

## Capacidade de Hospedagem de Sistemas Fotovoltaicos em Redes de Distribuição

Ronnielli Chagas de Oliveira \* Silvia Costa Ferreira \*\*  
Bianca Harumi Diniz Kai \*\*\*

\* *Universidade Federal de Lavras (UFLA), (e-mail:  
ronnielli.oliveira@gmail.com*

\*\* *Universidade Federal de Lavras (UFLA), (e-mail:  
silvia.ferreira@ufla.br)*

\*\*\* *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas  
Gerais (IFMG), (e-mail: bianca261113@gmail.com)*

---

**Abstract:** Photovoltaic systems are increasingly integrated with the low voltage (LV) and medium voltage (MV) distribution network. This situation has already started to produce significant challenges for the distribution system operators due to the energy quality impacts associated with their integration with the network, such as increases in voltage levels, harmonics, intermittence, bidirectional power flow and frequency variations. In this context, Hosting Capacity (HC) studies focused on distribution systems are increasingly relevant. Aiming to contribute with studies related to this area, this work presents a methodology for obtaining HC in distribution systems using the open source software OpenDSS. A study will be carried out for different scenarios of a test distribution system provided by the IEEE, the IEEE European Low Voltage Test Feeder (STDE-IEEE).

**Resumo:** Os sistemas fotovoltaicos estão cada vez mais integrados com a rede elétrica de distribuição de baixa tensão (BT) e média tensão (MT). Esta situação já começou a produzir desafios significativos para os operadores do sistema de distribuição devido aos impactos de qualidade de energia associados à sua integração com a rede, como: elevações nos níveis de tensão, harmônicos, intermitência, fluxo bidirecional de potência e variações de frequência. Neste contexto, os estudos de Capacidade de Hospedagem (CH) voltados para sistemas de distribuição se mostram cada vez mais relevantes. Visando contribuir com estudos relacionados a esta área, este trabalho apresenta estudos de CH e perfis de tensão em sistemas de distribuição utilizando o software de código aberto OpenDSS. Será realizado um estudo para diferentes cenários de um sistema de distribuição teste disponibilizado pelo IEEE, o IEEE European Low Voltage Test Feeder (STDE-IEEE).

*Keywords:* Hosting Capacity; Distributed Generation; Photovoltaic; Distribution Networks; OpenDSS.

*Palavras-chaves:* Capacidade de Hospedagem; Geração Distribuída; Geração Fotovoltaica; Redes de Distribuição; OpenDSS.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo a *International Energy Agency* (IEA), por meio de seu relatório anual, estima-se que a energia solar fotovoltaica será a fonte energética com maior crescimento no mundo e que a partir de 2022 crescerá ano após ano (IEA, 2020). Associados ao grande crescimento da demanda de energia, estão alguns desafios a serem enfrentados em uma perspectiva relacionada à atual matriz energética brasileira e aos grandes gargalos do sistema de transmissão e distribuição.

De forma geral, a inserção de geração distribuída (GD) nas redes de distribuição de energia elétrica auxiliam em diversas características técnicas, no entanto, a partir de determinada concentração, a GD pode causar diversos impactos negativos ao sistema. Como consequência, superar os problemas de qualidade de energia local em redes de

distribuição com altos níveis de penetração de GD pode ser um desafio, a menos que estratégias de planejamento apropriadas sejam aplicadas.

Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para o planejamento apropriado da inserção de sistemas GD são os estudos de Capacidade de Hospedagem (CH). A CH é definida como a capacidade máxima de geração que pode ser conectada a uma determinada rede ou alimentador sem resultar em perda de qualidade e segurança energética em níveis acima do aceitáveis. Os estudos visam ajudar significativamente na manutenção de uma rede elétrica saudável e segura, além de evitar quaisquer danos causados pela violação dos limites térmicos e/ou de tensão estabelecidos pelas normas, durante períodos de alta geração de energia pela GD.

Os estudos relacionados à CH, principalmente em sistemas de distribuição, vêm crescendo significativamente, visando fornecer dados para melhorar o planejamento e evitar problemas de qualidade de energia. Por este motivo, este tema é foco do presente trabalho, que apresenta estudos sobre a Capacidade de Hospedagem de GD em sistemas de distribuição, pautados em normas nacionais e internacionais.

Este artigo apresenta as características e a modelagem do *IEEE European Low Voltage Test Feeder*, aqui chamado de Sistema Teste de Distribuição Europeu do IEEE (STDE-IEEE), utilizando o *software* OpenDSS. O modelo deste sistema no OpenDSS está disponível *online* em IEEE PES AMPS DSAS Working Group (2016). O STDE-IEEE é escolhido como caso base para estudo neste trabalho com o objetivo de explorar os conceitos de modelagem de sistemas de distribuição utilizando o *software* OpenDSS e o estudo da capacidade de hospedagem fotovoltaica em redes de baixa tensão.

## 2. A CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM E AS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA TESTE DE DISTRIBUIÇÃO EUROPEU DO IEEE

O objetivo do STDE-IEEE é fornecer uma referência de estudo para os alimentadores de baixa tensão, comuns na Europa, e seus comportamentos de médio a longo prazo (IEEE PES AMPS DSAS Working Group, 2016).

O sistema é um alimentador radial com frequência de 50 Hz, conectado na média tensão (MT) através de um transformador localizado na subestação. O sistema em média tensão (MT) é modelado como uma fonte de tensão com uma impedância série e é especificada por correntes de curto circuito. O transformador trifásico tem uma potência nominal de 0,8 MVA, tensões nominais de 11/0,416 kV e uma conexão delta/estrela aterrada (DYN0). A resistência e a reatância dos enrolamentos são 0,4% e 4% (usando a potência de base em kVA e a tensão em kV do enrolamento de alta tensão), respectivamente. Os dados do transformador também são fornecidos pelo modelo.

As cargas são modeladas como PQ constantes. Para cada carga, a base é especificada usando sua potência em kW e o fator de potência (FP).

A Figura 1 mostra um modelo representativo da topologia da rede com a localização da subestação e dos nós onde estão alocadas as 55 cargas do modelo STDE-IEEE. Os nós estão enumerados conforme dados fornecidos no modelo.

## 3. RESTRIÇÕES APLICADAS AO STDE-IEEE EM RELAÇÃO AOS DADOS FORNECIDOS AO OPENDSS

Os conceitos de capacidade de hospedagem foram explorados aplicando a metodologia determinística apresentada no artigo Ebe et al. (2017). De acordo com os autores, a avaliação dos piores cenários ajuda a compreender as análises da capacidade máxima de penetração de sistemas de geração solar fotovoltaica em sistemas de distribuição de energia. Para o desenvolvimento de cenários em redes de baixa tensão e de acordo com suas conclusões, Ebe et al. (2017) fornece uma faixa representativa da capacidade de hospedagem da rede, que cobre cenários mais extremos, bem como um cenário moderado.

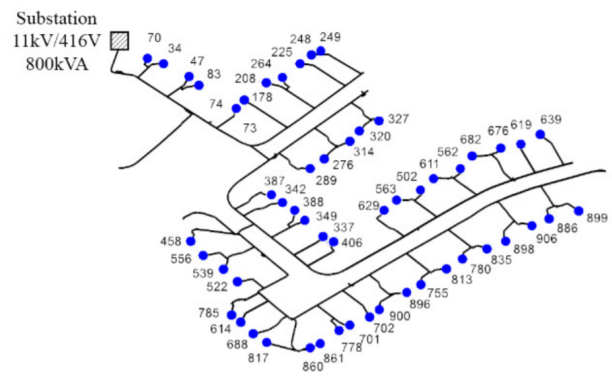


Figura 1. Diagrama do alimentador europeu IEEE.

Neste método os dados de entrada são fixos, conhecidos e são aplicados a um modelo para a análise dos impactos da rede de energia elétrica de baixa tensão. Neste caso a variável independente é a capacidade instalada total de energia solar fotovoltaica em uma determinada área da rede de distribuição em estudo. Métodos determinísticos utilizam a análise de fluxo de potência tradicional como ferramenta de análise (Mulenga et al., 2020).

O modelo completo do STDE-IEEE possui 906 (novecentos e seis) nós, 1 (uma) barra, 55 (cinquenta e cinco) perfis de carga e 1 (um) transformador localizado na subestação, além disso, esse modelo fornece séries temporais para os 55 perfis de cargas do alimentador com uma resolução de um minuto em um período de um dia. Tendo estas características em vista, algumas modificações serão necessárias nos dados originais para compatibilizá-lo com a metodologia determinística adotada. Dentre as modificações estão incluídas:

- (1) A mudança nos perfis de carga, para que representem cargas fixas e não séries temporais. Para tal, selecionou-se a potência consumida no horário do meio dia, em cada um dos 55 perfis de carga. Isso porque, este horário retratou o cenário de maior geração fotovoltaica;
- (2) A inserção de fontes de geração fotovoltaicas modeladas como cargas negativas PQ constante, representando o pico de geração para dada instalação.

Observa-se que no STDE-IEEE os cabos são modelados por suas impedâncias série, sendo desprezados os efeitos capacitivos devido ao tamanho reduzido da linha.

Para caracterização das potências das cargas de acordo com o critério adotado, foi selecionado o valor de demanda de cada uma delas ao meio dia e o fator de potência foi mantido em 0,95 conforme dado original. Cabe ressaltar que foram mantidos os nós, a fase, a tensão base, o fator de potência e a localização das cargas.

## 4. METODOLOGIA PARA ESTUDO DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM

A principal premissa para este estudo é que todo consumidor do STDE-IEEE irá instalar um sistema fotovoltaico com uma determinada capacidade, tornando-se assim um prosumidor e passando a interagir ativamente com o alimentador.

O estudo da capacidade de hospedagem do STDE-IEEE foi realizado de acordo com a metodologia proposta em Ebe et al. (2017), buscando obter uma faixa representativa de capacidade de hospedagem que atenda tanto cenários extremos quanto cenários moderados. De acordo com os autores, foram apresentados métodos determinísticos considerando um aumento do potencial de instalação baseado em regras do Fator de Utilização (FU) de geração fotovoltaica. Os autores definiram o Fator de Utilização como sendo um percentual da capacidade máxima de GD que pode ser instalada naquele nó, com base na área de telhado disponível. A metodologia apresentada para estudo da capacidade de hospedagem por métodos determinísticos, seguem as seguintes regras: (Ebe et al., 2017).

- (1) **Análise da Topologia da Rede:** os nós serão classificados hierarquicamente de acordo com a sua distância (em metros) em relação ao alimentador principal;
- (2) **Incremento do Fator de Utilização:** o fator de utilização é incrementado gradativamente a cada iteração, até que atinja o valor máximo de GD em um dado nó. Caso nenhum limite avaliado tenha sido atingido, segue-se para o próximo nó de acordo com a hierarquia adotada, podendo seguir os seguintes critérios:
  - (a) Aumento da GD para frente (*Forward PV increase*): a instalação dos sistemas de geração começa no nó mais próximo do secundário do transformador principal e o FU aumenta a cada iteração, avançando para os nós mais distantes do transformador principal até que a capacidade máxima seja atingida;
  - (b) Aumento da GD de forma reversa (*Backward PV increase*): a instalação dos sistemas de geração começa no nó mais distante do secundário do transformador principal e o FU aumenta a cada iteração avançando para os nós mais próximos do transformador principal até que a capacidade máxima seja atingida;
  - (c) Aumento da GD em igualdade (*Even PV increase*): o mesmo FU é definido para todas as potências de GD. Este é aumentado gradativamente e em igualdade, para todos os nós.
- (3) **Cálculo do Fluxo de Potência:** o fluxo de potência do sistema é recalculado para cada iteração a medida que a quantidade potencial de GD aumenta;
- (4) **Teste de Violação dos Limites da Rede:** os resultados do fluxo de potência são verificados a cada iteração até que o limite de operação definido seja atingido.

Na etapa de análise da topologia do STDE-IEEE, os nós foram classificados em função de sua distância em relação ao alimentador principal, listados no modelo. Já para execução da etapa do incremento do Fator de Utilização, foi necessário primeiramente definir a capacidade máxima de instalação geração fotovoltaica ( $GD_{max}$ ) de cada nó. Neste caso, não foi possível utilizar a mesma metodologia empregada por Ebe et al. (2017), pois não haviam dados sobre a área de telhado disponível para cada instalação de GD. Levando isto em consideração, foi definida uma equação para cálculo da potência de geração solar fotovoltaica, com capacidade de geração igual ao consumo mensal das cargas de cada nó em questão.

Como o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos não é o foco deste trabalho, foram obtidos em PVGIS (2016)

os dados de irradiância da cidade europeia de Turim, na Itália, como referência para o cálculo. Desta forma, a potência nominal da geração para cada nó foi calculada conforme CRESESB (2014):

$$GD_{inst} = \frac{C_{dia}}{HSP * PR} \quad (1)$$

onde,  $GD_{inst}$  é o potencial de geração solar fotovoltaica dimensionado para um dado nó ( $n$ );  $C_{dia}$  é o consumo em kWh diário da carga conectada em um dado nó ( $n$ ), HSP é a quantidade de horas de sol pleno diário e PR é o fator que representa perdas como sujeira, degradação dos módulos, perdas nos cabos, dentre outros. Para efeito de cálculo, tais perdas serão desconsideradas. Devido a alta variação de irradiação solar no território europeu, optou-se por escolher um HSP mais baixo, equivalente a 4, que resultaria em um cenário com maiores picos de geração em menor intervalo de tempo. Além disso, o autor possui experiência prévia em projetos de sistema de geração fotovoltaica na cidade de Turim, Itália (Sunsllice, 2014). As potências de geração solar fotovoltaica foram calculadas para cada nó a partir da equação 1 e inseridas no modelo.

Em seguida, o fluxo de potência foi calculado e os níveis de tensão avaliados. O índice de desempenho principal utilizado neste trabalho, que irá limitar a capacidade de hospedagem, é a tensão. Caso todos níveis de tensão estejam dentro dos limites preestabelecidos, a quantidade de geração fotovoltaica no STDE-IEEE será incrementada. Quando qualquer um dos níveis cruzar o limite máximo de tensão, então a potência total instalada será a capacidade de hospedagem daquele sistema.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados nesta sessão os resultados dos estudos de fluxo de potência obtidos após aplicação da metodologia descrita anteriormente. Lembrando que a potência de cada geração foi calculada através da equação 1 e foi definida como  $GD_{inst}$ . Serão avaliados quatro cenários distintos.

De acordo com Nousedilil et al. (2017), a norma Europeia EN 50160, permite 10% de variação de tensão, ou seja, os valores de tensão podem variar entre 0,9 e 1,1 pu. O STDE-IEEE apresenta tensão de linha 416 V e de fase igual a 240 V. Aplicando a referência de tensão de 240 V, os níveis de tensão que ficam dentro da faixa definida na EN 50160 devem estar entre **216 V** e **264 V**. Para efeito de estudo da capacidade de hospedagem, quando o somatório das GD's instaladas elevar o nível de tensão a 1,1 p.u, ou 264 V, esta potência será a máxima potência que definirá a capacidade de hospedagem. Os resultados para cada cenário serão discutidos e analisados a seguir. Serão apresentados os perfis de tensão para cada nó do sistema, bem como os principais valores obtidos para a capacidade de hospedagem do STDE-IEEE.

### 5.1 Cenário 1 - Incremento da GD de forma reversa, com potência de geração igual à $GD_{inst}$

Para este cenário, a capacidade de hospedagem é avaliada utilizando um método de incremento baseado no potencial

de instalação de GD obtido pela equação 1. O incremento de potência ocorre no sentido dos nós mais distantes para os nós mais próximos do secundário do transformador de alimentação. Conforme descrito na metodologia, o fluxo de potência é calculado para cada incremento de GD e os níveis de tensão avaliados. O índice de desempenho principal utilizado neste trabalho, que irá limitar a capacidade de hospedagem, é a tensão.

O estudo de capacidade de hospedagem foi efetuado inserindo cada GD no mesmo nó em que cada carga está conectada. A cada incremento, o total de GD foi atualizado e os níveis de tensão do circuito, coletados. A Figura 2 mostra os níveis de tensão em p.u. para cada acúmulo de GD. Os valores encontrados podem ser de apenas um trecho, do ponto de conexão ou de vários pontos em comum. Entretanto, eles representam o maior nível de tensão medido no circuito ao passo em que a GD é incrementada.

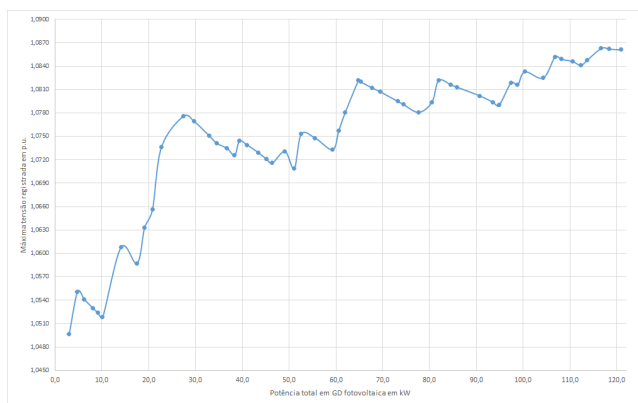


Figura 2. Perfil de tensões do estudo da CH - Cenário 1

O gráfico apresentado mostra o perfil das tensões após o incremento de cada GD. É importante ressaltar que para a metodologia proposta e para as potências de GD adotadas, os limites de tensão não foram violados, considerando que em todos os 55 nós foram inseridas as GD's correspondentes. A Tabela 1 mostra os resultados extraídos do cálculo do fluxo de potência por meio do *software* OpenDSS.

Tabela 1. Resultados do estudo de capacidade de hospedagem para o cenário 1

Descrição	Resultado
Potencial de GD máximo (kW)	120,92
Capacidade de hospedagem (kW)	-
Máxima tensão (p.u.)	1,0861
Mínima tensão (p.u.)	1,0496
Total de potência ativa (kW)	-82,06
Total de potência reativa (kVar)	13,99
Total de perdas ativas (kW)	1,72 (-2,09%)
Total de perdas reativas (kVar)	0,6 (4,28%)

A Tabela 1 mostra que o total de potência ativa é negativa. Este resultado significa que a potência está sendo injetada na rede e retornando à fonte. Além disso, reforça algumas características das instalações com geração fotovoltaica, onde os picos de geração nem sempre coincidem com os picos de consumo, e ainda, os sistemas são dimensionados para gerar a energia mínima suficiente para atender o consumo diário total do usuário.

Por fim, os resultados indicam que a máxima tensão do STDE-IEEE para estas condições é de 1,0861 p.u. e ocorre no nó 899, mesmo ponto de conexão com a carga LOAD53. Este ponto está situado a 289 m do secundário do transformador e alimentado pela Fase B. Para este cenário não houve violação dos limites de tensão, portanto, não houve capacidade de hospedagem.

A Figura 3 apresenta o modelo espacial do STDE-IEEE plotado no OpenDSS, bem como a distribuição do fluxo de potência do alimentador com a inserção de todas as GD's no sistema. O sistema é representado com linhas em escala de potência, ou seja, as linhas mais grossas representam trechos mais carregados. A escala é equivalente a um fluxo de potência de 20 kW. Como já esperado, a saída do transformador principal (alimentador) apresenta fluxo reverso de potência.

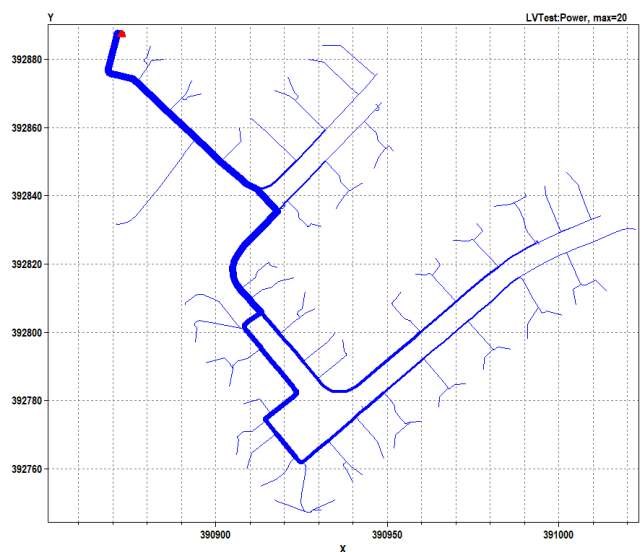


Figura 3. Fluxo de potência do estudo da CH - Cenário 1.

A Figura 4 apresenta o perfil das tensões em função da distância.

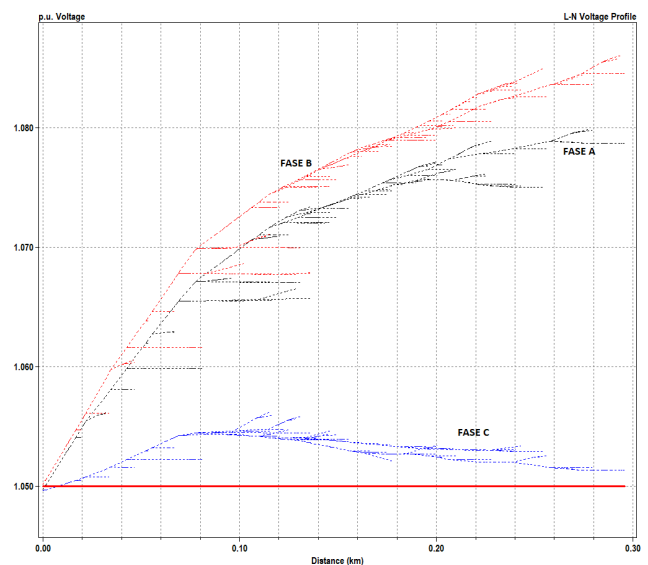


Figura 4. Perfil das tensões com GD - Cenário 1.

Nota-se pela Figura 4 que a Fase B (vermelha) é a mais carregada, portanto, é a que possui maior fluxo de potência reverso. Para este cenário, não houve potência de GD que violasse o valor máximo da tensão em 1,1 p.u.

Neste sistema foram inseridos 55 geradores com potência de geração suficiente para atender à demanda de consumo. A potência total em geração foi de 120,92 kW.

### 5.2 Cenário 2 - Incremento da GD de forma reversa, com potência de geração duas vezes superior à $GD_{inst}$ ( $2xGD_{inst}$ )

Para este cenário, a capacidade de hospedagem é avaliada utilizando um método de incremento com potência base igual a duas vezes cada GD obtida pela equação 1. O incremento de potência ocorre no sentido dos nós mais distantes para os nós mais próximos do secundário do transformador de alimentação.

A Figura 5 mostra os níveis de tensão em p.u. para cada acúmulo de GD, até que o limite de 1,1 p.u. fosse atingido. Os valores representam a máxima tensão ocorrida no sistema STDE-IEEE à medida que as cargas foram aumentando.

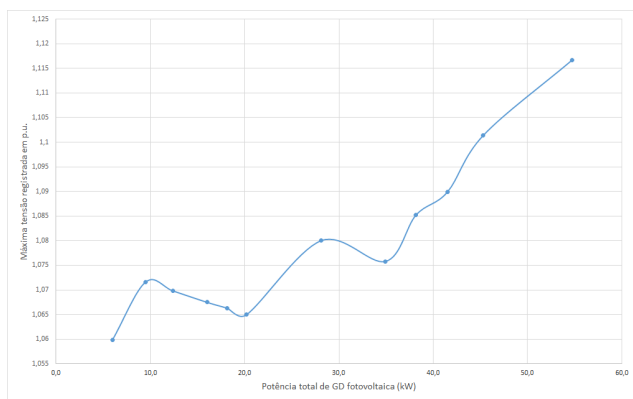


Figura 5. Perfil de tensões do estudo da CH - Cenário 2.

Equivalente ao cenário 1, o gráfico apresentado mostra o perfil das tensões após o incremento de cada GD. Neste caso, para a metodologia proposta e para as potências de GD adotadas, os limites de tensão foram violados a partir da inserção da GD de nº 12, considerando os 55 nós possíveis. A Tabela 2 mostra esses resultados, extraídos do cálculo do fluxo de potência por meio do *software* OpenDSS. Cabe ressaltar que os resultados apresentados a seguir consideram a potência total de GD que levou o sistema a violar a máxima tensão estabelecida.

A Tabela 2 mostra que o total de potência ativa é negativa. Este resultado significa que a potência está sendo injetada na rede e retornando à fonte. As perdas também são provenientes da injeção de potência na rede e subiram de 2,1% para 12,7%, em relação ao cenário anterior.

Além disso, os resultados indicam que a máxima tensão do STDE-IEEE para estas condições é de 1,1167 p.u. e ocorre no nó 899, mesmo ponto de conexão com a carga LOAD53. Este ponto está situado a 289 m do secundário do transformador e alimentado pela Fase B.

Tabela 2. Resultados do estudo de capacidade de hospedagem para o cenário 3

Descrição	Resultado
Potencial de GD máximo (kW)	241,80
Capacidade de hospedagem (kW)	54,70
Máxima tensão (p.u.)	1,1167
Mínima tensão (p.u.)	1,0224
Total de potência ativa (kW)	-17,12
Total de potência reativa (kVar)	13,37
Total de perdas ativas (kW)	2,17 (-12,71%)
Total de perdas reativas (kVar)	0,34 (2,54%)

A Figura 6 apresenta o modelo espacial do STDE-IEEE plotado no OpenDSS, bem como a distribuição do fluxo de potência do alimentador. Do mesmo modo, o sistema é representado com linhas em escala de potência, sendo as linhas mais grossas os trechos mais carregados. A escala é equivalente a um fluxo de potência de 20 kW. Como já esperado, a saída do transformador principal (alimentador) apresenta fluxo reverso de potência.

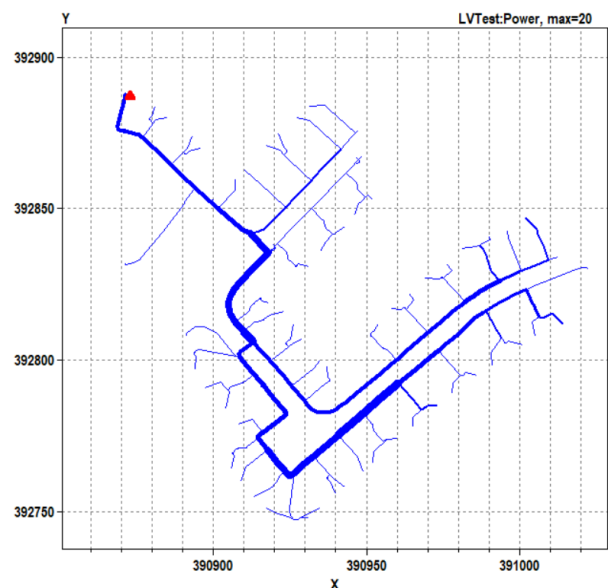


Figura 6. Fluxo de potência do estudo da CH - Cenário 2.

A Figura 7 apresenta o perfil das tensões em função da distância. Onde, a Fase B (vermelha) novamente é a mais carregada, portanto, é a que possui maior fluxo de potência reverso. As demais fases se mostram com pouco carregamento, uma vez que, na metodologia proposta para este cenário, a GD deve ser inserida no ponto mais distante do secundário do transformador. Coincidentemente, os pontos mais distantes são conectados à Fase B.

Como conclusão para este cenário, pode-se dizer que houve potência de GD que violasse o valor máximo da tensão em 1,1 p.u. Foram inseridos no sistema 12 geradores, cuja potência total em geração foi de 54,7 kW.



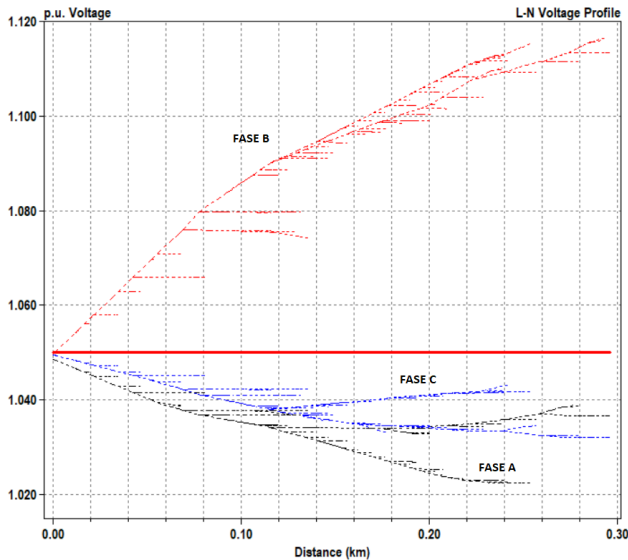


Figura 7. Perfil das tensões com GD - Cenário 2.

### 5.3 Cenário 3 - Incremento da GD para frente, com potência de geração duas vezes superior à $GD_{inst}$ ( $2xGD_{inst}$ )

Conforme cenário 1, este cenário avalia a capacidade de hospedagem utilizando o valor de  $GD_{inst}$  duas vezes maior que o valor calculado inicialmente. Já o incremento de potência ocorre no sentido dos nós mais próximos para os nós mais distantes do secundário do transformador de alimentação.

O fluxo de potência é calculado para cada incremento de GD e os níveis de tensão avaliados. O índice de desempenho principal utilizado, que irá limitar a capacidade de hospedagem, é a tensão. A Figura 8 mostra os níveis de tensão em p.u. para cada acúmulo de GD, até que o limite de 1,1 p.u. fosse atingido. Os valores de tensão apresentados representam a máxima tensão obtida no sistema, que pode ocorrer em um trecho, do ponto de conexão ou de vários pontos em comum.

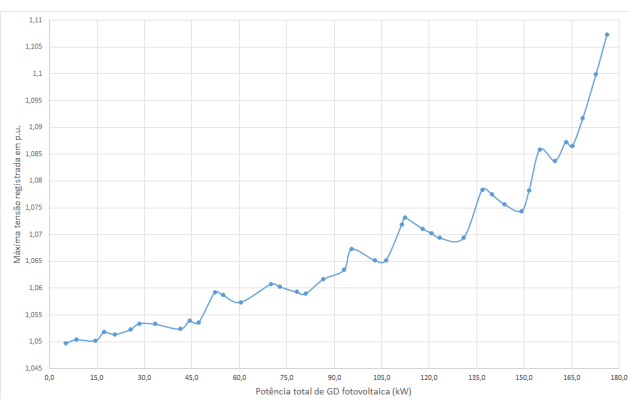


Figura 8. Perfil de tensões do estudo da CH - Cenário 3.

O gráfico apresentado mostra o perfil das tensões após o incremento de cada GD. Neste cenário, os limites de tensão foram violados a partir da inserção da GD de nº 41, considerando os 55 nós possíveis. A Tabela 3 mostra esses resultados, extraídos do cálculo do fluxo de potência por meio do *software* OpenDSS. É importante ressaltar que os

resultados apresentados a seguir, levam em consideração a potência total de GD que levou o sistema a violar a máxima tensão estabelecida.

Tabela 3. Resultados do estudo de capacidade de hospedagem para o cenário 3

Descrição	Resultado
Potencial de GD máximo (kW)	241,8
Capacidade de hospedagem (kW)	176,2
Máxima tensão (p.u.)	1,1073
Mínima tensão (p.u.)	1,0499
Total de potência ativa (kW)	-139,13
Total de potência reativa (kVar)	15,25
Total de perdas ativas (kW)	4,09 (-2,95%)
Total de perdas reativas (kVar)	1,55 (10,16%)

A Tabela 3 mostra que o total de potência ativa no alimentador é negativa e igual a -139,13 kW. Este resultado significa que a potência está sendo injetada na rede e retornando à fonte. As perdas também são provenientes da injeção de potência na rede.

Os resultados indicam que a máxima tensão do STDE-IEEE para estas condições é de 1,1073 p.u. e ocorre no nó 502, mesmo ponto de conexão com a carga LOAD25. Este ponto está situado a 206 m do secundário do transformador e alimentado pela Fase A. No circuito após a inserção das GD's, a Fase A é a que aparece mais carregada.

Do mesmo modo, a Figura 9 apresenta o modelo espacial do STDE-IEE, bem como a distribuição do fluxo de potência do alimentador, onde a saída do transformador principal apresenta fluxo reverso de potência.

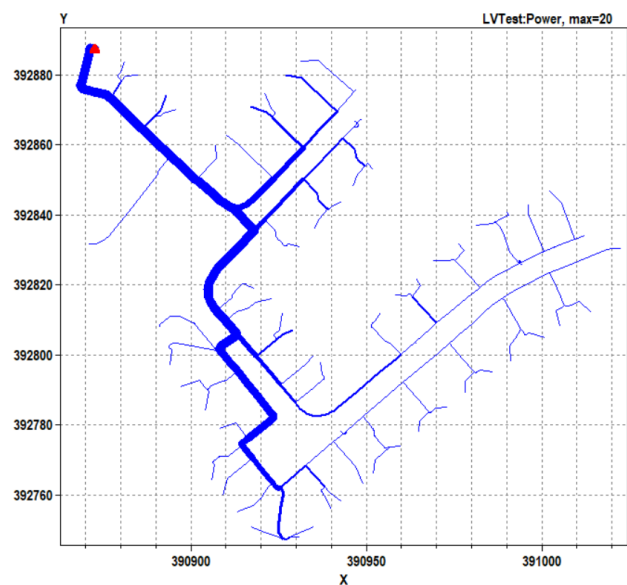


Figura 9. Fluxo de potência do estudo da CH - Cenário 3.

A Figura 10 apresenta o perfil das tensões em função da distância. Nota-se que a Fase A (preta) é a mais carregada, portanto, é a que possui maior fluxo de potência reverso, resultando nos maiores níveis de tensão em função da distância. As demais fases se mostram com menor carregamento.

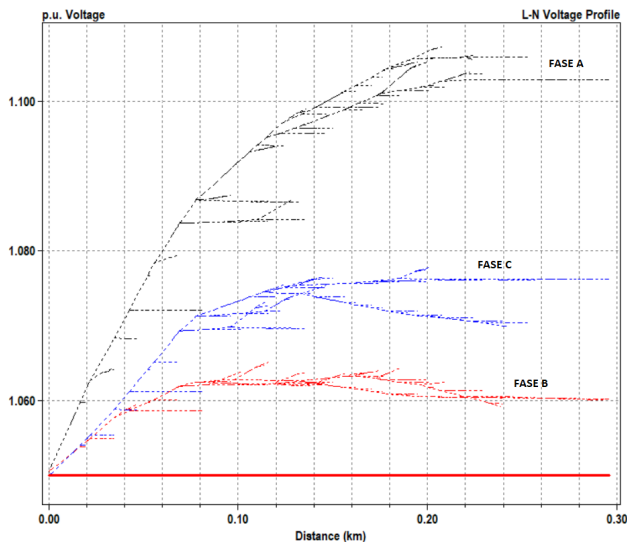


Figura 10. Perfil das tensões com GD - Cenário 3.

Por fim, conclui-se que para este cenário, houve potência de GD que violasse o valor máximo da tensão em 1,1 p.u. Foram inseridos no sistema 41 geradores, cuja potência total em geração foi de 176,2 kW, portanto, esta é a capacidade de hospedagem para este cenário.

#### 5.4 Cenário 4 - Incremento da GD em igualdade

EPE (2017) apresenta o estudo do crescimento da demanda de consumo de energia entre os anos de 2016 e 2027. Este estudo levou em consideração as indicações do acompanhamento e da análise do mercado, bem como o cenário macroeconômico para o horizonte. Atentaremos aos resultados deste estudo para a classe residencial, por estar melhor inserido no contexto dos perfis de carga do STDE-IEEE.

A classe residencial apresenta um crescimento, para o período descrito, de 3,9% ao ano. Este percentual é composto tanto pelo crescimento do consumo anual dos consumidores atuais (1,4%), quanto pela entrada de novos consumidores (2,5%). Com isso, para este cenário a capacidade de hospedagem é avaliada utilizando o método de incremento baseado na igualdade, a partir dos dados do cenário 1. Será considerada projeção do aumento da geração igual à projeção do aumento do consumo para os próximos dez anos. Desta forma, a potência de cada GD presente no estudo de CH do cenário 1 será incrementada em 40%.

A avaliação da capacidade de hospedagem foi efetuada adaptando as GD's presentes no estudo do cenário 1. É importante ressaltar que para a metodologia proposta e para as potências de GD adotadas, os limites de tensão foram violados, considerando que em todos os 55 nós foram inseridas as GD's correspondentes. A Tabela 4 mostra esses resultados, extraídos do cálculo do fluxo de potência por meio do *software* OpenDSS.

A Tabela 4 mostra que o total de potência ativa é negativa. Este resultado significa que 133,12 kW de potência estão sendo injetados na rede e retornando à fonte. As perdas também são provenientes da injeção de potência na rede,

Tabela 4. Resultados do estudo de CH para o cenário 4 - Incremento de 40% na GD

Descrição	Resultado
Potencial de GD máximo (kW)	169,3
Capacidade de hospedagem (kW)	160,6
Máxima tensão (p.u.)	1,1064
Mínima tensão (p.u.)	1,0499
Total de potência ativa (kW)	-133,12
Total de potência reativa (kVar)	15,23
Total de perdas ativas (kW)	4,29 (-3,23%)
Total de perdas reativas (kVar)	1,54 (10,11%)

e representam um pequeno aumento em relação ao cenário 1, subindo para 3,2%.

Os resultados indicam que a máxima tensão do STDE-IEEE para estas condições é de 1,1064 p.u. e ocorre no mesmo ponto de conexão com as cargas LOAD50, LOAD52 e LOAD53. Estes pontos estão situados a 287 m, 275 m e 289 m do secundário do transformador, respectivamente. LOAD50 e LOAD53 estão conectados à Fase B e LOAD52, conectado à Fase A.

A Figura 11 apresenta o modelo espacial do STDE-IEE plotado no OpenDSS, bem como a distribuição do fluxo de potência do alimentador, com a inserção de todas as GD's no sistema. Como já esperado, a saída do transformador principal (alimentador) apresenta fluxo reverso de potência.

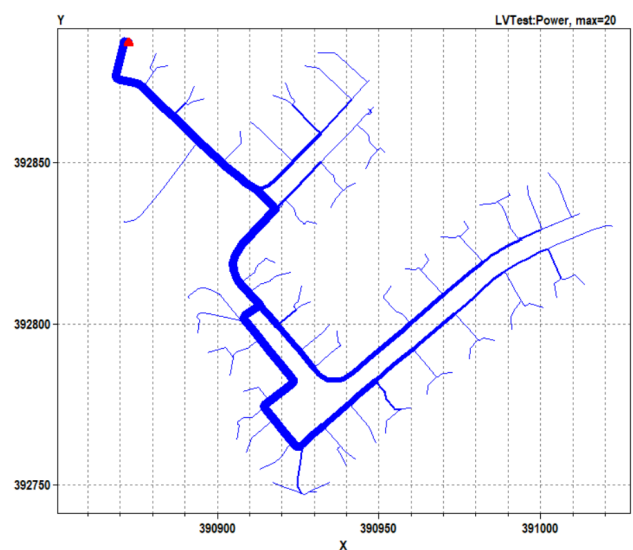


Figura 11. Fluxo de potência do estudo da CH - Cenário 4.

A Figura 12 apresenta o perfil das tensões em função da distância. Nota-se pela figura que a Fase B (vermelha) é a mais carregada, portanto, é a que possui maior fluxo de potência reversa.

Concluindo este cenário, pode-se afirmar que houve potência de GD que violasse o valor máximo da tensão em 1,1 p.u. Foram inseridos no sistema 55 geradores com potência de geração suficiente para atender à demanda acrescida de 40% em relação ao cenário 2. A potência total em geração foi de 169,30 kW, no entanto, a máxima tensão foi de

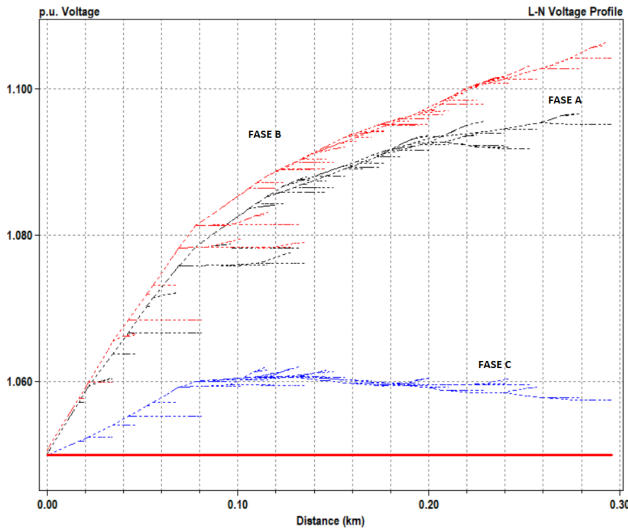


Figura 12. Perfil das tensões com GD - Cenário 4.

1,1064 p.u. A capacidade de hospedagem foi obtida através da retirada das GD's que provocaram a elevação da tensão acima de 1,1 p.u. Desta forma a CH máxima foi de 160,6 kW.

A Tabela 5 apresenta um resumo de todos os resultados.

Tabela 5. Resumo do estudo das CH

Cenário	GD <sub>inst</sub> (kW)	CH (kW)	Máx. Tensão (p.u.)	Fase(s)
1	-	-	1,0497	C
2	120,92	-	1,0861	B
3	241,80	54,70	1,1167	B
4	241,80	176,20	1,1073	A
5	169,30	160,60	1,1064	A/B

## 6. CONCLUSÃO

As simulações realizadas no sistema europeu STDE-IEEE, apresentado neste trabalho, levam em consideração um cenário realista, com perfis de cargas e de consumo muito similares ao de um bairro residencial. Além disso, a adoção de metodologias de outros trabalhos como o de Ebe et al. (2017), adaptadas aos cenários deste sistema, proporcionou a aplicação de uma metodologia mais próxima e exequível dentro de um contexto realista.

O sistema STDE-IEEE possui um total de 55 consumidores, cujos perfis de consumo são similares aos do estudo apresentado pela ANEEL (2017). A capacidade de hospedagem foi elaborada passo a passo de modo com que a cada kW de GD inserida, os níveis de tensão dos 955 nós fossem analisados. Além disso, a GD conectada a cada consumidor foi calculada de tal forma que a geração satisfaça o seu próprio consumo de energia elétrica mensal.

Os cenários apresentados trazem importantes conclusões sobre a máxima capacidade de hospedagem para este sistema.

A análise dos níveis de tensão nos mostra que houve violação dos níveis previamente estabelecidos. O nó ao qual está conectada a carga LOAD53 aparece em três dos cinco cenários com GD, ou seja, este ponto do circuito é o mais

susceptível às variações de tensão provocadas pela inserção da GD. Ressalta-se que estes resultados são provenientes de uma metodologia que aborda uma hora específica do dia (meio dia) e também considera a geração máxima através dos sistemas fotovoltaicos instalados. Para cada cenário, uma potência total de GD foi instalada, conforme mostra a Tabela 5. Especificamente para os cenários 3 e 4, ao inverter o sentido de alocação das GD, mantendo-se a mesma potência, a CH saltou de 54,70 kW para 176,20 kW. Para os cenários 1, 2 e 5 não houve violação dos limites de tensão, portanto, não houve capacidade de hospedagem.

Shayani and de Oliveira (2011), determina em seu estudo que quando a tensão na subestação é ajustada para um valor máximo 1,05 pu, o critério de aumento de tensão tende a ser o mais restritivo na limitação da quantidade de GD que pode ser instalada. Ao reduzir a tensão na subestação para um valor à metade entre os limites superior e inferior da tensão adequada (neste caso 1,00 pu), o aumento da tensão não é mais um fator limitante e o limite é então imposto pela capacidade de condução dos condutores.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL (2017). *Nota Técnica Nº 0056/2017 - SRD/ANEEL*. 1 edition. URL [http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica\\_0056\\_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9).
- CRESESB, C.D. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 1 edition.
- Ebe, F., Ildbi, B., Morris, J., Heilscher, G., and Meier, F. (2017). Evaluation of pv hosting capacity of distribuion grids considering a solar roof potential analysis — comparison of different algorithms. 1–6.
- EPE (2017). *Projeção da demanda de energia elétrica 2017-2026*. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. URL <https://epe.gov.br>.
- IEA, I.E.A. (2020). *Energy technology perspectives 2020*. 400. URL <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- IEEE PES AMPS DSAS Working Group, T.F. (2016). European low voltage test feeder. In *IEEE, PES Test Feeder*. URL <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>.
- Mulenga, E., Bollen, M., and Etherden, N. (2020). A review of hosting capacity quantification methods for photovoltaics in low-voltage distribution grids. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 115, 105445.
- Nousdilis, A., Chrysochos, A., Papagiannis, G., and Christoforidis, G. (2017). The impact of photovoltaic self-consumption rate on voltage levels in lv distribution grids. 650–655. doi:10.1109/CPE.2017.7915249.
- PVGIS (2016). *Photovoltaic Geographical Information System*. URL <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>.
- Shayani, R.A. and de Oliveira, M.A.G. (2011). Photovoltaic generation penetration limits in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3), 1625–1631. doi:10.1109/TPWRS.2010.2077656.
- Sunslice (2014). *Vertical homes. designing and engineering solar townhouses for a dense green city*. Politécnico de Turim. URL <https://core.ac.uk/download/pdf/234901986.pdf>.