencia a queda de tensão nas barras consideradas. No gráfico, compara-se as tensões às 6:00 horas, quando a universidade apresenta consumo menor e, portanto, menores quedas de tensão, com as tensões às 15:00 horas, onde ocorre maior consumo e as tensões mínimas são observadas no sistema.

Percebe-se que a queda de tensão afeta todas as barras, com exceção da barra de referência, e que, quanto maior a distância em relação ao ramal de entrada, maior a queda de tensão. Assim, conforme observado, as barras do CPD, CDT e CESPE (as mais distantes) sofrem maiores impactos em suas tensões.

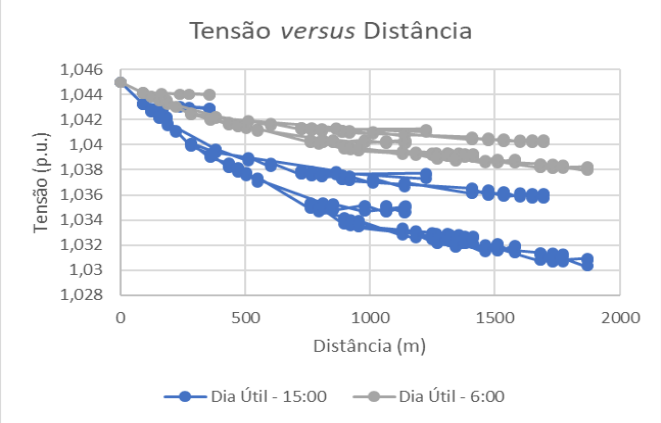


Figura 3. Tensão (em p.u.) nas barras em função da distância em relação ao ramal de entrada da Universidade de Brasília para um dia útil típico às 6:00 e às 15:00.

Em relação às perdas ôhmicas no *campus*, a Figura 4 mostra que as perdas são função do consumo elétrico e, por esse motivo, as curvas de consumo médio e perdas médias possuem perfis semelhantes. Em um dia útil típico, o *Campus* consome 65.937,36 kWh e apresenta perdas de 2.863,24 kWh, já nos finais de semana o consumo elétrico diário é reduzido para 44.967,60 kWh, apresentando perdas iguais a 2.394,97 kWh. Desse modo, o sistema elétrico da universidade possui uma eficiência média de 95,658% nos dias úteis e de 94,674% aos finais de semana.

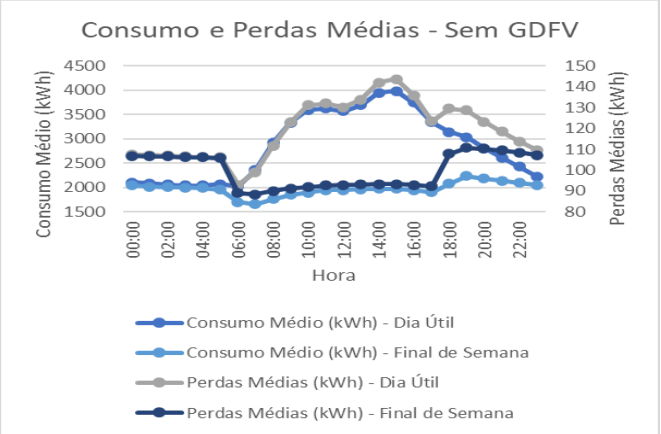


Figura 4. Consumo energético da universidade e perdas médias, ambos em kWh, para cada hora do dia para dias úteis e finais de semana.

4.2 Cenário 2 – GDFV em diversas unidades consumidoras

Uma nova simulação foi realizada considerando uma curva de irradiância com valor de pico elevado e penetração de GDFV na Universidade de Brasília. Dados do *National Renewable Energy Laboratory* (2017), do Departamento de Energia dos Estados Unidos, mostra que em Brasília ocorreram, em 2017, picos de irradiação solar iguais a 1.053 W/m². A fim de simular um cenário em que houvesse grande geração a partir dos módulos fotovoltaicos, a curva de irradiância possui valor máximo coincidente com os picos registrados em 2017, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Curva de irradiância, em W/m². Nos horários não indicados a irradiância é nula.

Horário	Irradiância W/m²	Horário	Irradiância W/m²
05:00	0,00	**12:00**	1.053,00
06:00	55,91	**13:00**	984,66
07:00	282,66	**14:00**	830,91
08:00	534,27	**15:00**	633,66
09:00	762,57	**16:00**	386,72
10:00	930,31	**17:00**	135,12
11:00	1.035,92	**18:00**	6,21

A potência máxima gerada pelo sistema fotovoltaico das unidades consumidoras foi calculada levando-se em consideração as áreas disponíveis nos telhados dos edifícios, os resultados são exibidos na Tabela 3. Nessas condições, a GDFV injeta 47.003,23 kWh diários na rede de distribuição, correspondendo a 71,28% do consumo em um dia útil típico. Já nos finais de semana, corresponderia a 104,52% do consumo, ou seja, há excesso de energia.

Tabela 3. Áreas úteis dos telhados das unidades consumidoras e a potência de pico da GDFV.

Prédio	Área útil do Telhado (m²)	Potência Máxima da GDFV (kWp)
ICC	26.009	4.518,93
SG 11	1.513	262,88
CDT	1.019	177,05
CPD	436	75,75
PAT	1.405	244,11
PJC	1.405	244,11
BSA NORTE	2.867	498,13
BSA SUL	864	150,12
TOTAL	35.608	6.171,08

As curvas de demanda do medidor geral do sistema com GDFV são comparadas ao sistema sem a GDFV na Figura 5. Observa-se que há uma alteração relevante no formato das curvas e, consequentemente, no comportamento do sistema elétrico. Durante os dias úteis, a potência da GDFV causa reversão no sentido do fluxo de potência das 8:00 às 14:00 horas, o fluxo reverso tem valor máximo de 1.606,52 kW às 11:00. Como nos finais de semana a demanda é menor, a inversão do fluxo ocorre das 7:00 às 16:00 horas, com valor máximo de 3.252,33 kW também às 11:00 horas. Nota-se que a máxima potência injetada pela universidade (3.252,33 kW) ocorre aos finais de semana – quando há a inversão no fluxo de potência – e equivale à 81,70% da demanda máxima do campus (3.980,95 kW nos dias úteis).

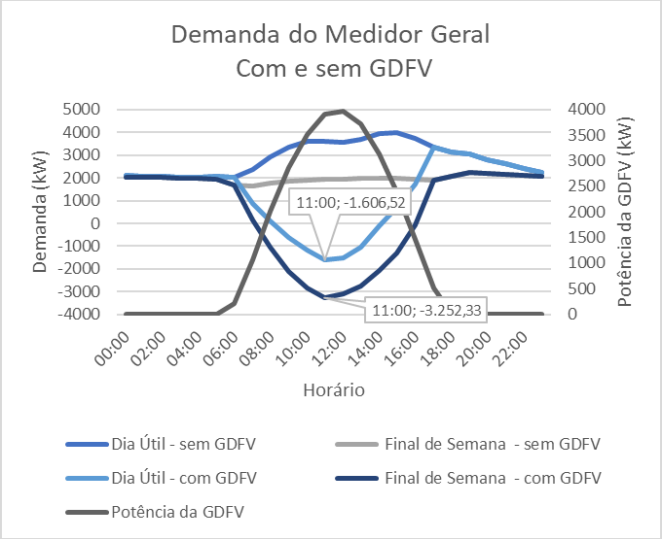


Figura 5. – Demanda do medidor geral para dias úteis e finais de semana, com e sem GDFV. Observa-se que para os finais de semana há a inversão no fluxo de potência.

Durante os dias úteis, não há sobretensões no ICC Norte. Já durante os finais de semana, das 10:00 às 12:00 horas, 22 barras ultrapassam os limites de tensão adequada; às 13:00 horas esse número cai para 14 barras. Neste caso, as tensões no ICC Sul atingiram 1,0529 p.u.

As variações de tensão ao longo de um final de semana típico para as 22 barras que apresentaram sobretensões são mostradas na Figura 6, indicando que ocorrem apenas aos finais de semana e por um período de 5 horas, das 9:00 às 14:00 horas; em todos os demais horários da semana, não há sobretensão. Assim, em uma semana típica, a rede de distribuição da concessionária não enfrenta problemas relacionados à inserção da GDFV em 94% do tempo (só há extrapolação dos limites durante 10 horas a cada semana), situação que pode ser corrigida com o desligamento temporário de alguns dos painéis fotovoltaicos.

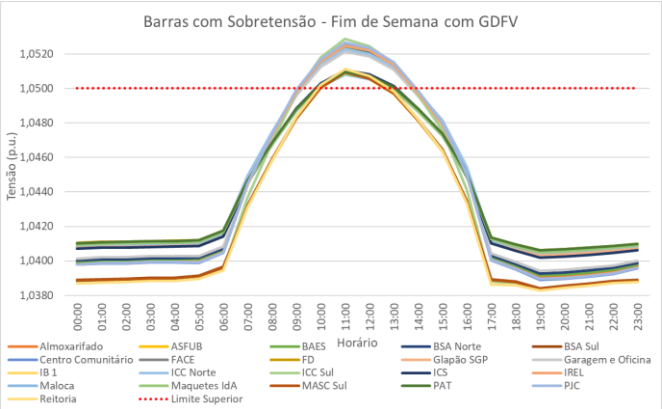


Figura 6. Variação da tensão ao longo do dia para as 22 barras que apresentaram sobretensões durante os finais de semana com GDFV.

O comportamento das tensões em todas as barras às 11:00 horas, horário em que as máximas tensões são atingidas, é mostrado na Figura 7.

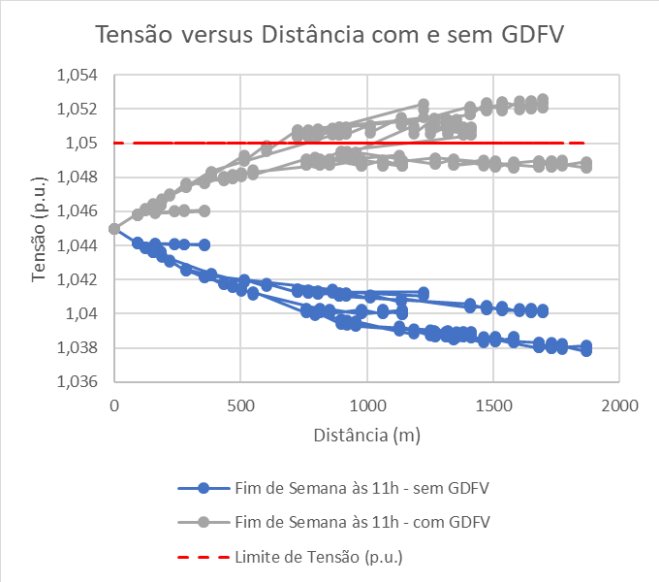


Figura 7. Tensões em todas as barras em função da distância do ramal de entrada para finais de semana com GDFV.

As perdas técnicas, conforme Figura 8, diminuem razoavelmente durante os dias úteis, pois há uma redução considerável no fluxo de potência no sistema de distribuição, uma vez que a energia está sendo fornecida localmente pelos painéis fotovoltaicos. Nesse cenário, a eficiência do sistema de distribuição aumentou de 95,658% para 96,029%. Entretanto, aos finais de semana, o excesso de energia ocasionou um aumento na corrente que flui no sistema de distribuição, aumentando as perdas técnicas de 2.393,97 kWh para 2.404,06 kWh diários, um incremento de 3,35%. Logo, a eficiência diminuiu de 94,674% para 89,556% aos finais de semana.

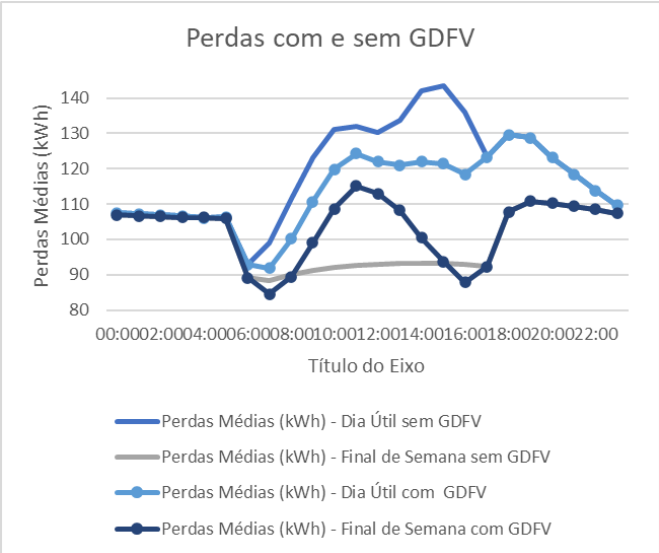


Figura 8. Perdas médias para dias úteis e finais de semana com e sem inserção de GDFV.

Portanto, o aproveitamento do telhado do ICC Norte, ICC Sul, SG 11, CDT, CPD, PAT, PJC, BSA Norte e BSA Sul seria capaz de fornecer 71,28% da energia consumida em um dia útil e 104,52% nos finais de semana. O menor nível de penetração nos dias úteis e o consequente menor distúrbio gerado no fluxo de potência, garante que não haja sobretensões nesses dias. Entretanto, observou-se que as tensões nas barras do ICC Norte e do ICC Sul são muito próximas do valor limite, 1,05 p.u. Para os finais de semana, a potência excedente ocasionou aumentos de tensão acima do limite. Desse modo, medidas de controle, tais como a redução da tensão na subestação ou a mudança na derivação dos enrolamentos (*tap*) dos transformadores são sugeridas para controlar as tensões durante os dias úteis. Para mitigar a sobretensão durante os finais de semana, podem-se utilizar inversores que operem nos quatro quadrantes, permitindo ajustes no balanço da potência ativa e reativa, controlando os níveis de tensão. Em relação ao aumento nas perdas técnicas, pode-se adotar a utilização de acumuladores de energia, tais como baterias, conectados em locais próximos às barras onde a GDFV estiver instalada, diminuindo a corrente que flui pelo circuito e, consequentemente, reduzindo as perdas.

Outra iniciativa para mitigar os problemas identificados é a desconexão de alguns módulos fotovoltaicos durante os horários em que as sobretensões são evidentes. Desse modo, a potência produzida pela GDFV seria momentaneamente reduzida e os impactos ao sistema de distribuição, mitigados. No caso estudado, por exemplo, todos os geradores distribuídos poderiam ser desconectados nos horários em que há sobretensões, das 9:00 às 14:00 horas aos finais de semana, com exceção dos maiores geradores, instalados no ICC. De outro modo, a desconexão dos módulos fotovoltaicos poderia ser otimizada por meio da utilização de um sistema de controle, permitindo a máxima geração de potência possível, levando-se em consideração o posicionamento das barras, sem que houvesse extrapolação nos limites de tensão. Outros cenários estão disponíveis em GREGÓRIO (2017).

5. CONCLUSÃO

Partindo da análise das curvas de carga das unidades consumidoras e da determinação de um modelo do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, foi possível estudar os impactos da inserção de GDFV na rede de distribuição.

Devido à diversidade das instalações da universidade, há várias curvas de carga, pois elas são influenciadas pelo modo como os prédios são utilizados. Notou-se que a curva de carga do medidor geral possui pico de consumo às 15 horas, horário em que há grande utilização dos aparelhos de ar-condicionado. Já aos finais de semana, o pico de consumo é reduzido, e o momento de acionamento da iluminação pública é evidente. O sistema não extrapolou nenhum dos limites técnicos no cenário 1, em que não havia inserção da GDF na Universidade de Brasília, e a maior tensão registrada ocorreu na subestação. O prédio do CESPE, devido à sua localização distante do ramal de entrada, apresentou as menores tensões.

Depois de estudado o desempenho da rede de distribuição em situação normal de operação, considerou-se um cenário mais severo, com os telhados de 8 unidades consumidoras sendo utilizados para a instalação de painéis fotovoltaicos, totalizando 6.171,08 m² de área útil, e irradiação solar 55% acima da média histórica. Assim, a GDFV forneceria 47.003,23 kWh diários ao sistema elétrico da universidade com potência de pico igual a 3.973,40 kW. Como consequência, os níveis de penetração atingiram 71,28% nos dias úteis e 104,52% durante os finais de semana. Devido à GD a potência consumida da rede de distribuição da concessionária sofre uma redução expressiva nos dias úteis, em especial às 11:00, quando ocorre a reversão no fluxo de potência. Nesse horário, a universidade deixa de consumir 3.424,48 kW para fornecer 1.606,52 kW à distribuidora, mas os limites técnicos não foram extrapolados. Já aos finais de semana, devido ao fluxo reverso nos horários de pico da produção da GDFV, apresentando máximo igual a 3.252,33 kW, às 11:00, os limites técnicos foram extrapolados das 9 às 14 horas. Além disso, o fluxo reverso aumentou as perdas técnicas, diminuindo a eficiência do sistema de 94,674% para 89,556%.

Uma medida corretiva simples para o controle das sobretensões é a desconexão de alguns dos geradores distribuídos durante os horários citados. Assim, a redução da GDFV ocorreria em apenas 2,98% do tempo (10 horas a cada semana) o que, provavelmente, não desconfiguraria a viabilidade econômica do projeto e não demandaria investimentos excessivos para controle das tensões, uma segunda alternativa seria a regulação de tensão nos transformadores das subestações.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo encontra-se dentro do âmbito da Chamada ANEEL No 001/2016 "Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", e do Termo de Cooperação Técnica 502/2018, celebrado entre CEB Distribuição S.A. e Fundação Universidade de Brasília, intitulado "Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília Integrada à Rede de Distribuição da CEB". Os autores R. A. Shayani e S. O. Frontim receberam verbas para a realização da pesquisa, por intermédio da FINATEC.

O presente artigo é dedicado à memória do Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, o qual contribuiu diretamente no desenvolvimento do método apresentado e na interpretação e discussão dos resultados.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional - PRODIST. Revisão 8. ed. [S.l.]: [s.n.], v. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, 2016.

CAMARGOS, R. S. C. Análise técnica de impactos e limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em uma rede radial de distribuição - Estudo de caso para o alimentador da embaixada da Itália em Brasília. Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 220. 2013.

FERRAZ, V. R. Análise do impacto da geração eólica em um sistema de distribuição de energia elétrica. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 91. 2015.

GREGORIO, J. V. (2017). Modelagem do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para avaliação da inserção de sistemas fotovoltaicos. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173p.

SEVERINO, M. M. Avaliação Técnico-Econômica de um sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia. Universidade de Brasília. Brasília, p. 335. 2008. (Publicação PPGENE.TD - 027/08).

SHAYANI, R. A. Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição. Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 186. 2010. (Publicação PPGENE.TD - 051/10).

TERRAGIS CONSULTORIA. Refinamento do mapeamento da área potencial de telhados de edificações. TerraGIS Consultoria, Geoprocessamento e Geografia Aplicada Ltda. Rio de Janeiro, p. 67. 2014.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Estrutura. Universidade de Brasília, 2012. Disponivel em: <www.unb.br>. Acesso em: 16 out. 2017.