

ESTUDO DE MÁXIMA PENETRAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM UM ALIMENTADOR PRIMÁRIO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

KAÊ AUGUSTO, JULIO A. D. MASSIGNAN, ROSVANDO M. GONZAGA JR, JOÃO B. A. LONDON JR.

Laboratório de Análise Computacional de Sistemas Elétricos de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Parque Arnold Schmidt, São Carlos, SP
E-mails: *kaeaugusto@gmail.com*,
julio.massignan@usp.br, *rosvandojunior@usp.br*, *jbalj@sc.usp.br*

Abstract— With the growing number of micro and mini-generation, several electrical studies become necessary in order to guarantee the standard power quality and operational security of the electrical networks. Among these studies, it is very important for the utilities the knowledge of the maximum capacity of distributed generators that the network is able to accommodate without causing physical and technical damages to the network equipment and without any loss in the power quality delivered to final consumers, known as the Hosting Capacity. This paper has the goal to verify the Hosting Capacity of a real distribution feeder, from CPFL Paulista, located in the city of Ribeirão Preto – São Paulo, by calculating the power flow in different predefined scenarios. This work also investigates the network parameters that compose the Hosting Capacity calculation as the limits for the insertion of distributed generators and the influence of network and distributed generation characteristics in this calculation, aiming to improve the current practice of distributed generation penetration assessment for the utilities. In order to perform the study the OpenDSS power flow calculation software was used in parallel with Matlab software.

Keywords— Distribution Systems, Distributed Generation, Distribution Planning, Photovoltaic Systems, Hosting Capacity, Power Flow, OpenDSS.

Resumo – Diante do crescente número de micro e minigeração, diversos estudos elétricos se tornam necessários para garantir os padrões de qualidade e segurança operacional da rede elétrica. Dentre estes estudos, é de grande interesse, para as distribuidoras, o conhecimento da capacidade máxima de geradores distribuídos que a rede pode acomodar sem que ocorram danos físicos e técnicos nos equipamentos presentes na rede e sem que haja prejuízo na qualidade da energia entregue ao consumidor, conhecido como “*Hosting Capacity*”. Este artigo tem como objetivo verificar qual o “*Hosting Capacity*” de um alimentador de distribuição de energia elétrica real, da distribuidora CPFL Paulista, localizado na cidade de Ribeirão Preto – São Paulo, através do cálculo do fluxo de potência de diferentes cenários pré-definidos. O presente trabalho também investiga os parâmetros da rede que compõem o cálculo de *Hosting Capacity*, como limite de inserção de geradores distribuídos e a influência de características dos geradores distribuídos e da rede neste cálculo, visando assim melhorar as metodologias existentes de avaliação de penetração de geração distribuída para as distribuidoras de energia elétrica. Para a realização do estudo foi utilizado o software de cálculo de fluxo de potência trifásico OpenDSS em paralelo com o software Matlab.

Palavras-chave - Sistemas de Distribuição, Geração Distribuída, Planejamento da Distribuição, Sistemas Fotovoltaicos, Hosting Capacity, Fluxo de Potência, OpenDSS.

1. Introdução

Diversos paradigmas dos sistemas elétricos de potência vêm sendo revisados nas últimas décadas, devido principalmente ao crescente interesse em uma rede elétrica mais flexível, confiável e sustentável. Dentro deste contexto a geração distribuída (GD), em especial proveniente de fontes renováveis, tem se destacado no âmbito mundial, vislumbrando-se uma presença cada vez maior na matriz energética de diversos países. No Brasil, recentes normas regulatórias vêm impulsionando os consumidores dos sistemas de distribuição (SD) a gerar sua própria energia. (ANEEL 2016). Neste cenário, destacam-se os geradores fotovoltaicos principalmente devido a sua facilidade de instalação, a baixa necessidade de manutenção e a constante redução nos custos de investimento. Segundo a Nota Técnica nº 0056/2017 – ANEEL – até maio de 2017 já havia mais de 10 mil geradores fotovoltaicos instalados no país, totalizando uma potência gerada em torno de 114,7 MW. Além disto, projeções indicam que o número de mi-

crogeradores possa chegar a mais de 880 mil até 2024 (ANEEL, 2017). A microgeração distribuída é caracterizada por possuir uma potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW). Valores acima deste e menores que 3 megawatts (MW), para fontes hídricas e, ou 5 MW para demais fontes, é caracterizado como minigeração distribuída (ANEEL, 2016).

Desta forma é imprescindível às distribuidoras de energia avaliar os impactos positivos e negativos que a penetração GD possa causar na rede elétrica. Dentre as vantagens da GD aos SD, pode-se citar: melhoria do perfil de tensão; redução de demanda de energia durante os horários de pico; postergação de expansão das redes de distribuição; diminuição de perdas nas linhas de transmissão e consequentemente aumento da eficiência energética; entre outras (Walling; Saint; Dugan; Burke and Kojovic, 2008). Entretanto, o aumento maciço de geradores distribuídos propicia novos desafios e uma maior complexidade na operação das redes de distribuição, principalmente pelo excedente de energia elétrica que é injetado na rede. Desta forma, para evitar danos técnicos aos equipamentos da rede de distribuição e prejuízos à qualidade da energia elétrica, é importante estudar

quais os impactos para o sistema elétrico causado pelo alto número de inserção de geradores distribuídos (Raylander, 2016). Dentre estes estudos, destaca-se o levantamento de um indicador para as redes de distribuição que permita às distribuidoras de energia avaliar objetivamente a relação entre impacto da GD e quantidade de geradores instalados, chamado *Hosting Capacity*. O *Hosting Capacity* é definido como a capacidade máxima de GD que o alimentador de distribuição pode acomodar, sem impactar nos níveis de tensão, na proteção, na qualidade da energia, no funcionamento dos equipamentos e sem que haja necessidade de realizar alterações na rede (Ding; Mather and Gotseff, 2016).

Na literatura já existem diferentes metodologias e artigos que buscam avaliar o *Hosting Capacity* de um alimentador de distribuição. Na sua maioria avaliam quais os impactos relacionados com os níveis de tensão através de uma abordagem estocástica, baseada no método de Monte Carlo, levando em consideração as incertezas da localização de inserção dos sistemas fotovoltaicos, o fator de potência do inversor e a presença de reguladores de tensão na rede (Ding, F.; Mather, B. and Gotseff, P., 2016). Além dos modelos estocásticos, existem estudos que consideram um modelo determinístico de análise, a partir de cenários com diferentes localizações e níveis de penetração dos geradores distribuídos. Tais estudos caracterizam uma relação entre a distância da subestação e a localização da GD (Molina, V. Q.; Romero, M. and Pavas, A., 2017). Outros autores procuraram desenvolver métodos determinísticos próprios de avaliação do *Hosting Capacity*, e compará-los com métodos já conhecidos na literatura (Ebe, F.; Idlbi, B.; Morris, J.; Heilscher, G. and Meier, F., 2017). Em (Santos, I. N. et al., 2015) os autores propõem uma metodologia para determinar a capacidade de hospedagem em relação às distorções harmônicas. O método inclui efeitos de agregação de correntes harmônicas, a influência dos limites de distorção harmônica e o perfil de geração harmônica. Já em (Kikuchi, S. and Machida, M., 2010) trata-se da enorme penetração de sistemas fotovoltaicos em alimentadores cuja capacidade de instalação de GD é maior do que a carga existente. Três tipos de contramedidas são adotados, melhoria de tamanhos dos condutores, tensão parcial de aumento e inversores inteligentes, suas combinações foram analisadas com os critérios a instalação de GD para determinar a capacidade de hospedagem. Como apresentado em (Gomes, C. A. M. and Ferreira, H. P., 2018) criou-se um método para avaliar o *Hosting Capacity* com GD em uma rede de distribuição pré-estabelecida, que cumprem as restrições técnicas, como os limites de tensão de barramento, limites de transformadores de potência, limites de fluxo de potência na rede e as perdas do sistema de potência. Por se tratar de um problema de otimização o *Hosting Capacity* é obtido usando a técnica do algoritmo genético (AG). Em estudos mais completos, os autores já procuram avaliar qual o *Hosting Capacity* de um alimentador através dos

impactos relacionados à tensão, temperatura e proteção do alimentador, frente a diferentes localidades de inserção de GD (Raylander, M.; Smith, J. and Sunderman W., 2016).

Este artigo apresenta um estudo a respeito dos principais indicadores e parâmetros de desempenho que impactam a penetração de GD em alimentadores de distribuição do ponto de vista de análise estática. Através de uma metodologia determinística baseada no cálculo de fluxo de potência trifásico, obtêm-se a máxima penetração de GD, no caso deste trabalho painéis fotovoltaicos, capaz de ser acomodada em um alimentador real de uma distribuidora de energia elétrica brasileira. A contribuição deste trabalho consiste em abordar parâmetros técnicos importantes na análise de penetração de GD nos SD, além de estender os critérios usualmente utilizados no cálculo do *Hosting Capacity*. Desta forma, as análises apresentadas neste estudo visam melhorar as metodologias existentes de avaliação de penetração de GD tanto na literatura quanto na prática, entre as distribuidoras de energia elétrica.

2. Avaliação do Impacto da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição

2.1. Impacto da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição

O aumento maciço dos geradores distribuídos impacta vários aspectos importantes do sistema elétrico, tais como: níveis de tensão, sistemas de proteção, qualidade de energia, carregamento dos cabos e transformadores, etc. Portanto, esses impactos precisam ser estudados e evitados, para que problemas futuros não venham a ocorrer (Raylander, 2016).

A primeira consequência da alta incidência de geradores distribuídos é a redução da demanda de carga na subestação. Com o consumidor gerando sua própria energia, a energia consumida nos períodos em que o sistema estiver gerando será menor do que o usual. Quando a energia elétrica gerada pelos consumidores é superior à energia por eles consumida, o excedente gerado é injetado à rede de distribuição, gerando assim um fluxo de potência reverso, e deixando a rede elétrica com um fluxo de potência bidirecional. Este é o segundo impacto da alta inserção dos geradores distribuídos à rede elétrica de distribuição. Os demais impactos que podem ocorrer são decorrentes principalmente deste fluxo reverso, isto porque o SD foi projetado para o sentido de potência único, unidirecional, e não bidirecional (Jothibasu and Santoso, 2016).

Dentre estes impactos decorrentes do fluxo reverso, destacamos os seguintes relacionados à qualidade de tensão: sobretensão, queda de tensão no alimentador e desequilíbrio de tensão. A sobretensão ocorre quando há um elevado nível de penetração de GDs no SD e a demanda dos consumidores é baixa. A queda de tensão é notada geralmente quando os

geradores distribuídos são desconectados do SD. Já o desequilíbrio de tensão está associado principalmente quando os GDs são de conexões monofásicas ou bifásicas, pois uma das fases do SD recebe mais potência injetada do que as demais. (Jothibas; Dubey and Santoso, 2016). Os limites aceitáveis para esses problemas de tensão são definidos pela ANEEL, e estão representados na Tabela 1.

Os impactos relacionados ao carregamento estão ligados à violação dos limites térmicos dos equipamentos (cabos, transformadores) na rede de distribuição, devido ao fluxo reverso de potência (Jothibas; Dubey and Santoso, 2016).

Já os problemas relacionados à proteção estão associados principalmente à coordenação e seletividade dos equipamentos de proteção. Dentro desse cenário destacam-se: disparo automático de relés, onde um relé atua sem que seja necessária a sua atuação; redução do alcance dos disjuntores, onde devido a alta inserção de GDs pode fazer com que os disjuntores atuem de forma inadequada, não atuando nas faltas que estariam dentro da sua zona de atuação (Jothibas; Dubey and Santoso, 2016).

Tabela 1 - Níveis de Qualidade de Tensão definidos pelo PRODIST (Fonte: PRODIST, 2017).

Fenômeno	Tensão Adequada	Tensão Fornecida (pu)
Sobretensão	Adequado	≤ 1.05
Sobretensão	Crítico	≥ 1.05
Queda de Tensão	Adequado	≤ 0.93
Queda de Tensão	Crítico	≥ 0.90
Desequilíbrio de Tensão	Máximo Permitido	2%

2.2. Cálculo de Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição

O cálculo de fluxo de potência trata da análise estática de um sistema elétrico baseado no modelo da rede dado pela matriz de admitância nodal e de injeções de potência conhecidas (cargas e geradores). O fluxo de potência tem por objetivo calcular as tensões complexas nodais em todas as barras do sistema e os fluxos de potência e correntes nos ramos, desta forma caracterizando o ponto de operação estático da rede elétrica. Este cálculo possibilita diversas aplicações, como avaliação da condição operacional dos equipamentos, análise de contingências, despacho de geradores, entre outros.

Existem diversos métodos para a solução do cálculo de fluxo de potência, como o método de Newton-Raphson, e alguns desenvolvidos especialmente para SD como os métodos de Varredura e métodos baseados na matriz de admitância nodal. Este trabalho utilizou o método baseado na matriz de admitância nodal implementado no software OpenDSS (Dugan, 2012). O método se baseia na representação da rede através da sua matriz de admitância nodal ($\mathbf{Y}$), que relaciona as tensões complexas em cada barra da

rede elétrica ($\mathbf{V}$) com as respectivas injeções de corrente ($\mathbf{I}$).

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} \quad (1)$$

Se tratando de SD, a modelagem da matriz de admitância se baseou no modelo trifásico dos componentes do alimentador de distribuição. As impedâncias série e paralelo dos ramos de distribuição foram obtidas utilizando as equações de Carson e pela aplicação da redução de Kron (Kersting, 2012), utilizando dados geométricos e dos tipos de cabos disponibilizados pela distribuidora. Assim, para cada trecho do ramal, foram obtidas as matrizes de impedância destacadas na equação (2) utilizadas para obter a matriz de admitância nodal em (1).

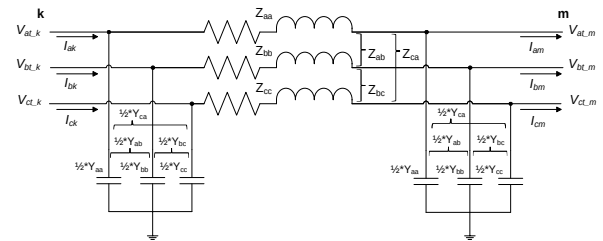


Figura 1- Modelo trifásico utilizado para representar os ramos de distribuição.

$$\mathbf{Z}_{trecho} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_{trecho}^{sh} = \begin{bmatrix} Y_{aa}^{sh} & Y_{ab}^{sh} & Y_{ac}^{sh} \\ Y_{ba}^{sh} & Y_{bb}^{sh} & Y_{bc}^{sh} \\ Y_{ca}^{sh} & Y_{cb}^{sh} & Y_{cc}^{sh} \end{bmatrix} \quad (2)$$

As injeções de corrente das barras foram obtidas através de um cenário de carga disponibilizado pela distribuidora de energia. Este cenário corresponde às curvas de carga agregadas nos transformadores de distribuição no horizonte de um dia em intervalos de 15 minutos. Assim, cada intervalo de tempo da curva de carga representa um cenário de carregamento a ser avaliado pelo cálculo de fluxo de potência.

Além das cargas, as injeções de corrente também serão compostas pela parcela obtida através da inserção de GD. Para modelar a GD, adotada neste estudo como sistemas fotovoltaicos, foi utilizado o modelo disponível no software OpenDSS. O modelo utilizado relaciona a injeção de potência obtida pelos painéis fotovoltaicos com parâmetros meteorológicos como: radiação, temperatura; e outros parâmetros técnicos como: curva de rendimento do inversor e dos painéis, entre outros. As equações (3) e (4) apresentam o modelo de sistemas fotovoltaicos utilizado no OpenDSS.

$$P_{PV} = \eta_{PV}(\theta) \cdot \Phi \cdot P_{mpp}(\Phi) \quad (3)$$

$$P_{PV+inv} = \eta_{inv}(P_{PV}) \cdot P_{PV} \quad (4)$$

na qual, θ corresponde à temperatura dos painéis fotovoltaicos em $^{\circ}\text{C}$, Φ é a irradiância incidente no painel em kW/m^2 , $\eta_{PV}(\theta)$ representa o rendimento do painel fotovoltaico em função da temperatura e $P_{mpp}(\Phi)$ é o ponto de máxima potência em função da irradiância. Na segunda equação temos a potência de saída do sistema fotovoltaico (painéis e inversores) P_{PV+inv} , na qual $\eta_{PV}(P_{PV})$ representa a curva de rendi-

mento do inversor em função da potência de entrada injetada pelos painéis fotovoltaicos. Neste trabalho adotou-se também um fator de potência unitário para os sistemas fotovoltaicos. Assim como as curvas de carga, foi utilizado um horizonte de um dia típico para os dados de entrada do modelo dos sistemas fotovoltaicos.

De posse das injeções de potência, cargas e modelo da rede elétrica, pode-se então obter a solução do cálculo de fluxo de potência. O algoritmo implementado no OpenDSS basicamente consiste na atualização iterativa das injeções de corrente a partir dos valores nominais de potência ativa e reativa das cargas e geradores, e das tensões nodais, seguido da solução do sistema linear apresentado em (1). O método é iterativo no sentido de que com novos valores para as tensões nodais, uma nova atualização das injeções de corrente é obtida.

2.3. Máxima Penetração de Geração Distribuída

O *Hosting Capacity*, em português chamado de Capacidade de Acomodação, é definido como a maior capacidade de geradores distribuídos que podem ser instalados em um dado circuito de distribuição sem a necessidade de alguma mudança operacional ou melhoria na rede (Ding; Mather and Gotseff, 2016). Sendo assim, o conceito de estimativa do *Hosting Capacity* é baseado nos critérios de impacto que os geradores distribuídos causam no SD, isto é, quando um limite do SD é violado, encontra-se o *Hosting Capacity* (Jothibasu; Dubey and Santos, 2016). A Figura 2 ilustra o conceito de *Hosting Capacity* explicado anteriormente.

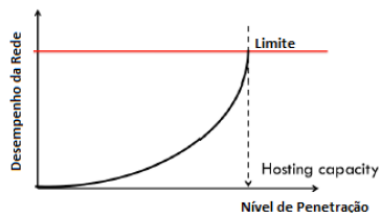


Figura 2- Conceito de *Hosting Capacity* (Walla, 2012).

Como citado na literatura, a maioria dos estudos avaliam o *Hosting Capacity* a partir dos critérios relacionados à qualidade de tensão. Para esse estudo, foi avaliada a capacidade de acomodação da rede elétrica através de cinco critérios relacionados à operação em regime permanente dos SDs, são eles:

- Sobretensão;
- Queda de Tensão no Alimentador;
- Desequilíbrio de Tensão;
- Capacidade Técnica dos Equipamentos (cabos e transformadores);
- Fluxo Reverso de Potência

Para determinar o *Hosting Capacity* foi desenvolvido uma metodologia determinística baseada em cenários de cálculo de fluxo de potência. A metodologia foi implementada em script Matlab, em conjunto com o OpenDSS, através da ferramenta de integra-

ção InterfaceCOM. O fluxograma da metodologia implementada é representado na Figura 3 abaixo.

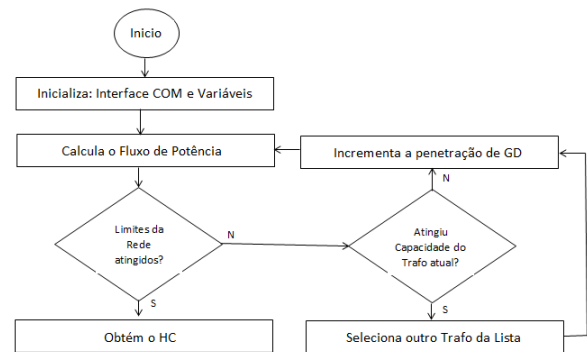


Figura 3 – Fluxograma da metodologia utilizada para cálculo do *Hosting Capacity* do alimentador de distribuição.

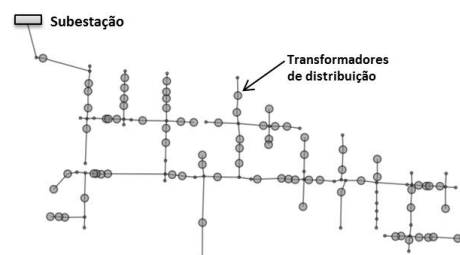


Figura 4 - Grafo da Topologia do Alimentador

3.1. Influência dos Critérios de Impacto

Para verificar a influência dos critérios limitantes no valor do *Hosting Capacity*, foram definidas quatro simulações, cada uma com uma particularidade:

- **Simulação 1:** *Hosting Capacity* Tradicional;
- **Simulação 2:** *Hosting Capacity* Tradicional com a adição dos Limite dos Transformadores como critério;
- **Simulação 3:** *Hosting Capacity* Tradicional, considerando os Limites dos Transformadores e adicionando o Carregamento das Linhas como critério;
- **Simulação 4:** *Hosting Capacity* Tradicional, considerando o Limite dos Transformadores, o Carregamento da Linha e adicionando o Fluxo Reverso na saída do alimentador na subestação como critério.

Nas Figuras 5, 6, 7 e 8 é possível verificar os resultados do *Hosting Capacity* para cada simulação, ao longo do horizonte de um dia, e também é indicada a capacidade máxima de potência instalada que o alimentador suportou em cada simulação. Cada curva nestas figuras representa um dos parâmetros que compõem o cálculo do *Hosting Capacity*. Por exemplo, na Figura 5 é apresentado o resultando das simulações frente ao critério relacionado à qualidade de tensão, mas especificadamente relacionado a tensão máxima do alimentador, sendo a curva em vermelho relacionada à simulação 1, considerando apenas o *Hosting Capacity* Tradicional; a curva em verde relacionada à simulação 2, considerando além do *Hosting Capacity* Tradicional, os limites dos transforma-

dores; a curva rosa relacionada à simulação 3, que considera o *Hosting Capacity* Tradicional, os limites dos transformadores e a Capacidade dos Cabos, e as curvas em preto e azul (sobrepostas) são referentes a simulação 4, que considera todos os critérios já considerados na simulação 3 com a adição do Fluxo reverso, e a simulação sem a inserção de GD, respectivamente. Nota-se também nestas figuras, o aspecto temporal na análise da inserção de GDs nos alimentadores de distribuição, muito evidente no caso de sistemas fotovoltaicos que é a relação de potência gerada ao longo do dia. Caso outros modais de GD estivessem sendo considerados, suas respectivas características temporais iriam influenciar no cálculo do *Hosting Capacity*.

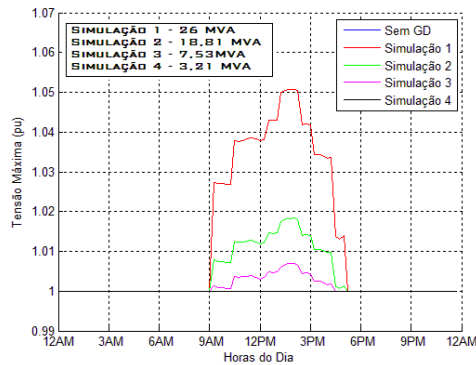


Figura 5 – Resultados obtidos frente à Qualidade de Tensão para as simulações definidas.

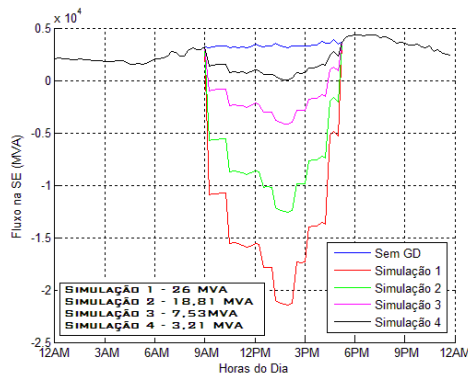


Figura 6 – Resultados obtidos frente ao Fluxo reverso para as simulações definidas.

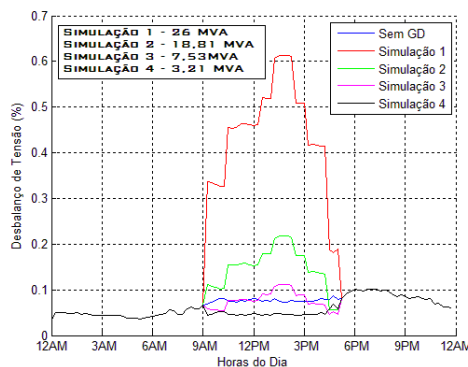


Figura 7 – Resultados atingidos frente a característica de Desbalanço de Tensão para as simulações definidas.

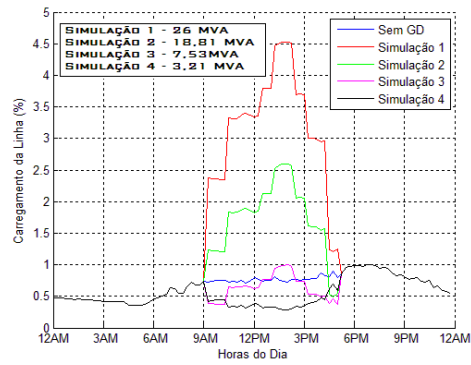


Figura 8 – Resultados atingidos frente ao Carregamento da Rede para cada simulação definida.

A Figura 9 apresenta de forma sintetizada os valores máximos obtidos de cada critério nas simulações onde se mostra a importância de considerar outros critérios no cálculo do *Hosting Capacity*.

O critério que mais limitou a inserção de GDs foi o fluxo reverso. Geralmente esta situação é indesejada pelas distribuidoras de energia, visto que há dispositivos de proteção, na saída dos alimentadores, para inibir esta situação (proteção contra fluxo reverso - ANSI 32P). Porém, com a alta penetração de GDs as distribuidoras podem rever a parametrização destas proteções, utilizando este excedente de geração para suprir demanda de outros alimentadores ou até mesmo realizar mudanças contratuais para exportação da energia para os sistemas de transmissão. Sendo assim, este critério pode contribuir positivamente para as distribuidoras, e não será adotado nas demais simulações. O segundo fator limitante da inserção de GDs na rede de distribuição é quando se considera as limitações dos cabos, ressaltando assim a importância da inclusão dos demais critérios técnicos avaliados neste trabalho, visto que considerando somente os critérios relacionados à qualidade de tensão existem grandes violações técnicas e físicas da rede primária.

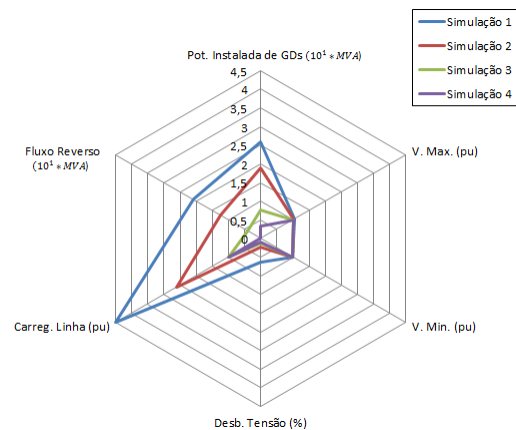


Figura 9 – Valores obtidos para os critérios utilizados no cálculo do *Hosting Capacity* considerando: Simulação 1:Qualidade de Tensão; Simulação 2: Inclusão do Limite dos Transformadores; Simulação 3: Inclusão do Carregamento da Rede; Simulação 4: Inclusão do Fluxo Reverso.

3.2. Influência Locacional da Geração Distribuída

Apesar do alimentador possuir aspectos construtivos e parâmetros únicos para as simulações, o valor do *Hosting Capacity* pode variar de acordo com a localização com que os GDs são inseridos. A fim de verificar como tal característica influencia o *Hosting Capacity*, foram definidas quatro simulações variando a localidade de inserção dos GDs:

- **Simulação 1:** Do Transformador mais distante da Subestação para o mais próximo;
- **Simulação 2:** Do Transformador mais próximo a Subestação para o mais distante;
- **Simulação 3:** Do Transformador localizado no centro do Alimentador até suas Extremidades;
- **Simulação 4:** Aleatoriamente.

No gráfico a seguir é possível verificar os resultados obtidos em cada simulação, e concluir que a localidade onde os GDs serão introduzidos influencia diretamente no cálculo do *Hosting Capacity* da rede. No gráfico os tamanhos dos nós da rede elétrica representam a quantidade de GD instalada no respectivo transformador em kVA, e o *Hosting Capacity* é indicado na legenda da figura.

O critério limitante para todas as simulações neste caso foi o carregamento de linha, o que está diretamente relacionado ao aspecto locacional do alimentador. Quanto mais próximo da subestação maiores são as bitolas dos cabos, logo maior a corrente que estes suportam e, portanto, é possível inserir mais GDs nessas áreas do alimentador. A questão locacional já é algo explorado na literatura, porém ressalta-se aqui que esta característica é particular para cada alimentador, sendo necessários estudos de caso direcionados para cada SD. Este critério pode balizar decisões das distribuidoras no sentido de remanejar cargas, investir em novos equipamentos e na possibilidade de alocação de novos GDs em um cenário onde o *Hosting Capacity* de um alimentador esteja sendo alcançado. Neste sentido, nota-se que o alimentador possui uma característica locacional que eventualmente pode limitar a instalação de GD em outros transformadores. Isto pois dependendo da localização de instalação dos GDs, o limite de acomodação de GD no alimentador é alcançado apesar de existirem transformadores com capacidade para receber novos geradores, como pode ser visto por exemplo na Figura 10-a.

3.3. Influência do Tipo de Ligação da Geração Distribuída

A fim de verificar como o tipo de ligação dos GDs influencia no cálculo do *Hosting Capacity* da rede, foram definidas três simulações, nas quais foram adicionados apenas GDs monofásicos em cada fase:

- **Simulação 1:** GD monofásico, somente na fase A;
- **Simulação 2:** GD monofásico, somente na fase B;
- **Simulação 3:** GD monofásico, somente na fase C;

Na Figura 11 são apresentados os valores encontrados nestas simulações. Apesar da inserção dos GDs serem monofásicos, o que continuou limitando o *Hosting Capacity* do alimentador foi o carregamento dos cabos e não o desequilíbrio de tensão.

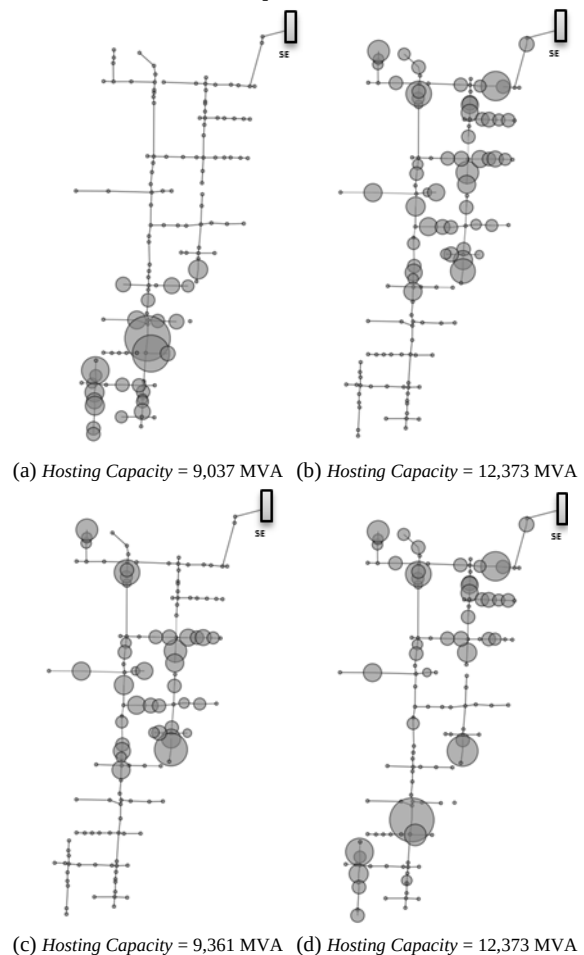


Figura 10 - Valores obtidos de *Hosting Capacity* considerando diferentes localizações para GD: (a) Simulação 1: do transformador mais distante para o mais próximo da subestação; (b) Simulação 2: do transformador mais próxima para o mais distante da subestação; (c) Simulação 3: do transformador mais central para as extremidades do alimentador; e (d) Simulação 4: localização aleatória.

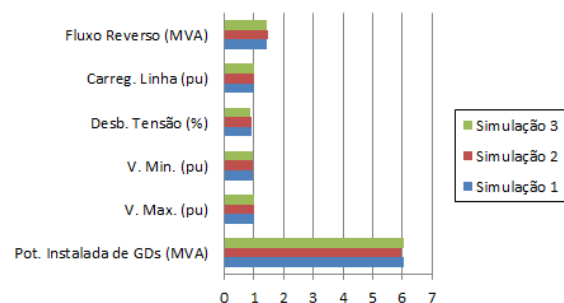


Figura 11 – Valores obtidos para os critérios utilizados no cálculo do *Hosting Capacity* considerando apenas a inserção de GD monofásico nas fases: Simulação 1: Somente na Fase A; Simulação 2: Somente na Fase B; Simulação 3: Somente na Fase C.

Este resultado está relacionado ao fato de que as cargas estão bem distribuídas entre as três fases neste alimentador, algo comum em alimentadores curtos, urbanos e que não possuem ramos laterais. Destaca-

se, porém, o aumento no desbalanço em relação às demais simulações, que neste caso chegou a valores próximos à 1%. Apesar disto, esta característica de desequilíbrio de tensão é importante para a qualidade de tensão, e é mais influente em alimentadores mais desequilibrados em termos de distribuição de cargas, principalmente no caso das redes secundárias. Como esperado, a capacidade de potência instalada de GDs monofásica é menor comparada com a trifásica.

3.4. Influência da Sazonalidade

Os GDs podem possuir como matriz fontes renováveis ou não renováveis. Neste estudo foram abordados os sistemas fotovoltaicos que são influenciados diretamente por parâmetros meteorológicos como temperatura e insolação. Estes parâmetros variam diariamente e principalmente também com a mudança de estação. Visando analisar a influência da sazonalidade no cálculo do *Hosting Capacity*, foram definidas 4 simulações com dias em épocas do ano distintos, e são elas:

- **Simulação 1:** Dia de Verão muito ensolarado;
- **Simulação 2:** Dia de Verão pouco ensolarado;
- **Simulação 3:** Dia de Inverno muito ensolarado;
- **Simulação 4:** Dia de Inverno pouco ensolarado;

Na Tabela 2 seguem mostrados os valores da temperatura média e da radiação máxima em cada um desses dias. Já na Figura 12, são apresentados os resultados das simulações, onde é possível notar que a capacidade de potência instalada de GDs é inversamente proporcional à radiação diária, ou seja, diminuindo o índice de radiação diária, o valor do *Hosting Capacity* em relação à potência instalada aumenta.

Tabela 2 - Valores das Variáveis Meteorológicas adotados para as para a modelagem do GDs no OpenDSS.

	Temperatura Média (°C)	Radiação Máxima (kW/m ²)
Simulação 1	25,00	1,04
Simulação 2	23,34	0,42
Simulação 3	21,10	0,79
Simulação 4	13,40	0,37

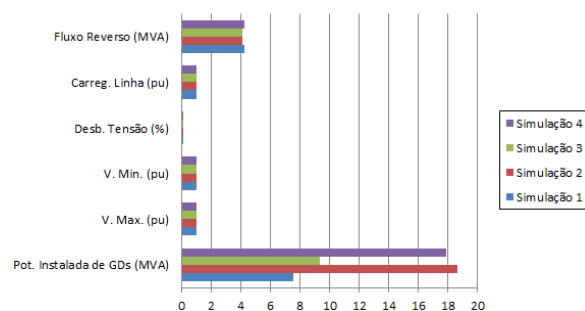


Figura 12 - Valores obtidos para os critérios utilizados no cálculo do *Hosting Capacity* considerando diferentes dias e estações: Simulação 1: Dia muito Ensolarado no Verão; Simulação 2: Dia pouco Ensolarado no Verão; Simulação 3: Dia muito Ensolarado no Inverno; Simulação 4: Dia pouco Ensolarado no Inverno

Isto de fato já era esperado, visto que com radiações mais baixas a geração de energia pelo sistema fotovoltaico é menor, e assim para violar algum critério limitante à rede é necessário inserir mais GDs. É importante ressaltar que a o cálculo do *Hosting Capacity* deste estudo está sendo verificado em termos de potência instalada de GD, assim em dias menos ensolarados mais painéis podem ser instalados a fim de que se tenha uma potência igual ao de dias ensolarados. Um ponto de destaque é a comparação entre o dia pouco ensolarado do verão e do inverno, que apesar do dia de verão ter uma radiação mais elevada comparada ao dia de inverno, a geração no verão foi menor. Isto está associado principalmente ao valor da temperatura dos painéis, que trabalham no seu ponto de máxima operação em temperatura menos elevada. Assim como nas demais simulações, o que limitou o *Hosting Capacity* aqui, também foi à capacidade dos cabos instalados.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou uma metodologia baseada no cálculo de fluxo de potência para avaliação da penetração máxima de GD fotovoltaica em um alimentador real de distribuição, possibilitando desta forma a obtenção do chamado *Hosting Capacity* da rede elétrica. Foi possível verificar neste estudo a importância da definição e escolha de critérios e limitações dos equipamentos da rede elétrica que irão compor o cálculo do *Hosting Capacity*, algo de grande importância para as distribuidoras de energia balizarem suas decisões frente à estimação do potencial de GD disponível em seus sistemas e possíveis direcionamentos de recursos.

Nota-se que o alimentador em estudo, de predominância urbana e relativamente curto, tem como principal fator limitante para o *Hosting Capacity* a capacidade de corrente dos cabos. Nota-se uma grande redução no *Hosting Capacity* do alimentador quando este critério é considerado como critério na composição de cálculo, mostrando a importância de se levar em conta outros fatores além das características de qualidade de tensão, tradicionalmente adotadas. Outro ponto importante neste tipo de estudo é a consideração das parametrizações de proteções, por exemplo, a de fluxo reverso na saída dos alimentadores nas subestações. Neste caso existe também uma influência deste tipo de informação na capacidade total de GD acomodada pelos alimentadores, porém é possível realizar reparametrizações nos relés de proteção sem a necessidade de grandes alterações e investimentos nos alimentadores quando comparadas a trocas de equipamentos. Desta forma a influência deste tipo de informação pode ser desprezada vide a filosofia corrente das distribuidoras quanto à exportação de energia e filosofias de proteção. Além disto, os aspectos locais, o tipo de ligação e a sazonalidade se mostram como características importantes no cálculo do *Hosting Capacity*. Assim, ações de

planejamento para direcionamento de recursos com objetivos de aumento do *Hosting Capacity* dos alimentadores devem levar em consideração uma metodologia que englobe diversos cenários. Neste sentido, abordagens probabilísticas se mostram mais interessantes por possibilitar uma maior robustez quanto aos cenários avaliados.

Quanto a trabalhos futuros, vislumbra-se a extensão do cálculo de *Hosting Capacity* para a rede secundária, visto que outros fatores poderão limitar ainda mais a capacidade de instalação de GDs nos alimentadores. Quanto à metodologia de cálculo, as abordagens probabilísticas se mostram como um caminho interessante a ser seguido, em especial considerando, além das incertezas de carga e geração, aspectos locais como probabilidade de instalação em determinadas regiões dos SDs e tipos de ligação da GD mais prováveis de ocorrerem.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade de São Paulo (USP) pelo apoio, a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e ao Engenheiro Eletricista Alexandre Viera Oliveira pelos dados para a modelagem do alimentador estudado. Também agradece às agências de fomento CAPES, CNPq (processo nº 309087/2015-5) e FAPESP (processo nº 2016/19646-6) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- ANEEL (2016). Caderno Temático. Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, pp 1-34
- ANEEL (2017). Nota Técnica. Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. Brasília, pp. 1-26.
- Ding, F.; Mather, B. and Gotseff, P. (2016). Technologies to increase PV *Hosting Capacity* in distribution feeders. IEEE PES General Meeting, Boston, pp. 1-7.
- Dugan, R. C.; Ballanti, A. (2011). OpenDSSPVSystem Element Model. Power Research Institute, pp. 1-10.
- Ebe, F.; Idlbi, B.; Morris, J.; Heilscher, G. and Meier, F. (2017). Evaluation of PV *Hosting Capacity* of distribution grids considering a solar roof potential analysis — Comparison of different Algorithms. IEEE PowerTech, Manchester, pp. 1-6.
- Gomes, C. A. M. and Ferreira, H. P. (2018). *Hosting Capacity Evaluation of Distributed Generation Systems with Genetic Algorithm. Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. IEEE, pp. 1-6.
- Jothibasu, S. and Santoso, S. (2016). Sensitivity Analysis of Photovoltaic *Hosting Capacity* of Distribution Circuits. IEEE PES General Meeting, Boston, pp. 1-6.
- Jothibasu, S.; Santoso, S. and Dubey A. (2016). Determining PV *Hosting Capacity* without Incurring Grid Integration Cost. IEEE North American Power Symposium, Denver, pp. 1-5.
- Jothibasu, S.; Dubey A. and Santoso S. (2016). Cost of Integrating Distributed Photovoltaic Generation to the Utility Distribution Circuits. Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin, pp. 1-41.
- Kersting, W. H. (2012). Distribution System Modeling and Analysis – Third Edition, pp 1 – 455.
- Kikuchi, S. and Machida, M. (2010). Hosting Capacity Analysis of Many Distributed Photovoltaic Systems in Future Distribution Networks. 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). IEEE, pp. 1-5. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378408.
- Molina, V. Q.; Romero, M. and Pavas, A. (2017). Assessment of the *Hosting Capacity* in Distribution Networks with Different DG Location. IEEE PowerTech, Manchester, pp. 1-6.
- Rylander, M.; Smith, J. and Sunderman W. (2016). Streamlined Method for Determining Distribution System *Hosting Capacity*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.52, No. 1, pp. 105-111.
- Santos, I. N. *et al.* (2015). Considerations on hosting capacity for harmonic distortions on transmission and distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 119, pp. 199-206. doi: 10.1016/j.epsr.2014.09.020.
- Walla, T. (2012). *Hosting Capacity* for Photovoltaics in Swedish Distribution Grids. Uppsala Universitet, pp. 1-55.
- Walling, R. A.; Saint, R.; Dugan R. C.; Burke, J. and Kojovic, L. A. (2008). Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, pp 1-9.