

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE
CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Fabrício Montes Silva

Uberlândia
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE
CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada por Fabrício Montes Silva à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Ivan Nunes Santos, Dr. (Orientador) – UFU
José Carlos de Oliveira, Dr. – UFU
Fabricio Augusto Matheus Moura, Dr. – UFTM

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586c Silva, Fabrício Montes, 1990-
2017 Contribuições à análise de capacidade de hospedagem em sistemas
elétricos de potência / Fabrício Montes Silva. - 2017.
113 f. : il.

Orientador: Ivan Nunes Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1104>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia eólica - Teses. 3. Geração
de energia fotovoltaica - Teses. 4. Energia elétrica - Controle de
qualidade - Teses. I. Santos, Ivan Nunes. II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

CDU: 621.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262

CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Fabrício Montes Silva

Dissertação apresentada por Fabrício Montes Silva à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Ivan Nunes Santos
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe,
Celeide, por todo amor, atenção,
incentivo, torcida, dedicação e cuidados
dedicados a mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe pelo amor incondicional durante toda minha vida.

Agradeço à minha namorada Maria Carolina por sempre estar ao meu lado, sempre me motivar e sempre me apoiar em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador Ivan pelo apoio acadêmico e por me guiar durante todo o caminho desta jornada.

Agradeço aos meus colegas de laboratório pela amizade e a intensa troca de conhecimento.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Elétrica pela oportunidade e por sua infraestrutura para a área acadêmica.

RESUMO

O estudo de capacidade de hospedagem está voltado à determinação da máxima quantidade de geração distribuída que pode ser conectada em um determinado ponto do sistema elétrico antes que um indicador de qualidade da energia ou mesmo um parâmetro limitador da rede tenha seu valor limite violado.

Diversos trabalhos buscam determinar a capacidade de hospedagem ligada às principais variáveis que afetam o sistema elétrico, sendo elas: sobretensão e sobrecorrente ou sobrecarga. Trabalhos mais recentes ainda abordam outras variáveis como fluxo de potência e outra que vem crescendo de importância com a entrada cada vez maior de cargas não lineares no sistema elétrico: distorção harmônica.

Este trabalho traz uma análise conjunta do conceito de capacidade de hospedagem na busca de se colocar como um primeiro passo para unificar o conceito em torno de todas as variáveis que a influenciam. Neste ínterim, são observadas três variáveis: sobretensão, sobrecorrente ou sobrecarga e distorção harmônica.

Para exemplificar as teorias descritas, há um estudo de caso envolvendo um sistema amplamente conhecido no meio acadêmico, o 14 barras do IEEE. Em um primeiro momento são analisadas as variáveis de forma independente para encontrar a capacidade de hospedagem no entorno de cada uma, sendo posteriormente unificadas para globalizar o conceito.

Com o intuito de uma contribuição para a análise de capacidade de hospedagem em termos de distorção harmônica, foi desenvolvida uma ferramenta gráfica que permite visualizar melhor as áreas de capacidade de hospedagem determinadas pelos limites estabelecidos de distorção harmônica no ponto de conexão.

Palavras-chave: capacidade de hospedagem, geração distribuída, geração fotovoltaica, geração eólica, qualidade da energia, sobrecorrente, sobretensão, harmônicos.

ABSTRACT

The hosting capacity study is the determination of the maximum amount of distributed generation that can be connected at a particular bus in the electrical system before an energy quality indicator or even a network limiting parameter has its threshold value violated.

Several works seek to determine the hosting capacity linked to the main variables that affect the electrical system, being: overvoltage and overcurrent or overload. More recent works still addresses other variables such as power flow and another one that is growing in importance with the increasing input of nonlinear loads in the electric system: harmonic distortion.

This work brings a joint analysis of the concept of hosting capacity seeking to be placed as a first step to unify the concept around all the variables that influence it. In this dissertation, three variables are observed: overvoltage, overcurrent or overload and harmonic distortion.

To exemplify the described theories, there is a case study involving a system widely known in academia, the 14 bars of the IEEE. In a first moment the variables are analyzed independently to find the hosting capacity regarding each one of those, being later unified to a single study seeking to globalize the concept.

In order to contribute to the analysis of hosting capacity in terms of harmonic distortion, a graphical tool was developed that allows better visualization of the areas of hosting capacity determined by the established limits of harmonic distortion at the point of connection.

Keywords: hosting capacity, distributed generation, photovoltaic generation, Wind generation, power quality, overcurrent, overvoltage, harmonics.

SUMÁRIO

Capítulo I - Introdução Geral.....	18
1.1. Considerações Iniciais.....	18
1.2. Contextualização do Tema	19
1.2.1. Geração distribuída	25
1.2.2. Efeitos da inserção de fontes eólicas e fotovoltaicas de energia no sistema elétrico	26
1.2.3. Capacidade de Hospedagem	29
1.3. Estado da Arte	30
1.4. Contribuições desta Dissertação.....	36
1.5. Estrutura da Dissertação.....	37
Capítulo II - Procedimentos para o Cálculo da Capacidade de Hospedagem	39
2.1. Considerações Iniciais.....	39
2.2. Capacidade de Hospedagem em Termos de Sobretenção	40
2.3. Capacidade de Hospedagem em Termos de Sobrecorrente/Sobrecarga	46
2.4. Capacidade de Hospedagem em Termos de Harmônicos	48
2.5. Considerações Finais.....	53

Capítulo III - Avaliação de Desempenho dos Procedimentos de Cálculo de Capacidade de Hospedagem via Implementação Computacional.....	55
3.1. Considerações Iniciais.....	55
3.2. Detalhamento do Sistema Teste – Arranjo de 14 Barras do IEEE.....	57
3.3. Estudo de Caso: Capacidade de Hospedagem em Termos de Sobretensão .	62
3.3.1. Sistema original com as condições de tensões iniciais inalteradas.....	64
3.3.2. Sistema com regulação de tensão nas barras de conexão de geração distribuída	68
3.4. Estudo de Caso: Capacidade de Hospedagem em Termos de Sobrecorrente/Sobrecarga.....	73
3.4.1. Barra 12.....	73
3.4.2. Barra 13.....	75
3.5. Estudo de Caso: Capacidade de Hospedagem em Termos de Distorção Harmônica	76
3.4.1. Barra 12.....	77
3.4.2. Barra 13.....	82
3.6. Análise Integrada dos Resultados	87
3.5.1. Barra 12.....	87
3.5.2. Barra 13.....	89
3.5.3. Análise Complementar – Adequação do sistema	90

3.7. Considerações Finais.....	90
Capítulo IV - Ferramenta Gráfica para Visualização de Capacidade de Hospedagem em Termos de Harmônicos.....	92
4.1. Considerações Iniciais.....	92
4.2. Fundamentação Matemática e Procedimento de Cálculo Proposto	93
4.3. Aplicação da Ferramenta Computacional Desenvolvida em um Estudo de caso 96	
4.3.1. Barra 5.....	96
4.3.2. Barra 12.....	100
4.4. Considerações Finais.....	103
Capítulo V - Conclusões.....	105
Referências	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica entre 2000 e 2013.....	20
Figura 2 - Evolução da capacidade instalada em gigawatts de geração eólica mundial.	21
Figura 3 - Evolução estimada da capacidade instalada de energia eólica no Brasil.....	23
Figura 4 - Gráfico genérico de determinação da capacidade de hospedagem em um determinado ponto da rede em função da inserção de geração dispersa.	30
Figura 5 - Alimentador hipotético de distribuição.....	41
Figura 6 - Alimentador hipotético de distribuição com bancos de capacitores e geração distribuída.	41
Figura 7 - Faixas de Tensão em relação à Referência.	44
Figura 8 - Gráfico de perdas em função da potência de um sistema de geração distribuída instalado em uma rede de distribuição.	47
Figura 9- Equivalente de Thévenin para harmônicas de ordem h	50
Figura 10 - Equivalente de Norton para harmônicas de ordem h	51
Figura 11 - Sistema IEEE 14 barras.	56
Figura 12 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 12.	64
Figura 13 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 13.	66
Figura 14 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 12 – com alteração no TAP do transformador entre as barras 5 e 6.....	69

Figura 15 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 13 – com alteração no TAP do transformador entre as barras 5 e 6.....	71
Figura 16 – Tensão resultante na barra 6 em função da injeção de geração distribuída na barra 13 – com alteração no TAP do transformador entre as barras 5 e 6.....	72
Figura 17 – Tensão resultante de 5 ^a harmônica na Barra 12 em função do acréscimo de GD neste mesmo barramento.	82
Figura 18 – Tensão resultante de 5 ^a harmônica na Barra 13 em função do acréscimo de GD neste mesmo barramento.	86
Figura 19 - Capacidade de hospedagem integrada - Barra 12.	88
Figura 20 - Capacidade de hospedagem integrada - Barra 13.	89
Figura 21 - Gráfico ilustrativo de um caso hipotético de avaliação de capacidade de hospedagem.	94
Figura 22 - Gráfico ilustrativo de um caso hipotético de avaliação de capacidade de hospedagem – perspectiva superior.	95
Figura 23 - Tensão de 5 ^a Ordem Harmônica na barra 5.	97
Figura 24 - Tensão de 7 ^a Ordem Harmônica na barra 5.	98
Figura 25 - Tensão de 11 ^a Ordem Harmônica na barra 5.	99
Figura 26 - Tensão de 13 ^a Ordem Harmônica na barra 5.	100
Figura 27 - Tensão de 5 ^a Ordem Harmônica na barra 12.	101
Figura 28 - Tensão de 7 ^a Ordem Harmônica na barra 12.	102
Figura 29 - Tensão de 11 ^a Ordem Harmônica na barra 12.	102
Figura 30 - Tensão de 13 ^a Ordem Harmônica na barra 12.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro resumo dos possíveis efeitos danosos da inserção de fontes eólicas e fotovoltaicas no sistema elétrico.	28
Tabela 2 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230kV.	42
Tabela 3 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69kV e inferior a 230kV.....	43
Tabela 4 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69kV.	43
Tabela 5 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 1kV.	43
Tabela 6 – ONS: Limites individuais de distorção de tensão em porcentagem da tensão fundamental.	53
Tabela 7 - Parâmetros das máquinas síncronas do sistema 14 barras do IEEE.....	57
Tabela 8 - Parâmetros das cargas do sistema 14 barras do IEEE.....	57
Tabela 9 - Parâmetros das linhas do sistema 14 barras do IEEE.....	58
Tabela 10 - Parâmetros dos transformadores do sistema 14 barras do IEEE.	58
Tabela 11 - Limites de condução de corrente estabelecidos para as Linhas de Transmissão e os Transformadores.....	59
Tabela 12 - Fontes de distorção harmônica adicionadas ao sistema.	60
Tabela 13 - Fontes de distorção harmônica adicionadas ao sistema em porcentagem em relação à ordem fundamental.....	61

Tabela 14 - Níveis de curto circuito encontrados no sistema de 14 Barras do IEEE via simulação	61
Tabela 15 - Tensão percentual das barras do sistema IEEE 14 Barras - sem injeção de novas gerações.....	63
Tabela 16 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 12.....	65
Tabela 17 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 13 – de 5 a 55 MVA.....	66
Tabela 18 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 13 – de 60 a 105 MVA.....	67
Tabela 19 – Tensão percentual das barras do sistema IEEE 14 Barras - sem injeção de novas gerações e com regulação prévia de tensão.....	68
Tabela 20 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 12 – situação com regulação inicial da tensão.....	70
Tabela 21 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 13 – situação com regulação inicial da tensão.....	71
Tabela 22 – Capacidade de hospedagem do sistema no tocante à sobrecorrentes/sobrecargas devido à inserção de GD – Barra 12.	74
Tabela 23 – Capacidade de hospedagem do sistema no tocante à sobrecorrentes/sobrecargas devido à inserção de GD – Barra 13.	75
Tabela 24 - Injeção harmônica média produzida por uma típica GD.....	76
Tabela 25 – Tensões e impedâncias harmônicas verificadas, via simulação, a partir da Barra 12.	78

Tabela 26 – Corrente harmônica equivalente observada a partir da Barra 12.....	79
Tabela 27 - Tensão harmônica percentual com 75 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 1 a 9.....	80
Tabela 28 - Tensão harmônica percentual com 75 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 10 a 18.....	80
Tabela 29 - Tensão harmônica percentual com 75 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 19 a 25 e DTT.	81
Tabela 30 – Tensões e impedâncias harmônicas verificadas, via simulação, a partir da Barra 12.	82
Tabela 31 – Corrente harmônica equivalente observada a partir da Barra 13.....	83
Tabela 32 - Tensão harmônica percentual com 95 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 13 – ordens harmônicas 1 a 9.....	84
Tabela 33 - Tensão harmônica percentual com 95 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 10 a 18.....	85
Tabela 34 - Tensão harmônica percentual com 95 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 19 a 25 e DTT.	85
Tabela 35 - Análise das variáveis envolvidas na análise da capacidade de hospedagem - Barra 12.	88
Tabela 36 - Análise das variáveis envolvidas na análise da capacidade de hospedagem - Barra 13.	90
Tabela 37 – Resultados de simulação com as tensões e impedâncias harmônicas equivalentes na barra 5.	97

Tabela 38 – Resultados de simulação com as tensões e impedâncias harmônicas equivalentes na barra 12.....	100
---	-----

LISTA DE SIGLAS

- ABEE – Associação Brasileira de Energia Eólica;
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;
- IEC – *International Electrotechnical Commission*;
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;
- IRENA – *International Renewable Energy Agency*;
- ONS – Operador Nacional do Sistema;
- PAC – Ponto de Acoplamento Comum;
- PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia;
- SIN – Sistema Interligado Nacional;
- TA – Tensão de Atendimento;
- TL – Tensão de Leitura;
- TR – Tensão de Referência
- DRP – Índice de duração relativa de transgressão para tensão precária;
- DRC – Índice de duração relativa de transgressão para tensão crítica;

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A constante busca por fontes sustentáveis de energia leva à um crescimento, nos dias atuais, da inserção de fontes não convencionais de energia elétrica na matriz energética brasileira, a saber: geração eólica e geração solar. Tais fontes são uma alternativa à geração renovável de base hidráulica, a qual ainda representa cerca de 60% da geração elétrica do Brasil [1].

A geração eólica e a geração solar apresentam certas características comuns. Além de serem fontes renováveis e apresentarem baixo impacto ambiental e social de implantação, quando comparadas com a geração hidráulica de energia, estas são tecnologias que têm tido seus custos de implantação reduzidos e, em alguns casos, têm sido contempladas em políticas governamentais de incentivo, com diminuição de impostos, garantia de venda (e preço) e facilitação de crédito.

Todavia, tais particularidades comuns à estas duas fontes alternativas não se findam com as premissas apresentadas. Ambas se mostram com grandes variações de injeção de potência ao longo do dia, do mês e também do ano, dependendo diretamente

das características específicas da localidade. Outra particularidade comum, trata-se da estratégia de conexão à rede elétrica, estas necessitam de interfaceamento com o sistema interligado via conversores eletrônicos não-lineares, o que torna o processo mais caro, delicado e complexo.

Este trabalho de pesquisa encontra-se direcionado à sistematização e ao levantamento do estado da arte dos estudos correlatos à chamada capacidade de hospedagem do sistema elétrico com vistas à inserção destas novas formas de geração de energia. Desde já, ressalta-se que em complemento à conceituação ora focada, pretende-se aqui realizar uma análise integrada para o estabelecimento de um valor de capacidade de hospedagem dessa geração renovável em função de parâmetros e indicadores pré-estabelecidos.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Na iminência do esgotamento das reservas mundiais de petróleo e, em contrapartida, a necessidade de diminuição do chamado efeito estufa, os esforços voltaram-se para pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias capazes de contornar tais questões. Neste contexto, conforme já mencionado, a geração eólica e solar (de modo especial, a fotovoltaica) vêm ganhando espaço e importância na matriz energética mundial, principalmente nos países mais desenvolvidos. O sistema elétrico brasileiro, não diferindo do restante do mundo, vem se adaptando a estas novas concepções de geração de energia elétrica.

Em termos mundiais, constata-se um grande avanço da potência instalada de energia solar fotovoltaica. Tal crescimento aparenta ter um comportamento exponencial entre os anos de 2000 e 2013, conforme pode ser notado pelo gráfico da Figura 1 [2].

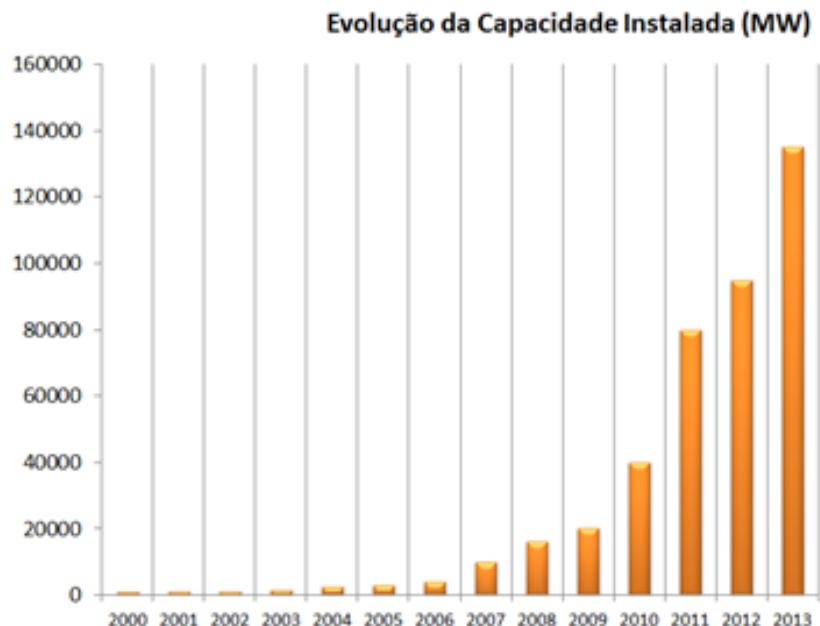


Figura 1- Evolução da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica entre 2000 e 2013.

A energia solar fotovoltaica vem sendo impulsionada por duas distintas concepções de geração, a saber: a mini e micro geração que é diretamente produzida nas plantas dos consumidores e conectada na rede de distribuição e a geração em fazendas solares que possuem, via de regra, conexão ao sistema de média e alta tensões. Por sua vez, esta última pode ser também de características térmicas (termo-solar), produzindo energia elétrica a partir do aquecimento de líquidos proporcionados pela concentração dos raios solares, porém, por representar um percentual baixo quando comparado à fotovoltaica, esta não será nesta dissertação explorada.

É importante mencionar que em 2013 havia 135 GW instalados de energia fotovoltaica mundialmente [2], havendo, assim, um crescimento de 39% na geração de energia elétrica utilizando usinas e módulos solares entre 2013 e 2014 [3], representando um total de 197 TWh gerados, ou 4% de toda a energia renovável gerada no mundo, considerando as geradas a partir de água, vento, sol, bioenergia e geotermal.

No que tange à evolução da energia eólica em termos mundiais, o gráfico da Figura 2 [2] apresenta um perfil deste avanço.

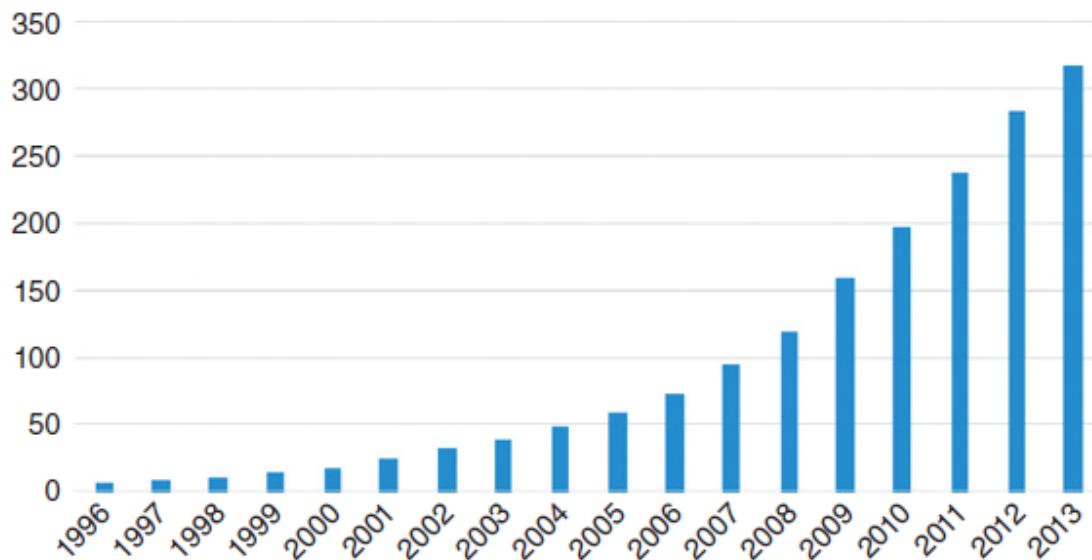


Figura 2 - Evolução da capacidade instalada em gigawatts de geração eólica mundial.

Considerando dados de 2013, em termos de potência total instalada, os países com os maiores números são China, Estados Unidos, Alemanha e Espanha. Para dados de crescimento, o primeiro lugar continua com China, seguido por Alemanha, Grã Bretanha, Índia e Canadá. O Brasil figura em sétimo lugar em dados de crescimento de potência instalada em dados de 2013 [2].

Em comparação com dados de 2015, o quarto lugar ocupado pela Espanha é ultrapassado pela Índia em potência instalada, bem como o crescimento se mantém nas duas primeiras posições seguidas de Estados Unidos em terceiro e Brasil em quarto [4].

No contexto nacional, vale salientar que atualmente a matriz energética brasileira, em termos de energia elétrica, é predominantemente hídrica, com 96,84 GW de capacidade instalada, ou 61,34% de um total de 157,87 GW. A energia elétrica gerada a partir de combustíveis fósseis representa 17,04% desta (26,9 GW). Presentemente, as usinas que utilizam o vento como fonte de energia representam 6,21%, ou 9,8 GW de capacidade instalada, enquanto as fotovoltaicas ainda representam apenas 0,0145%, ou 23 KW [1].

A representatividade da matriz eólica no Brasil ainda é tímida, mas cresce em ritmo acelerado. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEE), a previsão é um salto dos 10,7 GW instalados até o fim de 2016 para mais de 17 GW no fim de 2020 [1, 5], ou a dobra da capacidade em apenas quatro anos conforme exibido pela curva da Figura 3 [5].

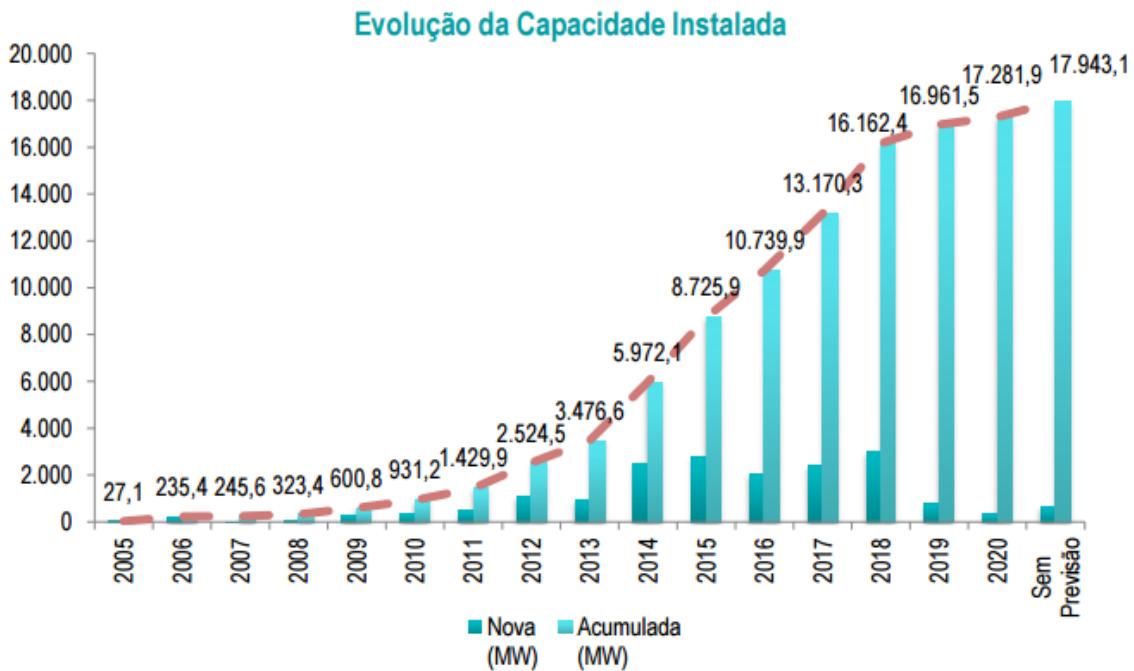


Figura 3 - Evolução estimada da capacidade instalada de energia eólica no Brasil.

Os maiores produtores de energia eólica no Brasil são os estados de Rio Grande do Norte, seguido de Bahia, Ceará e Rio Grande do Sul. Todavia, há produção relevante sendo implantada, sendo que a maior quantidade em termos de potência se encontra na Bahia, seguido por Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará [5].

O governo federal, através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, posteriormente revisada gerando a Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, garantiu a compra de energia pela Eletrobrás por um valor bem acima que os praticados no ramo hidrelétrico, de R\$260,00 por MWh, o que forneceu subsídio atrativo para investimentos na área [6].

No que se refere ao crescimento da geração fotovoltaica, em se tratando de Brasil, esta é observada a partir de dois marcos. Um primeiro momento ocorreu com a criação

da Resolução nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [7], onde foi definido microgeração, minigeração, e outras classes de acordo com a potência instalada e sua conexão à rede. Porém seu maior impacto foi devido a possibilitar a geração residencial para consumo e venda de excedente à concessionária de energias renováveis. Outro marco foi em outubro de 2014, quando ocorreu o primeiro Leilão de Energia de Reserva contemplando a energia solar separadamente. O evento foi um sucesso, contratando uma capacidade instalada total de 889,6 MW para energia solar a um preço inferior a 90 dólares por MWh – considerando o câmbio da época [8]. Cabe também citar a Resolução nº 687 de 2015 [9], que traz revisões à norma nº 482.

A integração dos parques eólicos e fazendas fotovoltaicas à rede é um ponto importante a se observar, tanto em relação à forte dinâmica impostas por estas no ponto de conexão no que se refere aos efeitos de injeção de potência, quanto em efeitos intrínsecos ao processo de conversão de energia. Tal situação de forte variação acontece, para as eólicas, decorrente da não existência de ventos, ou a alteração da velocidade destes de forma imprevisível, bem como, no caso de fotovoltaicas, a variação da irradiação solar devido a fatores como presença de nuvens, posição do sol e posição dos painéis. Estas observações são tecidas em se tratando de geração centralizada em parques eólicos ou fazendas solares.

Complementarmente, em se tratando de geração distribuída, além dos problemas acima descritos (forte dinâmica de ventos ou irradiação solar e restrições no ponto de conexão), tem-se também questões relacionadas a inversões de fluxo de potência, variações de tensão, adequações nos sistemas de proteção, entre outras. As definições e

regras relacionadas à esta geração, em âmbito nacional, serão melhor apresentadas na sequência deste trabalho.

1.2.1. Geração distribuída

A mini e microgeração distribuída é aquela alocada nas instalações elétricas dos consumidores, na rede de distribuição [10]. Esta concepção de geração tem a vantagem de proporcionar diminuição das perdas elétricas do sistema, graças à proximidade da geração com as unidades consumidoras. Outra questão é o fato de a mesma, em geral, ser de característica renovável, destacando-se aquelas advindas de painéis fotovoltaicas, apesar de ser possível gerar eletricidade também por meio de pequenas centrais hidrelétricas, pequenas turbinas eólicas ou, ainda, biodigestores.

A regulamentação nacional para mini e microgeração distribuída brasileira é regida pela Resolução nº 482 da ANEEL [7], tendo sido revisada em 2015 pela Resolução nº 687 da ANEEL [9]. Neste documento, há a classificação de dois tipos de geração:

- Microgeração distribuída: para potência instalada menor ou igual a 75kW;
- Minigeração distribuída: para potência instalada entre 75kW até 3MW, para fontes hídricas e 5MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou demais fontes renováveis de energia elétrica.

O sistema de compensação também é definido pela norma. Esta ocorre conforme o Art. 7º que estabelece como será feita a dedução da energia injetada na rede, contemplando eventual crédito de energia acumulado, utilização de crédito em residências com múltiplas unidades, geração compartilhada ou autoconsumo remoto, bem como a forma que deve ser feito o faturamento das unidades consumidoras.

1.2.2. Efeitos da inserção de fontes eólicas e fotovoltaicas de energia no sistema elétrico

Devido às particularidades intrínsecas das gerações de energia ora focadas, pode-se verificar distintos efeitos danosos correlatos à inserção destas na rede elétrica. Tais impactos variam em intensidade de acordo com a fonte de geração, o ponto de conexão, as variações da fonte primária, da rede elétrica, as cargas do consumidor (no caso de geração distribuída), etc. [11].

No presente estudo, serão considerados tão somente a inserção de parques eólicos e fazendas fotovoltaicas no sistema interligado nacional (SIN) – rede básica – e inserção de geração distribuída fotovoltaica na rede de distribuição. As demais possibilidades e fontes não serão por ora contempladas pelo fato de se apresentarem de forma diminuta no sistema elétrico nacional.

Dentre os impactos mais relevantes, advindos desta inserção de geração eólica e fotovoltaica, de uma forma geral, os seguintes efeitos podem ser enumerados [12]:

a) Sobrecarga:

Ao injetar a nova geração na rede, um dos possíveis efeitos encontrados é a sobrecarga de linhas e equipamentos, por injetar uma corrente superior à nominal destes e consequente aumento nas perdas térmicas. Os picos de geração podem também causar sobrecargas súbitas, estas mais complexas de serem detectadas pelo sistema de proteção.

b) Sobretensões e Subtensões:

As sobretensões são os efeitos mais proeminentes deste cenário, e ocorrem com maior constância quando uma grande quantidade desta geração é conectada em pontos extremos de uma rede fraca. As subtensões também podem ocorrer, todavia de forma mais rara. Já as variações de tensão de curta duração são fenômenos pouco estudados no âmbito aqui focado, consequentemente não serão por ora abordados.

c) Harmônicos:

Conforme já mencionado, as conexões destas gerações renováveis com a rede ocorrem via inversores de frequência, os quais, por sua vez, são potenciais geradores de distorções harmônicas de corrente [13]. E como consequência da propagação destas distorções na rede, distorções harmônicas de tensão podem surgir.

d) Flutuação de Tensão:

Outro possível efeito que pode ocorrer, porém com menor frequência, é a flutuação de tensão, a qual pode ser causada por variações na injeção de potência dos inversores de conexão.

e) Desequilíbrios de Tensão:

Os desequilíbrios devem ser considerados como consequência de fontes de geração distribuídas monofásicas, todavia é também um efeito pouco explorado na literatura científica relacionado ao tema deste trabalho.

f) Fluxo Reverso de Potência:

Em determinados casos – principalmente em momentos de baixa carga e alta geração – é possível que haja fluxo reverso de potência nas redes de distribuição (geração distribuída). Tal situação pode afetar diversos equipamentos de proteção e monitoramento da rede, visto que, o fluxo de potência reverso nem sempre é uma situação prevista em sistema convencionais de distribuição, o que pode levar a mau funcionamento de equipamentos ou ocasionar interrupções desnecessária de circuitos.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos efeitos danosos anteriormente elencados, bem como sua abrangência em função do tipo tecnologia empregada.

Tabela 1 - Quadro resumo dos possíveis efeitos danosos da inserção de fontes eólicas e fotovoltaicas no sistema elétrico.

Efeito	Parque Eólico	Fazenda Fotovoltaica	Geração Distribuída Fotovoltaica	Observações
Sobrecargas	x	x	x	impacto nos alimentadores
Sobretensões			x	
Subtensões				baixa incidência
Harmônicos	x	x	x	propagação no sistema
Flutuações de Tensão	x	x	x	baixa incidência
Desequilíbrios de Tensão			x	sistemas monofásicos e bifásicos de geração
Fluxo Reverso de Potência			x	impacto nos sistemas de proteção

1.2.3. Capacidade de Hospedagem

Ao se observar todas as variáveis de inserção da geração eólica (parques) e fotovoltaica (fazendas ou geração distribuída), é possível encontrar um ponto limite para esta inserção na rede elétrica de alta, média ou baixa tensão. Esse ponto máximo tolerável de inserção de geração renovável é conhecido por capacidade de hospedagem. De acordo com [13] a definição de capacidade de hospedagem é a quantidade máxima de geração dispersa, ou distribuída, que é suportada pela rede em um ponto específico do sistema de distribuição. Todavia, esta definição é facilmente estendida para geração eólica e fotovoltaica concentradas. O limite em si pode ser definido de diversas formas, seja por normas internas das concessionárias, normas nacionais e/ou internacionais, ou ainda limites dos equipamentos e cabos bem como atuação de mecanismos de proteção da rede. Este limite pode contemplar distintos indicadores, conforme será explanado.

Na Figura 4 é possível visualizar um gráfico que ilustra, de forma genérica, a deterioração da rede em função da injeção de potência proveniente de sistemas de geração de natureza eólica ou fotovoltaica [14]. Assim sendo, a capacidade de hospedagem é determinada no ponto em que tal deterioração ultrapassa um limite pré-estabelecido.

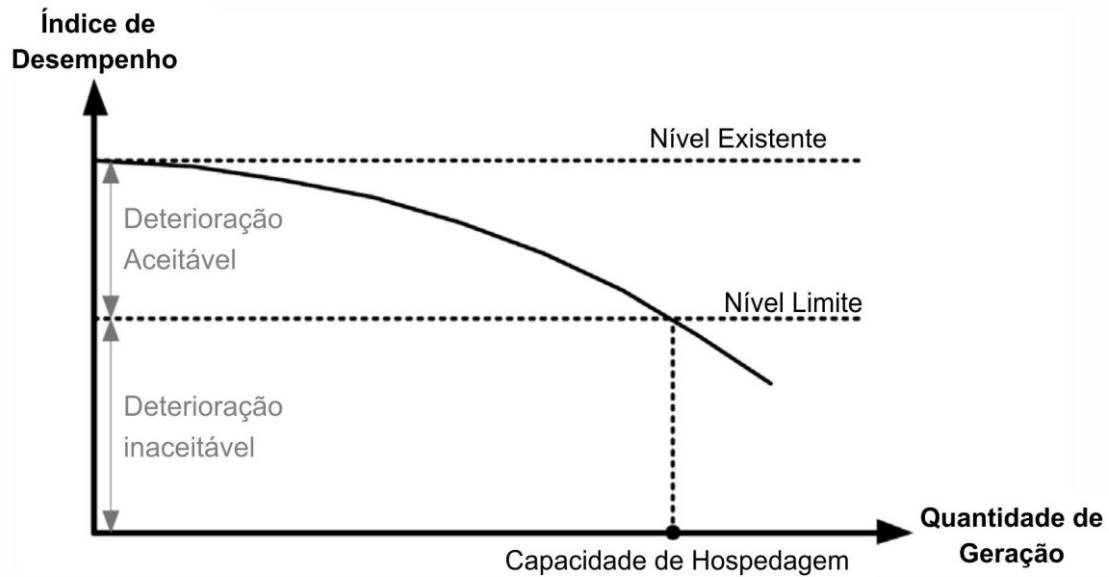


Figura 4 - Gráfico genérico de determinação da capacidade de hospedagem em um determinado ponto da rede em função da inserção de geração dispersa.

Vale ainda ressaltar que esta deterioração dos índices de desempenho pode ser correlacionada não apenas com conexões de novas gerações na rede, mas também para cargas não lineares de uma forma geral. Um emprego do termo capacidade de hospedagem, na rede de distribuição, que tem ganhado relevância, é a capacidade de hospedagem de veículos elétricos, ou melhor, de dispositivos de recarga destes veículos, conforme é mencionado na próxima seção.

1.3. ESTADO DA ARTE

Não há, ainda, uma normatização de quais variáveis devem ser utilizadas para determinar a capacidade de hospedagem em um barramento de um sistema. Trabalhos como [15] e [16] levam em consideração efeitos térmicos e variações de tensão de curta

e longa duração. Em [17] é analisado, além dos parâmetros abordados nas referências que antecedem o comportamento do sistema de proteção em relação à capacidade de condução de corrente, seletividade e fluxo de potência para o cálculo da capacidade de hospedagem.

Analizando a referência [18], a mesma utiliza o conceito de capacidade de hospedagem para definir a quantidade de cargas não lineares – neste caso em particular, carregadores de veículos elétricos – que podem ser conectados em um ponto da rede até que se atinja o limite de sua tolerância em termos de potência. Ainda, na linha de recarga de veículos elétricos, [19] analisa a integração destes a uma rede, visto que a inserção de múltiplos carregadores causa injeção de harmônicos na rede, devido a utilização de conversores não lineares, e como a integração da rede inteligente (*smart grid*) pode diminuir os impactos e possibilitar um número maior de carregadores simultâneos conectados à rede.

Em [20] é feito um estudo estocástico sobre possíveis cenários de implantação de geração fotovoltaica em uma rede de distribuição considerando como variáveis limitadoras as sobretensões, as variações de tensão e os desbalanceamentos de fases.

O trabalho [21] estuda efeitos de sobretensão devido à inserção de fontes de energia fotovoltaica em um sistema elétrico na Turquia. Este documento considera a legislação local para a conexão de uma geração à rede, analisando desde pequenos sistemas residenciais (micro e minigeração distribuída) até grandes plantas fotovoltaicas (fazendas). Complementarmente, é realizado um estudo de caso de cálculo da capacidade de hospedagem considerando a sobretensão como fator limitante para penetração da nova geração fotovoltaica.

A abordagem utilizada em [22] difere um pouco das demais, por analisar e criticar a metodologia utilizada para cálculo de capacidade de hospedagem em trabalhos recentes, visto que há um esforço acadêmico em relação a este assunto – segundo o trabalho. Tal trabalho conclui que a eficiência de cada método está ligada diretamente às variáveis de cada sistema, e satisfazer todas as partes interessadas – por parte interessada nesse artigo entende-se variáveis como tensão, corrente, equilíbrio de fases, fluxo de potência, etc. – é algo impossível com as metodologias atuais.

O artigo [23] analisa a relação custo benefício de diversas formas de integração de geração fotovoltaica e eólica à rede, dentre estudos de fatores limitadores para a nova geração no cenário chinês. Através de um estudo de caso considerando a inserção eólica em três diferentes regiões da China, o trabalho detecta que os principais obstáculos para a disseminação deste tipo de energia são inerentes a características de infraestrutura disponível, consumo e intermitência dos ventos em cada região.

É possível encontrar uma interessante análise em [24] comparando a inserção de geração fotovoltaica em média e baixa tensão. O estudo analisa o impacto causado na rede de média tensão, quando painéis fotovoltaicos são conectados à rede de baixa tensão. Simulações em uma rede britânica real demonstram que o gargalo está na baixa tensão, e que estudos em média tensão que não integram a baixa tensão podem resultar em cálculos errados, observando que a propagação de uma inserção em baixa tensão pode atingir a rede de média tensão.

Existem também trabalhos cujo foco é demonstrar métodos para incrementar a capacidade de hospedagem, como em [25], onde é proposta uma restrição na geração de fontes de energia centralizadas para não exceder a capacidade de um dado barramento,

possibilitando maior penetração da potência gerada nas fontes distribuídas. Já em [26] é feito uma análise de custo benefício das diversas maneiras de aperfeiçoar a capacidade de hospedagem para usinas eólicas sem necessidade de construção de nova infraestrutura. Ainda nesta linha de raciocínio, [27] faz um estudo que considera os gargalos para injeção de potência, bem como estratégias para aumento da capacidade de hospedagem, subdividindo as mesmas em estáticas e dinâmicas. O artigo afirma que a forma estática (inserção de banco de capacitores e reatores) se mostra bem eficiente, já a dinâmica (inserção de reguladores eletrônicos) tem seu desempenho fortemente dependente da integração da rede em uma *smart grid*, quanto mais integrada for a rede, mais versátil esta será para acomodar a geração dispersa proveniente das novas fontes de energia.

Estudos de capacidade de hospedagem até recentemente não integravam harmônicas, assunto que passou a ser visto com maior frequência em trabalhos mais recentes. Com a crescente importância de ambos os assuntos – capacidade de hospedagem e harmônicas – a integração destes é essencial. Em [28] é proposto uma nova abordagem para o estudo de harmônicas no que tange à capacidade de hospedagem, sugerindo que esta deve considerar seus efeitos na fase inicial, de planejamento, ao invés de se comportar apenas como um estudo pós-inserção.

O artigo [29] traz, de forma pioneira, para o estudo de capacidade de hospedagem a análise de harmônicos. Este faz um levantamento teórico para limitação genérica da capacidade de hospedagem considerando harmônicos e depois propõe um estudo de caso considerando uma rede rural típica da Irlanda. O estudo conclui que a incorporação da distorção total de tensão (DTT) e distorção individual de tensão (DIT) são relevantes nas considerações de capacidade de hospedagem e que estudos mais profundos com dados

mais realísticos devem ser realizados para validação. A mesma linha de raciocínio é aplicada em [30] para sistemas eólicos, que considera em seu estudo de caso a substituição da forma convencional de geração por esses. Tal estudo conclui que além dos harmônicos há também a injeção de interharmônicos – estes conhecidos por causarem o efeito flicker – e outros harmônicos não característicos na rede, bem como a existência de pontos de ressonância do parque com a rede que variam conforme o nível de curto circuito desta.

Padronizar a metodologia para aplicação de análise de conteúdo harmônico na inserção de geração distribuída, parques eólicos e fazendas fotovoltaicas, é um assunto muito recente. Porém metodologias para cálculo e estimativa de capacidade de hospedagem harmônica são objetos de alguns trabalhos, como em [31] onde é proposta uma forma detalhada de chegar a um número de potência denominado capacidade de hospedagem para um dado ponto do sistema baseado no estudo de penetração harmônica. Este trabalho também disserta brevemente sobre questões de agregação de harmônicas, visto que a soma fasorial de diferentes usinas fotovoltaicas ou eólicas instaladas próximas ou em um mesmo barramento dificilmente é igual à soma algébrica e o fator de agregação destas afeta diretamente a capacidade de hospedagem harmônica de um barramento qualquer analisado.

A interação entre as correntes harmônicas inseridas pela novas fontes de energia é analisada em [32]. Esta ainda estuda condições críticas na propagação de harmônicas do sistema proposto por este, que é quando o banco de capacitores deste está ativo e durante o dia, quando a geração distribuída – fotovoltaica – está injetando potência na rede. Neste os critérios utilizados como limite para capacidade de hospedagem são DTT e DIT especificadas pelas resoluções normativas IEEE-519 [33] e IEEE-1547 [34].

Desta última cabe citar e enumerar suas séries relevantes neste trabalho, como a IEEE-1547-1 [35] que traz recomendações de testes e procedimentos para verificação de conformidade de sistemas e equipamentos de geração distribuída, a IEEE 1547-2 [36] que traz aspectos técnicos e detalhes de aplicação da norma raiz, a IEEE 1547-3 [37] para monitoramento, obtenção de dados e controle da geração distribuída, seguida pela IEEE 1547-4 [38] que orienta sobre a operação e integração de geração distribuída em redes isoladas e por último a IEEE 1547-6 [39] que traz recomendações para conexão de fontes de geração distribuída com redes de distribuição secundárias.

A injeção de correntes harmônicas ocorre de forma arbitrária, utilizando dois perfis de comportamento de inversores, o primeiro com distorção individual de corrente abaixo de 3% e o segundo acima de 5%, e considerando distorções pré-existentes (*background distortion*). A análise das tensões resultantes é feita em barramento de média tensão.

Em [40] o estudo considera a IEEE 519 [33] como o fator limitante em um cálculo de capacidade de hospedagem envolvendo harmônicos. Este não deixa de levar em consideração a sobretensão, todavia inclui as restrições harmônicas e utiliza de um algoritmo para determinar a capacidade de hospedagem de um sistema industrial genérico com inserção de geração fotovoltaica. Este trabalho ainda propõe a inclusão de um filtro harmônico para maximizar a capacidade de hospedagem e adicionalmente preservar outros parâmetros dentro de valores desejáveis, tal como sobretensões.

O trabalho [14], além de ilustrar graficamente a conceituação de capacidade de hospedagem para distorção harmônica, faz um estudo de caso empregando um sistema brasileiro, utilizando duas situações distintas: melhor e pior caso. A definição de pior

caso, neste artigo, é aplicada quando a soma fasorial da corrente proveniente da geração e do sistema é igual à algébrica. Por outro lado, a melhor situação é data quando estas fontes possuem defasagem de 180º, ou seja, são subtrativas entre si.

1.4. CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

As seções precedentes expuseram o contexto e observações da capacidade de hospedagem. Os trabalhos existentes na área trazem abordagens que abrangem as principais variáveis que afetam a capacidade de hospedagem em função da inserção de geração distribuída fotovoltaica, grandes parques eólicos e fazendas solares.

O presente trabalho de pesquisa pretende, num primeiro momento, sistematizar os distintos fatores impactantes no cálculo da capacidade de hospedagem, bem como apresentar uma visão geral do estado da arte sobre o tema seguido de uma avaliação dos os equacionamentos e estratégias existentes destinados ao cálculo desta capacidade que o sistema de distribuição ou mesmo transmissão tem para a inserção destas fontes alternativas.

Complementarmente, almeja-se, também, neste estudo dissertativo, o estabelecimento de um processo integrado de cálculo de capacidade de hospedagem, o qual incorporará os principais fatores limitantes desta inserção de geração eólica e fotovoltaica. Tal procedimento terá sua avaliação de desempenho feita via estudo de caso computacional.

Por fim, ainda como contribuição desta dissertação, destaca-se a proposição de uma ferramenta gráfica voltada para o estudo de capacidade de hospedagem em termos de harmônicos.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, a presente dissertação encontra-se assim estruturada:

Capítulo II – Procedimentos para o Cálculo da Capacidade de Hospedagem

Neste capítulo serão apresentados e/ou estabelecidos os equacionamentos necessários para o cálculo da capacidade de hospedagem, considerando, para tanto, variáveis como sobretensão, sobrecarga e harmônicos.

Capítulo III – Avaliação de Desempenho dos Procedimentos de Cálculo de Capacidade de Hospedagem via Implementação Computacionais

Após os desenvolvimentos matemáticos do Capítulo II, esta seção está voltada à avaliação, via implementação computacional, dos distintos processos/estratégias de cálculo de capacidade de hospedagem.

Capítulo IV – Contribuição ao Cálculo de Capacidade de Hospedagem em termos de Harmônicos

Neste capítulo são apresentados alguns desenvolvimentos complementares realizados com o intuito de trazer avanços à estimativa da capacidade de

hospedagem em função dos harmônicos que serão gerados e aqueles já existentes no sistema. Trata-se, em verdade, da proposição de uma ferramenta gráfica para uma melhor visualização e análise desta hospedagem harmônica em sistemas elétricos.

Capítulo V – Conclusões

Por fim, tem-se nesta secção uma conclusão geral do trabalho desenvolvido, bem como lacunas e desdobramentos que se fazem ainda necessários nesta linha de pesquisa.

Referências Bibliográficas

Encontra-se nesta seção a listagem de todo o material bibliográfico utilizado como base para desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO II

PROCEDIMENTOS PARA O CÁLCULO DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Observando o disposto no Capítulo I, na Seção 1.3, onde se apresenta o estado da arte do tema em questão, conclui-se que em um primeiro momento, dos estudos sobre capacidade de hospedagem, fatores como sobretensão e sobrecorrente eram os mais abordados, por serem os efeitos mais comuns de ocorrer quando da entrada de novas fontes de geração no sistema. Porém, com o avanço da tecnologia na área de eletrônica de potência, mais especificamente inversores, e a introdução de novas fontes de energia, principalmente eólica e fotovoltaica, cresceu a preocupação com harmônicos no sistema.

Neste Capítulo II serão detalhados procedimentos matemáticos e/ou computacionais para o estabelecimento de valores de capacidade de hospedagem no sistema elétrico. E, levando-se em conta as considerações já tecidas, a capacidade de hospedagem será tratada em termo dos principais indicadores correlatos à mesma nos dias atuais, a saber: sobretensão, sobrecarga (ou sobrecorrente) e harmônicos.

2.2. CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DE SOBRETENSÃO

A capacidade de hospedagem do sistema para inserção de novas fontes de energia (eólica ou fotovoltaica) pode ser afetada diretamente pelos limites estabelecidos para as tensões, sobretudo, quando se considera os limites de sobretensão nos sistemas de distribuição. Portanto, tal indicador, neste trabalho dissertativo, será tratado em função das normas relacionadas com a rede de distribuição. Neste ínterim, serão levadas em conta somente as chamadas GDs (gerações distribuídas) oriundas de fontes renováveis.

Em se tratando de inserção de GDs, trabalhos científicos, conforme destacado no estado da arte aqui apresentado, mostram preocupações com a elevação dos níveis de tensão em pontos da rede de distribuição devido à mesma (inserção). Tal processo será, a partir de agora, melhor detalhado.

A principal razão da elevação da tensão nos pontos de acoplamento de GDs está diretamente ligada à variação do fluxo de energia reativa do sistema e, consequentemente, um excesso desta em certos pontos do sistema. Para ilustrar tal processo, considere o exemplo genérico, de alimentador de distribuição, mostrado na Figura 5.

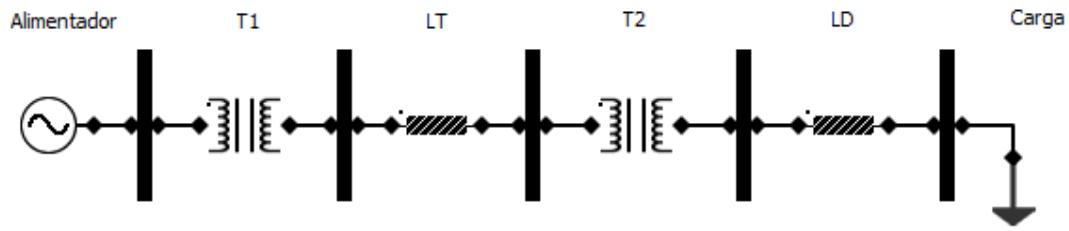


Figura 5 - Alimentador hipotético de distribuição.

Neste circuito, os transformadores (T1 e T2) têm seus TAP alterados de modo a compensar as quedas de tensões. No que tange os níveis de tensões, estes são adequados via correção de fator de potência, ou seja, com inserção de banco de capacitores no sistema da concessionária e/ou no interior das plantas consumidoras industriais e comerciais, conforme ilustrado na Figura 6. A quantidade de reativo capacitivo depende, evidentemente, do comprimento da rede, das reatâncias percentuais dos transformadores, das cargas, entre outros.

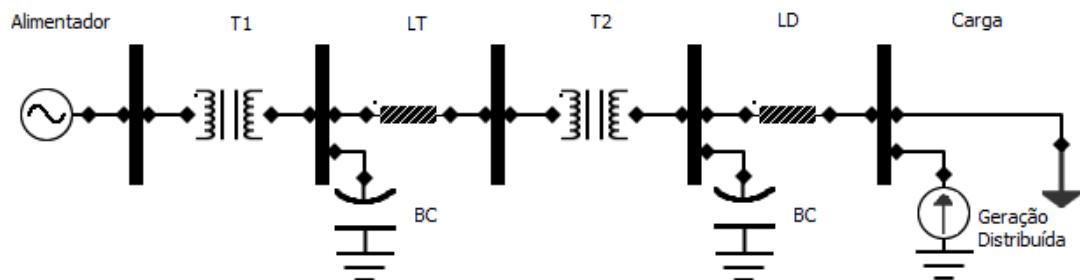


Figura 6 - Alimentador hipotético de distribuição com bancos de capacitores e geração distribuída.

Uma vez conectada GDs que utilizam inversores de conexão – e são configurados para trabalhar com fator de potência unitário – no ponto de consumo, conforme Figura 6, parte da potência ativa será fornecida por esta. Isto levará a um aumento da potência

reativa disponível neste ponto, haja vista que não haverá, nesta situação, necessidade de correção de fator de potência na mesma magnitude anteriormente feita, dada a mudança do fluxo de potência. Do ponto de vista da concessionária, tal efeito é visto negativamente pois além de poder influenciar no módulo da tensão, também piora o fator de potência.

A sobra de potência reativa capacitativa em sistemas elétricos está diretamente vinculada à elevação da magnitude da tensão [44], levando a possíveis violações de limites superiores de níveis de tensão. Em outras palavras, haverá um valor, dependendo do sistema de distribuição, do ponto de conexão e das normas vigentes, máximo de potência de GDs que podem ser hospedadas na rede sem que tais valores de sobretensão sejam violados.

Em termo de normas nacionais para os níveis de tensão em regime permanente na rede distribuição, são considerados os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), os quais estabelecem em seu Módulo 8 [41] definições e valores limites para variações de tensão em regime permanente, que estão apresentados nas Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, retiradas na norma em questão.

Tabela 2 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,93\text{TR} \leq \text{TL} < 0,95\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,07\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,93\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TR}$

Tabela 3 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69kV e inferior a 230kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,90\text{TR} \leq \text{TL} < 0,95\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,07\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90\text{TR}$ ou $\text{TL} < 1,07\text{TR}$

Tabela 4 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,90\text{TR} \leq \text{TL} < 0,93\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90\text{TR}$ ou $\text{TL} < 1,05\text{TR}$

Tabela 5 - PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 1kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,92\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,87\text{TR} \leq \text{TL} < 0,92\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,06\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,87\text{TR}$ ou $\text{TL} < 1,06\text{TR}$

Este documento também estabelece indicadores de qualidade desta tensão em regime permanente, sendo eles: o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o para tensão crítica (DRC).

Conforme a Figura 7, a contabilização do índice DRP ocorre quando a tensão ultrapassa os valores pré-determinados e se encontram na faixa amarela, seja na faixa inferior ou superior. Análise semelhante pode ser feito com o DRC, que por sua vez é representado pela faixa vermelha [41].

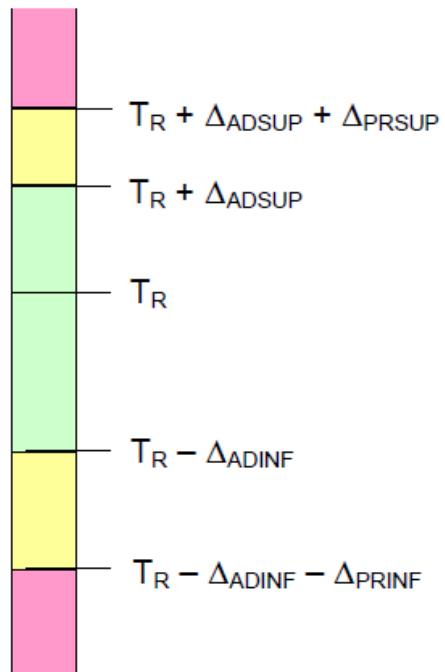


Figura 7 - Faixas de Tensão em relação à Referência.

Sendo: T_R a Tensão de Referência, Δ_{ADSUP} e Δ_{PRSUP} são respectivamente os intervalos superiores de faixa de Tensão Adequada e Precária, enquanto, Δ_{ADINF} e Δ_{PRINF} são respectivamente os intervalos inferiores de faixa de Tensão Adequada e Precária.

Os indicadores supracitados são calculados utilizando como base as medições compostas por 1008 leituras válidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, salvo os expurgos conforme a norma [41]. Estes índices são então calculados da seguinte forma:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} 100 [\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} 100 [\%] \quad (2)$$

Onde: nlp e nlc representam o maior valor, entre as fases, do número de leituras na faixa precária e crítica, respectivamente [41]. Tais indicadores são associados a um mês civil e cada conjunto de 1008 leituras representa um indicador destes, sendo que o valor a ser considerado no mês é a média dos valores calculados dentre todos os conjuntos de leituras válidas. Neste trabalho, o efeito de sobretensão é o que se manifesta mais comumente nas condições dadas, sendo este objeto de análise em eventuais nas análises posteriores de DRP e DRC.

Assim sendo, nota-se que as sobretensões, no Brasil, são quantificadas através dos índices DRP e DRC, os quais possuem valores limites. Todavia, a capacidade de hospedagem, neste trabalho, se restringirá à análise das magnitudes das tensões, em consonância com as tabelas do PRODIST [41], o que, via de regra, é limitado em 5% de sobretensão em relação à tensão nominal do barramento.

Ademais, devido à complexidade da rede de distribuição, a avaliação de capacidade de hospedagem em termos de sobretensão será, neste trabalho de pesquisa,

realizada via implementação computacional da rede e estudo de distintos cenários de inserção de GDs na mesma. Tal processo será melhor esmiuçado, na sequência, no Capítulo 3.

2.3. CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DE SOBRECORRENTE/SOBRECARGA

Os distintos elementos constituintes do sistema elétrico, seja no setor de geração, transmissão ou distribuição, possuem limite térmico para condução de corrente sem que haja prejuízo ao tempo de vida útil ou suportabilidade térmica ou mesmo ocorrências de mal funcionamento (falhas). A capacidade de condução de corrente dos condutores elétricos é determinada por um conjunto de fatores, como seção transversal, cobertura dos condutores, disposição destes, material, temperatura externa, etc. Na atualidade é possível encontrar em catálogos de fabricantes, tabelas padronizadas para capacidade de condução de corrente de cada tipo de condutor, considerando as diversas características construtivas dos cabos.

Quando se trata de transmissão de energia elétrica, os cabos são tipicamente desprovidos de cobertura ou isolação, sendo composto apenas do condutor e da alma de aço (esta, quando aplicável). A isolação necessária é então aplicada diretamente nas torres de transmissão utilizando isoladores (por exemplo, os de porcelana), garantindo uma separação mínima dos cabos entre si e o solo.

Todavia, os efeitos da sobrecarga ou sobrecorrente possuem maior aplicabilidade quando envolve estudos de inserção de geração distribuída, ou seja, quando se considera a rede de distribuição de energia. Estes efeitos variam em função do local de instalação, da tecnologia aplicada na rede bem como do carregamento do sistema, porém podem exibir um comportamento similar na efetiva diminuição das perdas em termos da potência de geração distribuída instalada. A Figura 8 [45] exemplifica este comportamento ao analisar a inserção de geração fotovoltaica em uma rede elétrica de distribuição.

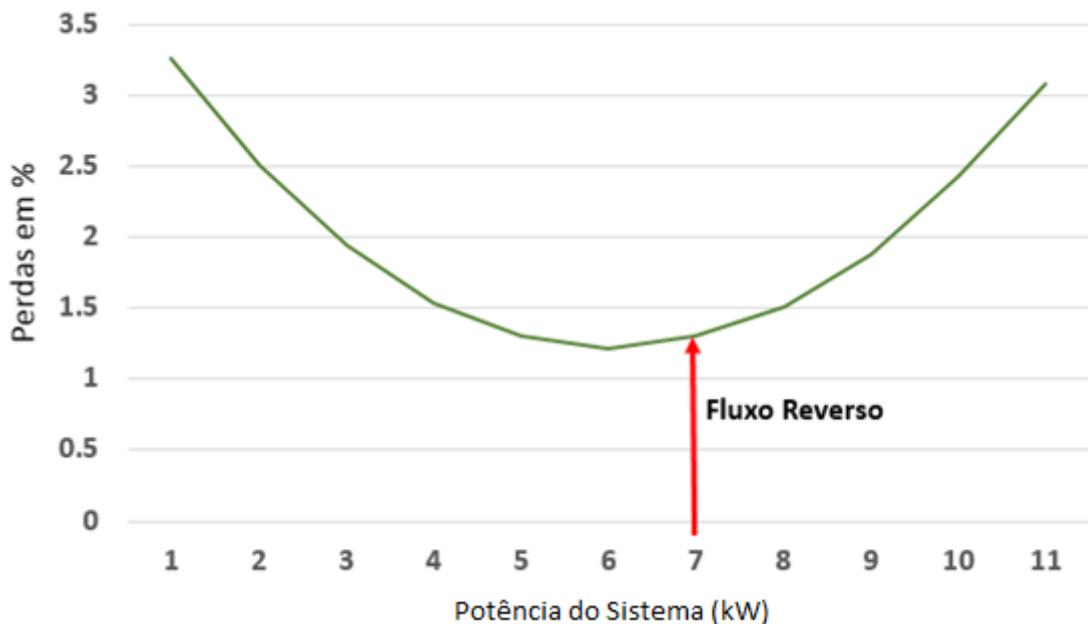


Figura 8 - Gráfico de perdas em função da potência de um sistema de geração distribuída instalado em uma rede de distribuição.

Ressalta-se que este é o padrão tipicamente encontrado de comportamento da efetiva variação das perdas no sistema elétrico em função do aumento da inserção de geração distribuída, neste caso fotovoltaico. Tal curva mostra a característica desta

inserção em termos de eficiência energética. Percebe-se, num primeiro momento, que há uma diminuição nas perdas do sistema. A partir de um determinado certo ponto de mínimo há uma inversão neste quadro de aumento da eficiência energética, o que ocorre justamente no momento de inversão do fluxo de potência. Tal ponto de inversão varia com cada rede dependendo de suas características e do carregamento local – carga baixa, média ou alta. A partir do ponto de inversão do fluxo (ponto de mínimo da curva), as perdas passam a elevar-se. Parte importante no trabalho de análise de capacidade de hospedagem é entender em qual momento as perdas se tornam inaceitáveis ou, ainda, em que momento o alimentador terá seu limite de condução de corrente violado.

No trabalho em questão será considerado, para efeitos de cálculo de capacidade de hospedagem, o momento em que a corrente ultrapassa o valor limite de capacidade de condução de corrente do condutor ou ainda de dispositivos diversos constituintes da rede de distribuição (transformadores, filtros, etc). Esta análise será realizada a partir de modelagem da rede de distribuição a ser estudada, conduzindo avaliações com distintos cenários de inserção de geração distribuída na mesma.

2.4. CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DE HARMÔNICOS

O cálculo da capacidade de hospedagem em termos de harmônicos é realizado através da determinação da máxima corrente harmônica admissível antes que um limite de distorção individual de tensão seja violado. Tal análise é feita para cada ordem

harmônica, tomando por base um determinado instante de funcionamento do sistema.

Este parâmetro pode ser empregado tanto em avaliações na rede básica, no tocante à inserção de parques eólico e fazendas fotovoltaicas, quanto na rede de distribuição.

Neste contexto, verifica-se normas e recomendações voltadas ao estabelecimento de valores limites ou de referência para os harmônicos presentes no sistema elétrico.

Dentre estes documentos, destaca-se:

- IEEE-519-1992 [33]: esta descreve os principais fenômenos que causam a distorção harmônica, bem como estabelece limites harmônicos no ponto de acoplamento. Em termos de níveis de tensão abrange todos os níveis a partir de 120 V. Tal norma foi revisada em 2014, trazendo atualizações e adequações à realidade do sistema.
- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), Módulo 8 [41]: norma brasileira que disserta sobre a qualidade da energia elétrica. Neste módulo, dentre outros, é estabelecido limites para tensões harmônicas, bem como definição de termos para estudos harmônicos. Abrange circuitos de baixa, média e alta tensão.
- IEC 61000-3-6 [42] da *International Electrotechnical Commission* (IEC), a qual é referente às limitações de correntes injetadas na rede de média, alta e extra alta tensão.
- Procedimento de Rede do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro), Submódulo 2,8 [43]: estabelece os parâmetros mínimos de qualidade, destacando-se limites de distorções harmônicas de tensão para a rede básica nacional (tensão acima de 200kV).

No que se refere ao estabelecimento de valores de capacidade de hospedagem, quanto a questão das distorções harmônicas, o principal procedimento encontrado na literatura pertinente [31] é na sequência descrito. Tal processo é capaz de calcular a capacidade de hospedagem em função das correntes harmônicas injetadas pela geração

distribuída a ser conectada, a partir de informações de parâmetros elétricos do sistema, tais como: impedância harmônica equivalente e *background distortion* de tensão.

Tem-se na Figura 9 um circuito genérico equivalente de Thévenin, o qual embasará a descrição do procedimento de cálculo de capacidade de hospedagem.

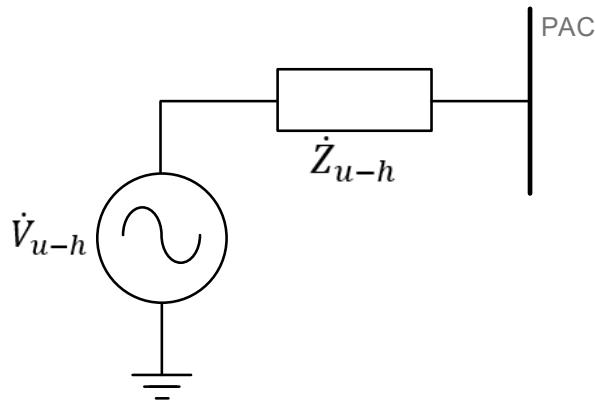


Figura 9- Equivalente de Thévenin para harmônicas de ordem h .

Nesta figura: \dot{V}_{u-h} representa a tensão de uma dada ordem h harmônica em um ponto de acoplamento genérico (*background distortion*) e a impedância \dot{Z}_{u-h} é a impedância equivalente de mesma ordem harmônica da rede elétrica da concessionária.

Este arranjo pode ser transformado em um circuito equivalente de Norton, o qual é mostrado na Figura 10.

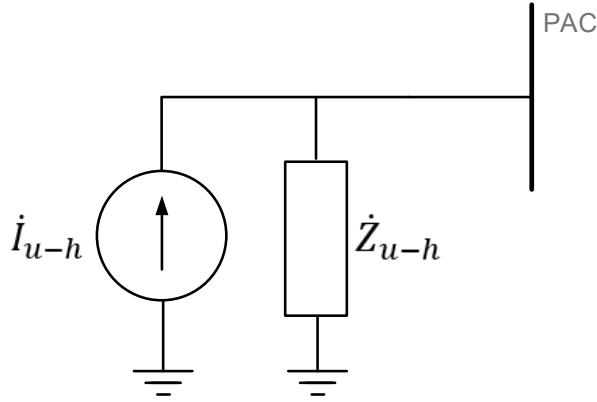


Figura 10 - Equivalente de Norton para harmônicas de ordem h .

Neste arranjo: \dot{I}_{u-h} é o valor equivalente de corrente harmônica gerada no sistema de ordem h .

Nestes termos, a capacidade de hospedagem harmônica pode ser definida como o valor máximo de corrente harmônica de ordem h que pode ser injetada no Ponto de Acoplamento para que a tensão de mesma ordem atinja o valor máximo aceitável – este determinado através de normas – e pode ser calculado pela equação (3) [31]:

$$(\dot{I}_{u-h} + \dot{I}_{HC-h}) \cdot \dot{Z}_{u-h} = \dot{V}_{limite-h} \quad (3)$$

O fasor de tensão limite $\dot{V}_{limite-h}$ é atingido quando a corrente injetada atinge o valor genérico de \dot{I}_{HC-h} que representa a capacidade de hospedagem em função da corrente harmônica máxima a ser injetada por um novo sistema acoplado à rede. Assumindo a forma de fasores para \dot{I}_{u-h} e \dot{I}_{HC-h} tem-se que $\dot{I}_{u-h} = \dot{I}_{u-h}\angle\alpha$ e $\dot{I}_{HC-h} = \dot{I}_{HC-h}\angle\beta$ e na soma fasorial, o mínimo valor de capacidade de hospedagem é encontrado quando:

$$\dot{I}_{HC-h} = -\dot{I}_{u-h} + \frac{\dot{V}_{limite-h}}{\dot{Z}_{u-h}} \quad (4)$$

Por outro lado, o máximo valor para a capacidade de hospedagem ocorre quando os ângulos α e β se opõem, ou seja, quando $\alpha - \beta = 180^\circ$. Nesse caso, a equação de inserção de corrente I_{HC-h} será:

$$I_{HC-h} = I_{u-h} + \frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}} \quad (5)$$

Para uma situação onde não há distorção prévia (*background distortion*), pode-se concluir que a capacidade de hospedagem é dada por:

$$I_{HC-h} = \frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}} \quad (6)$$

Para o caso da existência de distorção prévia, geralmente tem-se a medição de tensão harmônica no PAC, podendo se obter a corrente de distorção de *background* através da equação (7):

$$I_{u-h} = \frac{\dot{V}_{u-h}}{\dot{Z}_{u-h}} \quad (7)$$

Para este caso, a tensão harmônica no PAC é dada pela equação (3) já exibida anteriormente, atingindo a capacidade de hospedagem quando:

$$\dot{V}_{pac-h} = \dot{V}_{limite-h} \quad (8)$$

No presente trabalho, será considerado, para efeito de estudo de casos, o valor máximo de $\dot{V}_{limite-h}$, como sendo aquele estabelecido nos Procedimentos de Rede do ONS [43]. A Tabela 6 evidencia valores limite para tensões acima de 13,8 kV.

Tabela 6 – ONS: Limites individuais de distorção de tensão em porcentagem da tensão fundamental.

$13,8 \text{ kV} \leq V < 69 \text{ kV}$				$V \geq 69 \text{ kV}$			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todas	0,6%			todas	0,3%
≥ 27	1,5%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95 = 1,5%			

Caso o processo de cálculo de capacidade de hospedagem seja realizado via o equacionamento supracitado, tem-se a determinação de valores máximos de correntes harmônicas a serem injetadas, ou ainda, uma faixa máxima definida pelas situações de melhor e pior cenários. Todavia, caso haja necessidade de se obter tal resultado de capacidade de hospedagem em função de potência instalada, leis de agregação e típicos valores de injeção de corrente, por parte dos arranjos de geração, deverão ser considerados. Outra possibilidade é proceder a modelagem computacional da geração (eólica ou fotovoltaica) e inseri-la no ponto de acoplamento, perfazendo-se, então, estudos com diferentes cenários de inserção.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram exibidos os principais fatores limitantes da capacidade de hospedagem em redes elétricas de distribuição e transmissão com vista à inserção de geração distribuída, parques eólicos e/ou fazendas fotovoltaicas. Complementarmente, encontra-se aqui descrito de forma detalhada os processos empregados na avaliação de

capacidade de hospedagem da rede. Também procurou-se esclarecer quais limites são mais pertinentes à cada fenômeno limitante desta capacidade.

Uma vez estabelecido os critérios de determinação da capacidade de hospedagem, tem-se, na sequência, a condução de estudos de caso de forma a realizar uma avaliação crítica dos procedimentos ora posto, bem como perfazer um aprofundamento nos processos de cálculo dos mesmos.

CAPÍTULO III

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DE CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM VIA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será conduzida uma avaliação de desempenho dos procedimentos para determinação da capacidade de hospedagem. Para tal, utilizar-se-á o sistema de 14 barras do IEEE que, em via de regra, é empregado em estudos de fluxo de potência e dinâmica de sistemas. O mesmo encontra-se, genericamente, ilustrado na Figura 11.

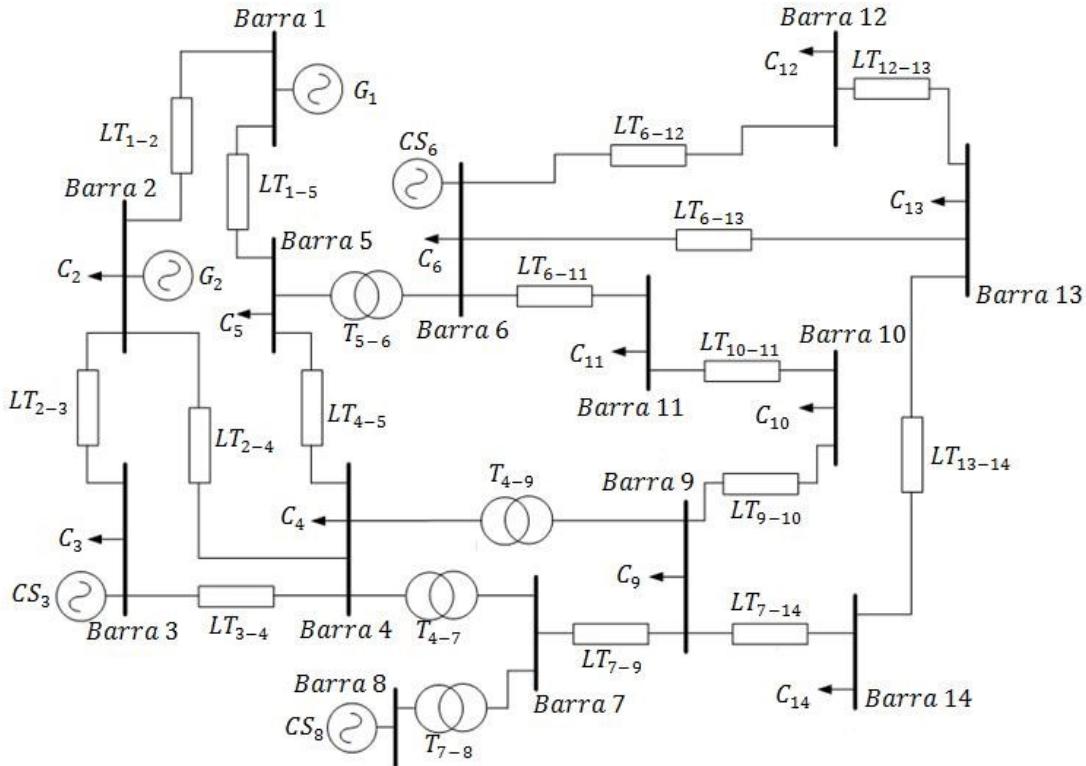


Figura 11 - Sistema IEEE 14 barras.

Nesta figura: LT são as linhas de transmissão, G são as fontes de geração concentradas, C representa as cargas, T os transformadores e CS os compensadores estáticos do sistema.

A opção pela utilização deste arranjo deu-se por conta de sua grande correlação com sistemas reais, além do fato que este sistema é amplamente difundido e utilizado no meio acadêmico. A implementação computacional será feita no *software Matlab/Simulink*, por se tratar de uma ferramenta computacional confiável, de fácil operação e amplamente empregada.

3.2. DETALHAMENTO DO SISTEMA TESTE – ARRANJO DE 14 BARRAS DO IEEE

Os principais parâmetros elétricos deste sistema de 14 barras do IEEE estão apresentados em Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10. Ressalta-se que as máquinas síncronas são caracterizadas por fontes ideais de tensão com suas respectivas impedâncias. No tocante aos transformadores, estes são parametrizados em consonância com o modelo existente e validadeos do *software* adotado, bem como as linhas de transmissão e as cargas, as quais são modeladas como impedância constante.

Tabela 7 - Parâmetros das máquinas síncronas do sistema 14 barras do IEEE.

Máquina Síncrona	Tensão Nominal (kV)	Potência Nominal (MVA)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
G_1	69	615	0	18,438
G_2	69	60	0,246	221,001
CS_3	69	60	0,246	221,001
CS_6	13,8	25	0,011	25,257
CS_8	18	25	0,011	25,257

Tabela 8 - Parâmetros das cargas do sistema 14 barras do IEEE.

Cargas $P+jQ$	Tensão Nominal (kV)	Potência Aparente (MVA)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
C_2	69	25,14	21,7	12,7
C_3	69	96,1	94,2	19,0
C_4	69	48,97	47,8	3,9
C_5	69	7,77	7,6	1,8
C_6	13,8	13,48	11,2	7,5
C_9	13,8	33,85	29,5	16,6
C_{10}	13,8	10,71	9,0	5,8

C_{11}	13,8	3,94	3,5	1,8
C_{12}	13,8	6,31	6,1	1,6
C_{13}	13,8	14,69	13,5	5,8
C_{14}	13,8	15,72	14,9	5,0

Tabela 9 - Parâmetros das linhas do sistema 14 barras do IEEE.

Linhos de Transmissão	Tensão Nominal (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Capacitância (μF)
LT_{1-2}	69	0,923	7,473	2,942
LT_{1-5}	69	2,572	28,168	2,741
LT_{2-3}	69	2,237	25,002	2,440
LT_{2-4}	69	2,767	22,267	2,084
LT_{2-5}	69	2,711	21,959	1,894
LT_{3-4}	69	3,190	21,599	1,928
LT_{5-4}	69	0,636	5,318	0,713
LT_{6-11}	13,8	0,181	1,005	-
LT_{6-12}	13,8	0,234	1,292	-
LT_{6-13}	13,8	0,126	0,658	-
LT_{7-9}	13,8	0	0,556	-
LT_{9-10}	13,8	0,061	0,427	-
LT_{9-14}	13,8	0,242	1,366	-
LT_{10-11}	13,8	0,156	0,970	-
LT_{12-13}	13,8	0,421	1,010	-
LT_{13-14}	13,8	0,341	1,758	-

Tabela 10 - Parâmetros dos transformadores do sistema 14 barras do IEEE.

Transformadores de Força	Relações Nominais de Tensões (kV)	Potência Nominal (MVA)	Reatância Percentual	Razão de TAP
T_{4-7}	69/13,8	50	7%	0,978
T_{4-9}	69/13,8	20	7%	0,969
T_{5-6}	69/13,8	45	7%	0,932
T_{7-8}	18/13,8	40	5%	1

No tocante à determinação dos valores de capacidade de condução de corrente, torna-se imprescindível o conhecimento de dados de cabos pré-existentes no modelo utilizado – sistema de 14 barras IEEE. Todavia, estes não estão disponíveis na literatura científica pertinente. Assim sendo, para efeitos do presente trabalho investigativo, é conduzida a seguinte estratégia para definição dos mesmos: conduzir a simulação do sistema em seu formato padrão com medições de corrente em todas as linhas de transmissão. Após isto, através de um catálogo de fabricante [46], será escolhido o cabo para estas linhas de transmissão com uma margem de 20%, considerando projeto com folga e variações do catálogo. Para os transformadores, será considerado que estes possuem sistema de ventilação forçada, comum em equipamentos instalados em redes de transmissão de energia elétrica, possibilitando uma sobrecarga de até 20% em regime permanente. Dadas estas considerações, os limites de corrente ficam estabelecidos conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Limites de condução de corrente estabelecidos para as Linhas de Transmissão e os Transformadores.

Linha de Transmissão / Transformador	Corrente Encontrada via Simulação (A)	Capacidade de Condução de Corrente Estabelecida (A)
LT_{1-2}	1324	1623 (<i>Bluebird</i>)
LT_{1-5}	616	745 (<i>Squab</i>)
LT_{2-3}	615	745 (<i>Squab</i>)
LT_{2-4}	437	555 (<i>Chickadee</i>)
LT_{2-5}	324	430 (<i>Waxwing</i>)
LT_{3-4}	242	310 (<i>Pigeon</i>)
LT_{5-4}	492	615 (<i>Pelican</i>)
LT_{6-11}	500	615 (<i>Pelican</i>)
LT_{6-12}	345	430 (<i>Waxwing</i>)
LT_{6-13}	831	1025 (<i>Ortolan</i>)

LT_{7-9}	1084	1315 (<i>Parrot</i>)
LT_{9-10}	116	175 (<i>Sparrow</i>)
LT_{9-14}	299	430 (<i>Waxwing</i>)
LT_{10-11}	348	430 (<i>Waxwing</i>)
LT_{12-13}	93	175 (<i>Sparrow</i>)
LT_{13-14}	336	430 (<i>Waxwing</i>)
T_{4-7}	-	502 (1,2pu) – lado AT
T_{4-9}	-	201 (1,2pu) – lado AT
T_{5-6}	-	452 (1,2pu) – lado AT
T_{7-8}	-	1540 (1,2pu) – lado AT

Ademais, o sistema estudado não possui, em suas configurações iniciais, a presença de harmônicos. Para conduzir este estudo de caso, serão inseridas fontes de corrente harmônica nas barras 3, 4, 6, 9, 13 e 14 do sistema, de modo a evidenciar uma prévia distorção harmônica neste arranjo de 14 barras. A Tabela 12 esclarece quanto à ordem harmônica, módulos e ângulos de inserção de tais fontes de corrente.

Tabela 12 - Fontes de distorção harmônica adicionadas ao sistema.

Barramento	\dot{I}_{5h} (A)	\dot{I}_{7h} (A)	\dot{I}_{11h} (A)	\dot{I}_{13h} (A)
3	$5,195\angle 222^\circ$	$3,445\angle 171^\circ$	$2,175\angle 167^\circ$	$1,695\angle 122^\circ$
4	$1,485\angle 167^\circ$	$0,85\angle 50^\circ$	$1,91\angle 256^\circ$	$1,485\angle -6^\circ$
6	$8,38\angle 2^\circ$	$5,73\angle 87^\circ$	$5,09\angle 240^\circ$	$3,82\angle 111^\circ$
9	$21,64\angle 105^\circ$	$15,49\angle 215^\circ$	$10,82\angle 51^\circ$	$9,33\angle 154^\circ$
13	$3,39\angle 153^\circ$	$2,76\angle 260^\circ$	$5,52\angle 92^\circ$	$3,5\angle 34^\circ$
14	$7,85\angle 137^\circ$	$7\angle 108^\circ$	$10,39\angle 222^\circ$	$3,86\angle 48^\circ$

Em termos percentuais em relação à corrente de ordem fundamental, os dados ficam conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Fontes de distorção harmônica adicionadas ao sistema em porcentagem em relação à ordem fundamental.

Barramento	\dot{I}_{5h} (%)	\dot{I}_{7h} (%)	\dot{I}_{11h} (%)	\dot{I}_{13h} (%)
3	0,65∠222°	0,43∠171°	0,27∠167°	0,21∠122°
4	0,37∠167°	0,21∠50°	0,48∠256°	0,37∠-6°
6	7,43∠2°	5,08∠87°	4,51∠240°	3,39∠111°
9	1,53∠105°	1,09∠215°	0,76∠51°	0,66∠154°
13	0,55∠153°	0,45∠260°	0,9∠92°	0,57∠34°
14	1,19∠137°	1,06∠108°	1,58∠222°	0,59∠48°

Observa-se que as ordens selecionadas são a 5^a, 7^a, 11^a e 13^a, haja vista serem as mais comumente encontradas nos sistemas trifásicos reais que contenham geração eólica ou fotovoltaica.

Complementarmente, foi efetuado a quantificação dos níveis de curto circuito do sistema estabelecido para simulação, obtendo-se os resultados constantes na Tabela 13, para cada barra do arranjo.

Tabela 14 - Níveis de curto circuito encontrados no sistema de 14 Barras do IEEE via simulação.

Barramento	S_{cc} (MVA)
1	871,61
2	702,85
3	481,92
4	582,85
5	592,73
6	383,61
7	412,16
8	300,32
9	386,85
10	321,06
11	286,6

12	238,82
13	296,14
14	243,02

Para o presente trabalho dissertativo será considerado, tendo como base o arranjo ora estabelecido, dois pontos para os estudos de caso a serem aqui implementados e avaliados, a saber:

- Barra 12: por evidenciar o menor nível de curto circuito (238 MVA) em nível de 13,8kV;
- Barra 13: a qual possui um nível de curto circuito (296 MVA) ligeiramente superior à barra 12, encontrando-se em um ponto adjacente à mesma, em 13,8kV, o que tornar factível comparações diretas entre os níveis de capacidade de hospedagem, haja vista a semelhança entre os barramentos.

É imperativo justificar que a opção por barras em 13,8kV (e não em 69kV) foi devido ao fato que serão avaliados distintos fenômenos de capacidade de hospedagem, sendo que os mesmos possuem por semelhança a possibilidade de serem calculados (ou levados em conta) apenas nesta tensão. Por exemplo, o indicador de sobretensão não seria um problema a ser considerado em 69kV, conforme já justificado, todavia este parâmetro deve ser levado em conta em barramentos de 13,8kV.

3.3. ESTUDO DE CASO: CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DE SOBRETENSÃO

Para prosseguir com os estudos em termos de sobretensão, este trabalho utilizará da seguinte estratégia: conexão de geração renovável nas barras selecionadas para estudo

(barras 12 e 13) e elevação da potência gerada de 5 em 5 MVA, até que o limite de tensão seja alcançado. Após atingido o limite na barra escolhida, será analisado as tensões nas outras barras de forma a verificar se a barra de conexão do sistema é a primeira a atingir o limite estabelecido.

Todavia, ao se realizar uma primeira verificação do sistema, sem a presença de gerações adicionais, verifica-se que algumas barras do arranjo se encontram com tensões abaixo da nominal e, até mesmo, em condições de subtensão. Neste sentido, a Tabela 15 exibe os níveis de tensão percentual apresentado em cada barra na situação em questão.

Tabela 15 - Tensão percentual das barras do sistema IEEE 14 Barras - sem injeção de novas gerações.

Barra	$V_{barra} (%)$
1	95,51
2	93,40
3	94,56
4	92,42
5	92,28
6	98,47
7	96,00
8	99,16
9	94,47
10	94,43
11	96,06
12	96,80
13	96,14
14	93,43

Devido ao cenário encontrado (tensões abaixo da nominal), a análise da capacidade de hospedagem em termos de sobretensão será subdividida em duas condições

operacionais do sistema, a saber: sistema com características originais e outra com regulação no nível de tensão nas barras de conexão através da alteração no TAP do transformador entre as barras 5 e 6 para 0,87, corrigindo, consequentemente, as tensões nas barras 12 e 13 para tensões próximas à nominal.

3.2.1. Sistema original com as condições de tensões iniciais inalteradas

a) Barra 12

No primeiro caso da barra 12 e acompanhando os níveis de tensão passo a passo, a violação na tolerância da sobretensão é atingida quando há injeção de 55 MVA. O aumento de tensão até a violação pode ser acompanhado conforme o gráfico disposto na Figura 12. Será aqui falado em termos de inserção de geração distribuída, por ser esta a que mais afeta a questão das sobretensões.

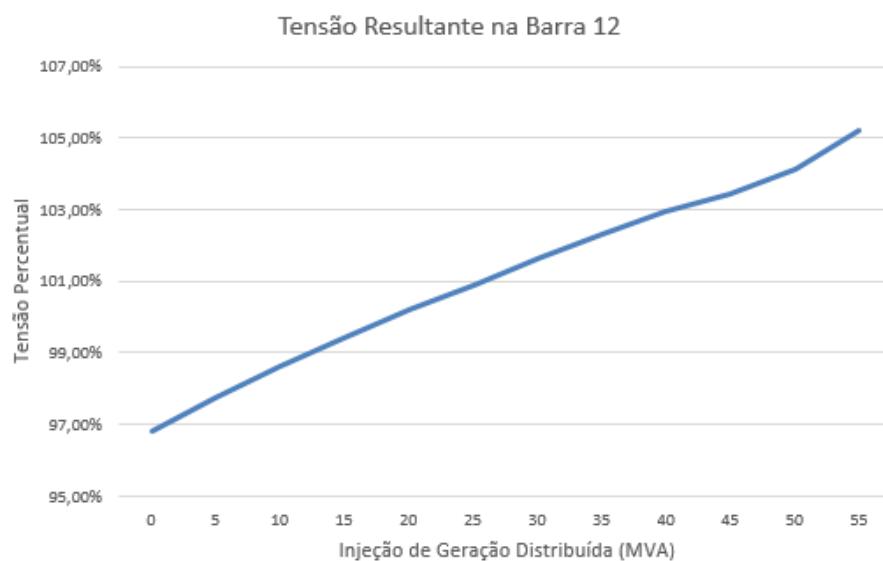


Figura 12 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 12.

Ao atingir os 55 MVA de geração renovável, a tensão na barra 12 ultrapassa os limites estabelecidos em norma [41], que neste caso é uma tensão de 5% acima da nominal. Ademais, ao analisar as tensões nas outras barras, conforme a Tabela 16, pode-se notar que não há extração de limite.

Tabela 16 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 12.

Barra	Potência de Geração Distribuída Inserida (MVA) x Tensão Percentual nos Barramentos (%)										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
1	95,80	96,06	96,29	96,52	96,72	96,93	97,11	97,29	97,43	97,58	97,84
2	93,74	94,04	94,31	94,58	94,81	95,05	95,25	95,46	95,62	95,80	96,11
3	94,87	95,15	95,38	95,62	95,82	96,04	96,21	96,39	96,51	96,68	96,95
4	92,81	93,16	93,46	93,77	94,04	94,31	94,54	94,78	94,94	95,16	95,52
5	92,70	93,08	93,41	93,74	94,02	94,32	94,58	94,83	95,02	95,25	95,64
6	98,96	99,41	99,76	100,13	100,40	100,76	101,02	101,29	101,44	101,72	102,22
7	96,37	96,71	96,99	97,28	97,52	97,77	97,98	98,18	98,32	98,52	98,87
8	99,52	99,85	100,12	100,39	100,62	100,86	101,05	101,25	101,38	101,57	101,89
9	94,83	95,17	95,43	95,70	95,93	96,16	96,35	96,54	96,65	96,85	97,19
10	94,81	95,15	95,43	95,71	95,94	96,19	96,38	96,58	96,69	96,90	97,25
11	96,48	96,87	97,18	97,50	97,76	98,04	98,26	98,49	98,61	98,85	99,27
12	97,75	98,64	99,40	100,20	100,90	101,65	102,29	102,96	103,46	104,11	105,19
13	96,68	97,17	97,57	97,98	98,32	98,69	98,98	99,29	99,47	99,79	100,36
14	93,86	94,25	94,56	94,88	95,14	95,42	95,64	95,87	96,00	96,24	96,66

Portanto, pode-se afirmar que a capacidade de hospedagem em termos de sobretensão na barra 12 é de cerca de 50 MVA.

b) Barra 13

Replicando o estudo feito na seção anterior para a barra 13 e acompanhando os níveis de tensão passo a passo, a violação ocorre ao injetar cerca da 105 MVA de geração. O perfil de aumento na tensão pode ser acompanhado pela Figura 13.

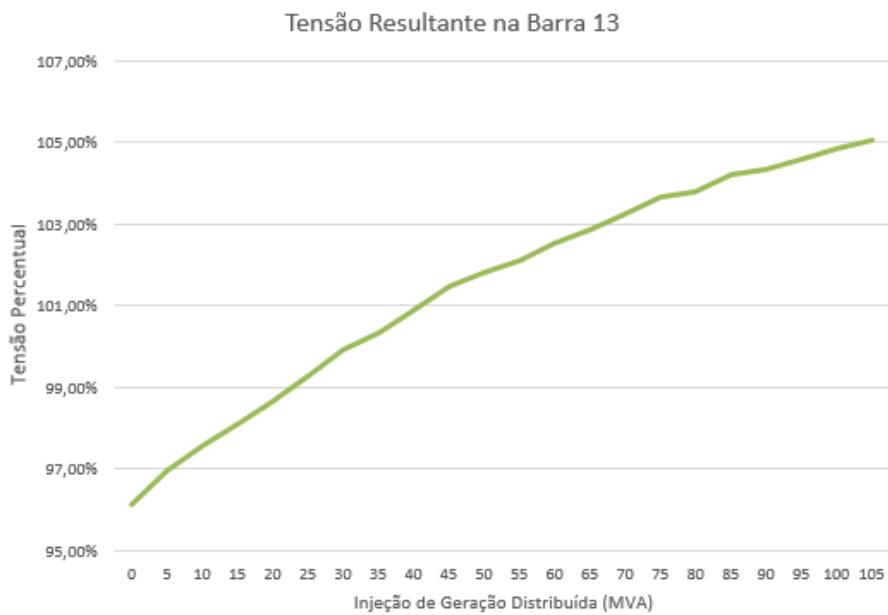


Figura 13 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 13.

Efetuando novamente a verificação da progressão no nível de tensão em todas as barras do sistema, até a injeção de 105 MVA na barra 13, verifica-se também não há nenhuma outra barra com violação. Isto pode ser observado nas Tabela 17 e Tabela 18, levando a conclusão de que esta é a primeira a violar tal parâmetro.

Tabela 17 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 13 – de 5 a 55 MVA.

Barra	Potência de Geração Distribuída Inserida (MVA) x Tensão Percentual nos Barramentos (%)										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
1	95,83	96,07	96,31	96,54	96,78	97,02	97,19	97,40	97,62	97,76	97,89
2	93,78	94,06	94,34	94,60	94,88	95,16	95,36	95,61	95,86	96,02	96,17
3	94,91	95,17	95,42	95,65	95,91	96,16	96,33	96,55	96,78	96,90	97,01
4	92,86	93,19	93,51	93,82	94,15	94,47	94,70	94,98	95,28	95,46	95,61
5	92,75	93,10	93,44	93,76	94,11	94,46	94,71	95,00	95,33	95,52	95,69
6	99,04	99,42	99,78	100,12	100,53	100,93	101,60	101,48	101,86	102,00	102,15

7	96,44	96,76	97,06	97,35	97,67	97,99	98,19	98,45	98,74	98,88	99,01
8	99,59	99,89	100,19	100,46	100,76	101,70	101,26	101,51	101,78	101,91	102,03
9	94,92	95,23	95,52	95,79	96,11	96,43	96,61	96,86	97,15	97,26	97,38
10	94,89	95,20	95,50	95,79	96,11	96,44	96,62	96,88	97,18	97,29	97,41
11	96,56	96,90	97,23	97,54	97,89	98,26	98,45	98,74	99,07	99,19	99,32
12	97,45	97,88	98,31	98,70	99,18	99,66	99,92	100,31	100,77	100,95	101,13
13	96,97	97,55	98,12	98,66	99,29	99,93	100,33	100,87	101,48	101,80	102,11
14	94,03	94,44	94,84	95,21	95,64	96,08	96,34	96,70	97,11	97,29	97,47

Tabela 18 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 13 – de 60 a 105 MVA.

Barra	Potência de Geração Distribuída Inserida (MVA) x Tensão Percentual nos Barramentos (%)									
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
1	98,04	98,17	98,31	98,45	98,52	98,65	98,70	98,79	98,86	98,93
2	96,34	96,49	96,65	96,82	96,89	97,04	97,09	97,19	97,27	97,35
3	97,16	97,27	97,40	97,54	97,56	97,68	97,69	97,76	97,79	97,84
4	95,82	95,98	96,15	96,35	96,41	96,58	96,62	96,73	96,81	96,89
5	95,91	96,09	96,28	96,49	96,57	96,75	96,81	96,93	97,03	97,12
6	102,37	102,52	102,69	102,92	102,89	103,09	103,05	103,14	103,16	103,23
7	99,19	99,33	99,47	99,65	99,66	99,81	99,81	99,88	99,91	99,97
8	102,20	102,33	102,46	102,62	102,63	102,77	102,76	102,82	102,85	102,89
9	97,54	97,66	97,78	97,95	97,93	98,07	98,03	98,08	98,09	98,13
10	97,58	97,69	97,82	97,99	97,97	98,11	98,07	98,12	98,13	98,17
11	99,51	99,64	99,78	99,98	99,95	100,11	100,07	100,13	100,14	100,19
12	101,41	101,61	101,83	102,12	102,13	102,39	102,38	102,52	102,60	102,72
13	102,52	102,86	103,23	103,67	103,80	104,20	104,32	104,60	104,83	105,07
14	97,72	97,91	98,12	98,38	98,41	98,63	98,64	98,77	98,84	98,95

Portanto, pode-se afirmar que a capacidade de hospedagem em termos de sobretensão, na barra 13, é de cerca de 100 MVA.

3.2.2. Sistema com regulação de tensão nas barras de conexão de geração distribuída

Nesta seção, conforme já previsto, será realizada uma a regulação de tensão inicial nas barras de conexão (barra 12 e 13). Para tanto, o TAP no transformador entre as barras 5 e 6 foi alterado do padrão 0,932 para 0,87. Com essa alteração o novo perfil de tensão do arranjo, sem a inserção de GD, tornou-se aquele destacado na Tabela 19.

Tabela 19 – Tensão percentual das barras do sistema IEEE 14 Barras - sem injeção de novas gerações e com regulação prévia de tensão.

Barra	$V_{barra} (%)$
1	94,84
2	92,63
3	93,89
4	91,67
5	91,06
6	102,35
7	96,03
8	99,19
9	95,12
10	95,64
11	98,56
12	100,40
13	99,51
14	95,23

Destaca-se o fato que as tensões iniciais das barras 12 e 13, nesta condição de operação, estão próximas a *Ipu*. Todavia, é merecedor de ressalva que a tensão da barra 6, nesta situação, se mostrou ligeiramente acima da nominal (102,32%), o que pode

diminuir a capacidade de hospedagem desta barra em particular bem como do restante do sistema, ao violar os limites estabelecidos de tensão [41] mais facilmente.

a) Barra 12

Retomando o estudo na barra 12, agora com uma tensão inicial de cerca de 1pu neste barramento, os novos níveis de tensão, bem como o ponto de violação do limite de tensão (sobretensão) estão dispostos na Figura 14. Nesta situação, tal limite é atingido quando há injeção de 30 MVA de geração distribuída.

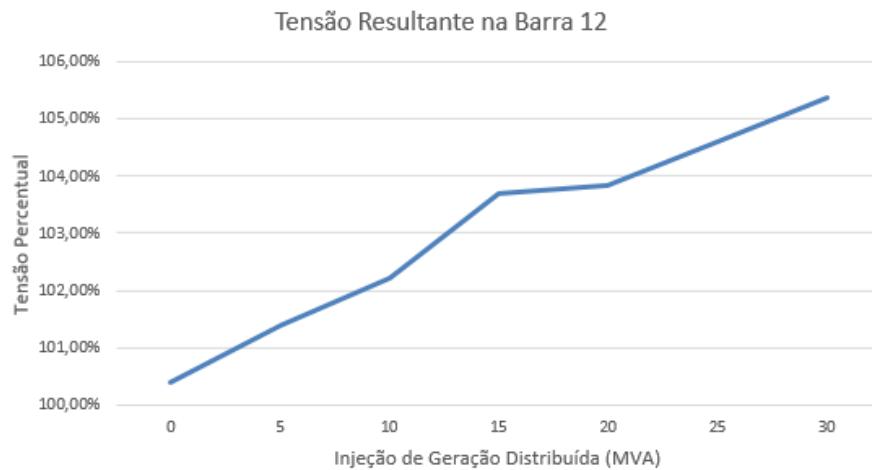


Figura 14 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 12 – com alteração no TAP do transformador entre as barras 5 e 6.

Analizando a progressão no nível de tensão em todas as barras do sistema, até a injeção de 30 MVA na barra 12, observa-se que não há nenhuma outra barra com violação. Isto pode ser visto na Tabela 20, o que leva à conclusão de que esta é a primeira a violar tal parâmetro.

Tabela 20 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 12
– situação com regulação inicial da tensão.

Barra	Potência de Geração Distribuída Inserida (MVA) x Tensão Percentual nos Barramentos (%)					
	5	10	15	20	25	30
1	95,13	95,38	95,63	95,87	96,08	96,30
2	92,97	93,27	93,56	93,83	94,08	94,33
3	94,21	94,47	94,74	94,98	95,20	95,42
4	92,07	92,41	92,75	93,05	93,34	93,63
5	91,49	91,86	92,22	92,55	92,86	93,17
6	102,89	103,30	103,74	104,12	104,48	104,84
7	96,42	96,74	97,07	97,36	97,63	97,90
8	99,57	99,88	100,19	100,47	100,73	100,98
9	95,51	95,82	96,14	96,41	96,68	96,93
10	96,04	96,36	96,70	96,98	97,26	97,53
11	99,03	99,39	99,77	100,09	100,41	100,71
12	101,39	102,21	103,70	103,85	104,61	105,38
13	100,09	100,54	101,02	101,43	101,84	102,24
14	95,69	96,05	96,43	96,75	97,06	97,37

Com base nos dados da Tabela 20, é possível concluir que a capacidade de hospedagem na barra 12 ocorre quando, nesta situação, com aproximadamente 25 MVA de geração distribuída. Este é um valor bem inferior ao primeiro calculado (55 MVA).

b) Barra 13

Neste momento foram realizadas simulações com injeção de potência na barra 13, dada a alteração de TAP supracitada, a violação nos níveis de tensão ocorre quando a inserção atinge 50 MVA, conforme pode ser notado na Figura 15.

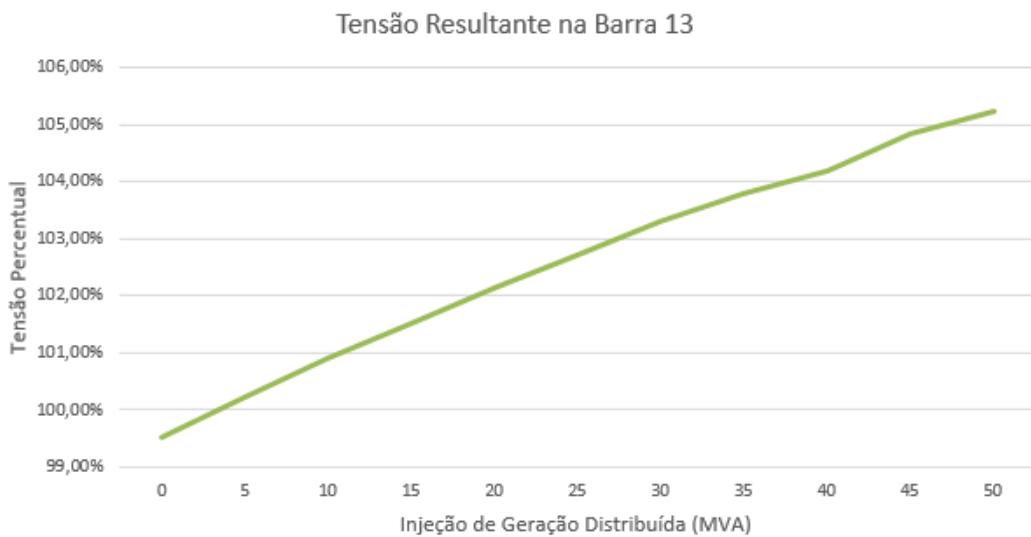


Figura 15 – Tensão resultante no barramento em função da injeção de geração distribuída – Barra 13 – com alteração no TAP do transformador entre as barras 5 e 6.

Mais uma vez, analisando a progressão no nível de tensão em todas as barras do sistema, até a injeção de 50 MVA na barra 13, obteve-se a Tabela 21.

Tabela 21 – Valores de tensão resultantes no sistema devido a inserção de geração distribuída na barra 13 – situação com regulação inicial da tensão.

Barra	Potência de Geração Distribuída Inserida (MVA) x Tensão Percentual nos Barramentos (%)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	95,12	95,40	95,64	95,89	96,12	96,34	96,54	96,71	96,95	97,11
2	92,96	93,29	93,57	93,86	94,12	94,39	94,62	94,81	95,09	95,27
3	94,20	94,49	94,76	95,01	95,25	95,49	95,69	95,86	96,11	96,26
4	92,06	92,44	92,77	93,10	93,41	93,72	93,98	94,20	94,53	94,73
5	91,48	91,88	92,23	92,58	92,91	93,24	93,52	93,75	94,10	94,32
6	102,84	103,31	103,73	104,13	104,51	104,89	105,19	105,43	105,86	106,07
7	96,42	96,79	97,12	97,43	97,73	98,03	98,28	98,48	98,80	98,98
8	99,57	99,92	100,24	100,54	100,83	101,11	101,34	101,53	101,84	102,01
9	95,51	95,88	96,20	96,51	96,81	97,11	97,34	97,52	97,85	98,01
10	96,03	96,41	96,75	97,07	97,37	97,68	97,92	98,11	98,45	98,62
11	99,00	99,42	99,79	100,14	100,48	100,82	101,08	101,29	101,67	101,86
12	100,95	101,48	101,96	102,41	102,85	103,30	103,65	103,93	104,43	104,70

13	100,21	100,90	101,52	102,12	102,70	103,29	103,78	104,18	104,85	105,24
14	95,74	96,23	96,67	97,09	97,49	97,90	98,22	98,49	98,94	99,19

Nota-se, por meio desta tabela, que a tensão da barra 6 viola o limite de 5% antes mesmo de se ter qualquer transgressão de tensão na barra de injeção de potência (barra 13). Neste caso, o fator limitante deixa de ser a barra de injeção e passa a ser a outra barra do sistema. O comportamento da tensão na barra 6 pode ser observado conforme Figura 16.

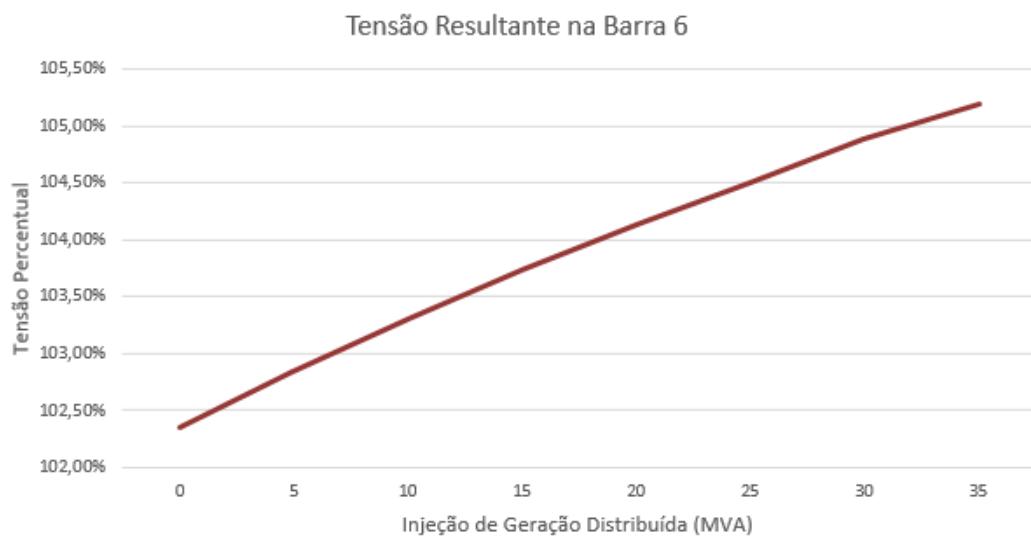


Figura 16 – Tensão resultante na barra 6 em função da injeção de geração distribuída na barra 13 – com alteração no TAP do transformador entre as barras 5 e 6.

Assim sendo, observa-se que a barra 6 viola os limites de tensão estabelecidos antes mesmo de 35 MVA de injeção, tornando-a o fator limitante para injeção de geração distribuída e, portanto, estabelecendo a capacidade de hospedagem em termos de sobretensão. Portanto, pode-se concluir que, para a injeção de geração distribuída na barra

13, dadas as condições citadas anteriormente, a capacidade de hospedagem em termos de sobretensão está próxima a 30 MVA.

3.4. ESTUDO DE CASO: CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DE SOBRECORRENTE/SOBRECARGA

Tem-se, nesta seção, uma análise das correntes das linhas de transmissão e do carregamento dos transformadores do arranjo de 14 barras estudado, tendo em vista a inserção de geração distribuída nas barras 12 e 13. Tal inserção, mais uma vez, é feita com degraus de 5 em 5 MVA.

As medições de corrente são feitas em todas as linhas de transmissão e transformadores do sistema, e a capacidade de hospedagem é determinada quando o primeiro elemento do sistema viola sua capacidade máxima de condução de corrente.

3.3.1. Barra 12

O estudo em termos de sobrecorrente na barra 12, conforme procedimento supracitado, traz os resultados exibidos na Tabela 22.

Tabela 22 – Capacidade de hospedagem do sistema no tocante à sobrecorrentes/sobrecargas devido à inserção de GD – Barra 12.

Linha de Transmissão / Transformador	Capacidade de Condução de Corrente (A)	Injeção de Geração Distribuída (MVA) x Corrente (A)	
		5MVA	10MVA
LT_{1-2}	1623	1312	1302
LT_{1-5}	745	607	598
LT_{2-3}	745	615	615
LT_{2-4}	555	431	425
LT_{2-5}	430	317	309
LT_{3-4}	310	247	252
LT_{5-4}	615	499	505
LT_{6-11}	615	521	543
LT_{6-12}	430	226	119
LT_{6-13}	1025	788	748
LT_{7-9}	1315	1057	1030
LT_{9-10}	175	90	63
LT_{9-14}	430	268	239
LT_{10-11}	430	367	386
LT_{12-13}	175	173	257
LT_{13-14}	430	362	389
T_{4-7}	502	206	202
T_{4-9}	201	134	130
T_{5-6}	452	381	355
T_{7-8}	1540	810	806

Portanto, pode-se concluir que a capacidade de hospedagem de geração distribuída na barra 12, em termos de sobrecorrente/sobrecarga, é de aproximadamente 5 MVA. Tal limitação ocorre pela violação na capacidade de condução de corrente na linha de transmissão que interliga as barras 12 e 13.

Vale ressaltar que os limites evidenciados na Tabela 21 são os mesmos esclarecidos na Seção 3.1 deste Capítulo III.

3.3.2. Barra 13

Para o caso da barra 13, são encontrados os resultados apresentados na sequência.

Tabela 23 – Capacidade de hospedagem do sistema no tocante à sobrecorrentes/sobrecargas devido à inserção de GD – Barra 13.

Linha de Transmissão / Transformador	Capacidade de Condução de Corrente (A)	Injeção de Geração Distribuída (MVA) x Corrente (A)		
		5MVA	10MVA	15MVA
LT_{1-2}	1623	1314	1301	1290
LT_{1-5}	745	608	598	589
LT_{2-3}	745	616	616	616
LT_{2-4}	555	432	425	419
LT_{2-5}	430	317	309	302
LT_{3-4}	310	247	252	257
LT_{5-4}	615	498	503	509
LT_{6-11}	615	519	535	552
LT_{6-12}	430	315	288	263
LT_{6-13}	1025	707	600	501
LT_{7-9}	1315	1051	1020	991
LT_{9-10}	175	94	72	50
LT_{9-14}	430	255	214	172
LT_{10-11}	430	365	379	394
LT_{12-13}	175	68	60	70
LT_{13-14}	430	377	416	455
T_{4-7}	502	205	201	196
T_{4-9}	201	133	129	125
T_{5-6}	452	382	358	334
T_{7-8}	1540	809	806	803

Para esta situação, a capacidade de hospedagem de geração distribuída na barra 13, em termos de sobrecorrente/sobrecarga, é de 10 MVA. Tal limitação ocorre pela

violação na capacidade de condução de corrente na linha de transmissão que interliga as barras 13 e 14.

Desde já, nota-se que tais valores de capacidade de hospedagem são inferiores aos impostos na análise de sobretensão resultante.

3.5. ESTUDO DE CASO: CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

O cálculo da capacidade de hospedagem, para o presente estudo de caso será realizado em consonância com a teoria exposta no Capítulo 2 (Seção 2.4). Para fins de simulação e demonstração de metodologia, foi utilizado um perfil de distorções harmônicas típico de uma turbina eólica *full converter*, a qual pode ser facilmente encontrado em estudos de acesso. Este perfil, neste trabalho dissertativo é estendido para geração fotovoltaica tradicional, devido ser o mesmo processo de conversão DC/AC. A partir deste momento, trata-se tal dado de injeção harmônica como sendo proveniente, genericamente, de uma geração distribuída (GD) como exibido na Tabela 24.

Tabela 24 - Injeção harmônica média produzida por uma típica GD.

Ordem Harmônica	Corrente Harmônica (pu)
2	0,0026
3	0,0086
4	0,0022
5	0,0113
6	0,0014

7	0,0088
8	0,0019
9	0,003
10	0,0026
11	0,0038
12	0,002
13	0,0046
14	0,0018
15	0,0019
16	0,0014
17	0,0021

Com os dados de injeção harmônica apresentados, torna-se possível a estimação da potência máxima de GD a ser inserida em um determinado ponto do sistema sem que se ultrapasse o indicador de qualidade ora avaliado.

Outra questão é o ângulo da corrente injetada, conforme explicitado nas seções anteriores deste trabalho, para garantir a obtenção do valor mínimo em que há violação, far-se-á uso do pior caso: ângulo da corrente injetada igual ao ângulo da corrente existente. Neste sentido, os ângulos de corrente da GD, por não serem informados pelos fabricantes (ou ainda, por não serem triviais de prévio conhecimento), serão impostos, aqui, de forma randômica.

3.4.1. Barra 12

Uma vez inseridas as fontes de distorções harmônicas, de acordo com o exposto acima, foi realizada a verificação das tensões e impedâncias harmônicas equivalentes, a partir da Barra 12. A Tabela 24 mostra os valores encontrados.

Tabela 25 – Tensões e impedâncias harmônicas verificadas, via simulação, a partir da Barra 12.

Ordem Harmônica	Tensão Harmônica (V)	Impedância Harmônica Equivalente (Ω)
1	13358,4 $\angle -5,0^\circ$	0,67 $\angle 63,8^\circ$
2	1,33 $\angle -3,3^\circ$	1,19 $\angle 64,2^\circ$
3	1,33 $\angle -3,4^\circ$	1,59 $\angle 62,5^\circ$
4	0,00 $\angle -4,9^\circ$	1,91 $\angle 61,8^\circ$
5	77,47 $\angle 129,5^\circ$	2,19 $\angle 62,3^\circ$
6	0,00 $\angle -0,9^\circ$	2,46 $\angle 63,4^\circ$
7	45,41 $\angle 145,4^\circ$	2,75 $\angle 64,7^\circ$
8	0,00 $\angle 1,4^\circ$	3,05 $\angle 65,8^\circ$
9	0,00 $\angle -1,6^\circ$	3,38 $\angle 66,6^\circ$
10	0,00 $\angle -5,3^\circ$	3,72 $\angle 67,0^\circ$
11	17,36 $\angle 71,5^\circ$	4,07 $\angle 66,9^\circ$
12	0,00 $\angle -3,2^\circ$	4,42 $\angle 66,4^\circ$
13	26,71 $\angle 100,0^\circ$	4,77 $\angle 65,7^\circ$
14	0,00 $\angle 13,6^\circ$	5,09 $\angle 64,7^\circ$
15	0,00 $\angle 8,1^\circ$	5,38 $\angle 63,5^\circ$
16	0,00 $\angle 6,2^\circ$	5,63 $\angle 62,3^\circ$
17	0,00 $\angle 5,2^\circ$	5,82 $\angle 61,5^\circ$
18	0,00 $\angle 4,6^\circ$	6,00 $\angle 61,4^\circ$
19	0,00 $\angle 4,2^\circ$	6,24 $\angle 61,6^\circ$
20	0,00 $\angle 3,9^\circ$	6,53 $\angle 61,5^\circ$
21	0,00 $\angle 3,6^\circ$	6,81 $\angle 61,0^\circ$
22	0,00 $\angle 3,5^\circ$	7,08 $\angle 60,3^\circ$
23	0,00 $\angle 3,4^\circ$	7,32 $\angle 59,6^\circ$
24	0,00 $\angle 3,2^\circ$	7,55 $\angle 58,9^\circ$
25	0,00 $\angle 3,2^\circ$	7,77 $\angle 58,2^\circ$

Diante tais dados, é possível calcular a fonte de corrente harmônica equivalente (círculo de Norton) vista a partir da barra 12. Para tanto, emprega-se a equação (7). Assim, encontram-se as correntes de *background* conforme exibidas na Tabela 26.

Tabela 26 – Corrente harmônica equivalente observada a partir da Barra 12.

Ordem Harmônica	Corrente Harmônica (A)
1	19667,84 $\angle -68,8^\circ$
2	1,12 $\angle -67,5^\circ$
3	0,84 $\angle -65,9^\circ$
4	0,00 $\angle -66,7^\circ$
5	35,33 $\angle 67,2^\circ$
6	0,00 $\angle -64,3^\circ$
7	16,51 $\angle 80,7^\circ$
8	0,00 $\angle -64,4^\circ$
9	0,00 $\angle -68,2^\circ$
10	0,00 $\angle -72,3^\circ$
11	4,26 $\angle 4,6^\circ$
12	0,00 $\angle -69,6^\circ$
13	5,59 $\angle 34,3^\circ$
14	0,00 $\angle -51,1^\circ$
15	0,00 $\angle -55,4^\circ$
16	0,00 $\angle -56,1^\circ$
17	0,00 $\angle -56,3^\circ$
18	0,00 $\angle -56,8^\circ$
19	0,00 $\angle -57,4^\circ$
20	0,00 $\angle -57,6^\circ$
21	0,00 $\angle -57,4^\circ$
22	0,00 $\angle -56,8^\circ$
23	0,00 $\angle -56,2^\circ$
24	0,00 $\angle -55,7^\circ$
25	0,00 $\angle -55,0^\circ$

Assim procedendo-se, os ângulos a serem injetados pelas fontes de correntes harmônicas para efeito de avaliação da capacidade de hospedagem, considerando o pior caso, serão os mesmos valores encontrados na tabela anterior.

As simulações foram feitas com a mesma estratégia até então adotada, ou seja, elevando a potência da GD de 5 em 5 MVA. O limite foi violado, na Barra 12, em termos

de distorções harmônicas individuais, quando inserido uma potência de 75 MVA. As Tabelas 27, 28 e 29 mostram tal condição de violação, levando em conta todas ordens harmônicas avaliadas e o código de rede pertinente. Neste contexto, o valor limite extrapolado é o valor de 1,5% [43], relativo à 5^a ordem harmônica.

Tabela 27 - Tensão harmônica percentual com 75 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 1 a 9.

Barra	Tensões Harmônicas Percentuais (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	95,51	0,03	0,14	0,04	0,20	0,03	0,29	0,05	0,08
2	93,40	0,04	0,17	0,05	0,22	0,04	0,32	0,06	0,08
3	94,56	0,04	0,18	0,05	0,04	0,04	0,08	0,05	0,08
4	92,42	0,05	0,21	0,06	0,30	0,05	0,37	0,06	0,08
5	92,28	0,06	0,22	0,06	0,38	0,05	0,42	0,06	0,07
6	98,47	0,09	0,35	0,10	1,08	0,07	0,74	0,09	0,15
7	96,00	0,06	0,23	0,07	0,72	0,04	0,31	0,05	0,08
8	99,16	0,05	0,22	0,06	0,37	0,04	0,30	0,05	0,07
9	94,47	0,06	0,26	0,07	0,82	0,05	0,26	0,05	0,08
10	94,43	0,07	0,26	0,08	0,86	0,05	0,33	0,06	0,08
11	96,06	0,08	0,31	0,09	0,97	0,06	0,53	0,07	0,11
12	96,80	0,14	0,59	0,17	1,56	0,14	1,25	0,22	0,39
13	96,14	0,10	0,40	0,12	1,18	0,08	0,83	0,12	0,20
14	93,43	0,07	0,31	0,08	0,93	0,06	0,57	0,07	0,10

Tabela 28 - Tensão harmônica percentual com 75 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 10 a 18.

Barra	Tensões Harmônicas Percentuais (%)								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0,07	0,07	0,06	0,32	0,05	0,06	0,05	0,06	0,00
2	0,07	0,08	0,07	0,32	0,06	0,07	0,05	0,07	0,00
3	0,07	0,27	0,04	0,24	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00
4	0,06	0,08	0,04	0,17	0,02	0,03	0,03	0,06	0,00
5	0,06	0,09	0,03	0,21	0,02	0,03	0,03	0,05	0,00
6	0,14	0,34	0,13	0,45	0,14	0,16	0,13	0,19	0,00

7	0,06	0,14	0,03	0,07	0,03	0,04	0,04	0,07	0,00
8	0,05	0,09	0,03	0,07	0,03	0,04	0,04	0,06	0,00
9	0,06	0,27	0,04	0,02	0,05	0,06	0,05	0,08	0,00
10	0,06	0,27	0,05	0,09	0,06	0,07	0,06	0,08	0,00
11	0,10	0,31	0,09	0,27	0,10	0,11	0,09	0,12	0,00
12	0,37	0,72	0,34	1,05	0,36	0,40	0,31	0,47	0,00
13	0,19	0,45	0,18	0,69	0,19	0,21	0,16	0,25	0,00
14	0,09	0,54	0,08	0,44	0,09	0,10	0,08	0,12	0,00

Tabela 29 - Tensão harmônica percentual com 75 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 19 a 25 e DTT.

Barra	Tensões Harmônicas Percentuais (%)							
	19	20	21	22	23	24	25	DTT
1	0,05	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,53
2	0,05	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,58
3	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,43
4	0,08	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,00	0,59
5	0,06	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,67
6	0,20	0,00	0,15	0,00	0,20	0,00	0,00	1,57
7	0,07	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,85
8	0,07	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,57
9	0,06	0,00	0,03	0,00	0,04	0,00	0,00	0,96
10	0,06	0,00	0,04	0,00	0,05	0,00	0,00	1,03
11	0,12	0,00	0,09	0,00	0,12	0,00	0,00	1,26
12	0,53	0,00	0,40	0,00	0,54	0,00	0,00	2,80
13	0,27	0,00	0,20	0,00	0,28	0,00	0,00	1,86
14	0,11	0,00	0,07	0,00	0,11	0,00	0,00	1,38

Conforme observado, a violação, neste caso, ocorreu na quinta ordem harmônica na própria barra de inserção da GD, Barra 12. Pode-se concluir, então, que a capacidade de hospedagem para este caso é de cerca 70 MVA, que é imediatamente antes da primeira violação de tensão harmônica, conforme limites estabelecidos. A Figura 17 evidencia a variação de tal ordem de tensão harmônica até atingir o limite ora posto.

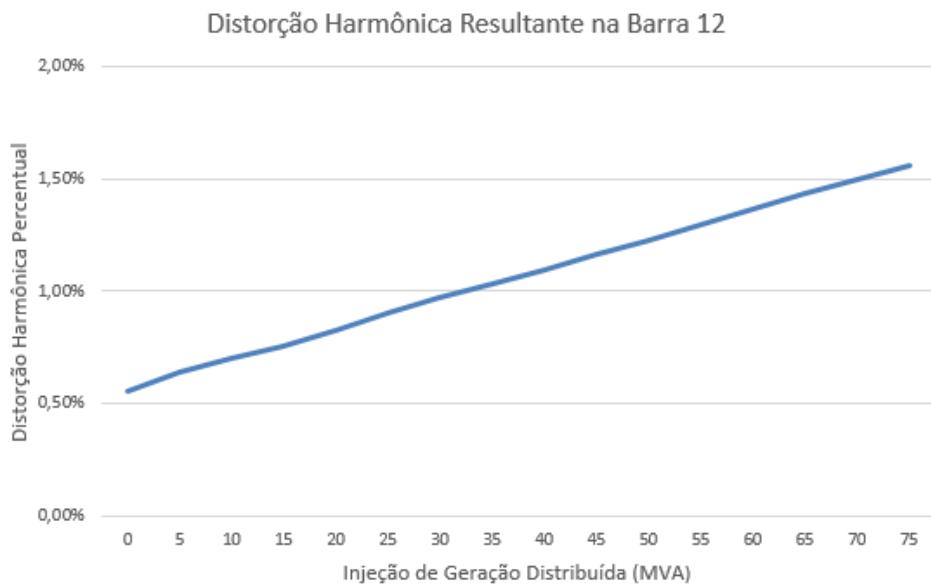


Figura 17 – Tensão resultante de 5^a harmônica na Barra 12 em função do acréscimo de GD neste mesmo barramento.

3.4.2. Barra 13

No caso da Barra 13, a mesma estratégia é empregada. Assim, a Tabela 29 apresenta as tensões e impedâncias harmônicas determinadas, via simulação, para este ponto do sistema elétrico selecionados para os estudos de caso.

Tabela 30 – Tensões e impedâncias harmônicas verificadas, via simulação, a partir da Barra 12.

Ordem Harmônica	Tensão Harmônica (V)	Impedância Harmônica Equivalente (Ω)
1	13267,32 $\angle -5,0^\circ$	0,53 $\angle 66,7^\circ$
2	0,00 $\angle -3,4^\circ$	0,94 $\angle 63,2^\circ$
3	0,00 $\angle -3,5^\circ$	1,23 $\angle 59,1^\circ$
4	0,00 $\angle -5,0^\circ$	1,45 $\angle 56,9^\circ$
5	78,28 $\angle 133,1^\circ$	1,62 $\angle 56,4^\circ$
6	0,00 $\angle -1,4^\circ$	1,79 $\angle 57,1^\circ$

7	$43,78 \angle 147,0^\circ$	$1,96 \angle 58,4^\circ$
8	$0,00 \angle 0,2^\circ$	$2,15 \angle 59,6^\circ$
9	$0,00 \angle -3,0^\circ$	$2,37 \angle 60,5^\circ$
10	$0,00 \angle -7,5^\circ$	$2,60 \angle 60,9^\circ$
11	$22,55 \angle 95,4^\circ$	$2,84 \angle 60,8^\circ$
12	$0,00 \angle -4,0^\circ$	$3,08 \angle 60,1^\circ$
13	$34,50 \angle 104,5^\circ$	$3,31 \angle 59,0^\circ$
14	$0,00 \angle 17,4^\circ$	$3,53 \angle 57,6^\circ$
15	$0,00 \angle 10,2^\circ$	$3,72 \angle 55,9^\circ$
16	$0,00 \angle 7,6^\circ$	$3,86 \angle 54,2^\circ$
17	$0,00 \angle 6,3^\circ$	$3,95 \angle 52,9^\circ$
18	$0,00 \angle 5,5^\circ$	$4,02 \angle 52,8^\circ$
19	$0,00 \angle 5,0^\circ$	$4,16 \angle 53,2^\circ$
20	$0,00 \angle 4,6^\circ$	$4,34 \angle 53,1^\circ$
21	$0,00 \angle 4,3^\circ$	$4,52 \angle 52,5^\circ$
22	$0,00 \angle 4,0^\circ$	$4,69 \angle 51,6^\circ$
23	$0,00 \angle 3,9^\circ$	$4,84 \angle 50,7^\circ$
24	$0,00 \angle 3,7^\circ$	$4,97 \angle 49,8^\circ$
25	$0,00 \angle 3,6^\circ$	$5,09 \angle 48,8^\circ$

De posse de tais informações, pode-se calcular as correntes equivalentes de *Norton* da Barra 13, usando, para tanto, a equação (7). Com isso, encontram-se as correntes de *background* exibidas na Tabela 31.

Tabela 31 – Corrente harmônica equivalente observada a partir da Barra 13.

Ordem Harmônica	Corrente Harmônica (A)
1	$25175,18 \angle -71,7^\circ$
2	$0,00 \angle -66,6^\circ$
3	$0,00 \angle -62,9^\circ$
4	$0,00 \angle -61,9^\circ$
5	$48,23 \angle 76,7^\circ$
6	$0,00 \angle -58,5^\circ$
7	$22,34 \angle 88,6^\circ$

8	0,00 \neq -59,4°
9	0,00 \neq -63,5°
10	0,00 \neq -68,4°
11	7,95 \neq 34,6°
12	0,00 \neq -64,1°
13	10,41 \neq 45,5°
14	0,00 \neq -40,2°
15	0,00 \neq -45,7°
16	0,00 \neq -46,6°
17	0,00 \neq -46,6°
18	0,00 \neq -47,3°
19	0,00 \neq -48,2°
20	0,00 \neq -48,5°
21	0,00 \neq -48,2°
22	0,00 \neq -47,6°
23	0,00 \neq -46,8°
24	0,00 \neq -46,1°
25	0,00 \neq -45,2°

Admitindo, mais uma vez, o pior caso de inserção de GD, a potência de violação encontrada foi de 95 MVA. Esta situação está exposta nas tabelas: Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34. A variação incremental de GD também ocorreu, neste particular, de 5 em 5 MVA.

Tabela 32 - Tensão harmônica percentual com 95 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 13 – ordens harmônicas 1 a 9.

Barra	Tensões Harmônicas Percentuais (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	95,51	0,04	0,17	0,05	0,26	3,82	0,33	0,06	0,10
2	93,40	0,05	0,21	0,07	0,29	0,05	38,29	0,07	0,11
3	94,56	0,05	0,22	0,07	0,11	0,05	0,14	0,07	0,09
4	92,42	0,06	0,27	0,07	0,38	0,06	0,44	0,07	0,10
5	92,28	0,06	0,28	0,08	0,46	0,06	0,50	0,06	0,10

6	98,47	0,11	0,43	0,13	1,21	0,83	0,11	0,18	0,17
7	96,00	0,07	0,30	0,09	0,84	0,06	0,38	0,07	0,10
8	99,16	0,07	0,29	0,08	0,45	0,05	0,38	0,06	0,09
9	94,47	0,08	0,32	0,09	0,95	0,06	0,35	0,07	0,09
10	94,43	0,08	0,34	0,09	0,99	0,06	0,42	0,07	0,09
11	96,06	0,10	0,38	0,11	1,10	0,07	0,61	0,09	0,12
12	96,80	0,13	0,51	0,15	1,36	0,11	1,00	0,15	0,26
13	96,14	0,14	0,60	0,17	1,52	0,12	1,14	0,19	0,34
14	93,43	0,10	0,42	0,12	1,16	0,07	0,76	0,10	0,16

Tabela 33 - Tensão harmônica percentual com 95 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 10 a 18.

Barra	Tensões Harmônicas Percentuais (%)								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0,09	0,11	0,07	0,35	0,07	0,08	0,06	0,09	0,00
2	0,09	0,13	0,07	0,36	0,07	0,07	0,06	0,08	0,00
3	0,08	0,28	0,05	0,25	0,03	0,03	0,02	0,02	0,00
4	0,08	0,13	0,05	0,18	0,03	0,03	0,04	0,07	0,00
5	0,07	0,14	0,04	0,23	0,03	0,03	0,03	0,06	0,00
6	0,36	0,16	0,16	0,52	0,17	0,19	0,15	0,23	0,00
7	0,07	0,19	0,04	0,10	0,04	0,05	0,05	0,09	0,00
8	0,07	0,10	0,04	0,09	0,04	0,05	0,05	0,08	0,00
9	0,08	0,34	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,09	0,00
10	0,08	0,34	0,07	0,14	0,08	0,08	0,07	0,10	0,00
11	0,12	0,35	0,11	0,33	0,12	0,13	0,11	0,15	0,00
12	0,25	0,52	0,23	0,77	0,24	0,27	0,21	0,32	0,00
13	0,32	0,68	0,30	0,99	0,32	0,35	0,27	0,40	0,00
14	0,15	0,68	0,14	0,60	0,15	0,17	0,12	0,18	0,00

Tabela 34 - Tensão harmônica percentual com 95 MVA de inserção de geração distribuída na Barra 12 – ordens harmônicas 19 a 25 e DTT.

Barra	Tensões Harmônicas Percentuais (%)							
	19	20	21	22	23	24	25	DTT
1	0,07	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,63
2	0,06	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,70
3	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,51
4	0,11	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,00	0,73

5	0,07	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,81
6	0,23	0,00	0,17	0,00	0,24	0,00	0,00	1,77
7	0,09	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	1,03
8	0,08	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,69
9	0,08	0,00	0,04	0,00	0,05	0,00	0,00	1,15
10	0,08	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,00	1,23
11	0,13	0,00	0,10	0,00	0,14	0,00	0,00	1,46
12	0,34	0,00	0,25	0,00	0,35	0,00	0,00	2,20
13	0,44	0,00	0,34	0,00	0,45	0,00	0,00	2,61
14	0,18	0,00	0,13	0,00	0,18	0,00	0,00	1,79

Observa-se que, a violação, mais uma vez, ocorreu na quinta harmônica na própria barra de inserção, a Barra 13. Pode-se concluir então, que a capacidade de hospedagem para este caso é de cerca de 90 MVA. A Figura 18 evidencia a variação de tal ordem de tensão harmônica até atingir o limite ora posto.

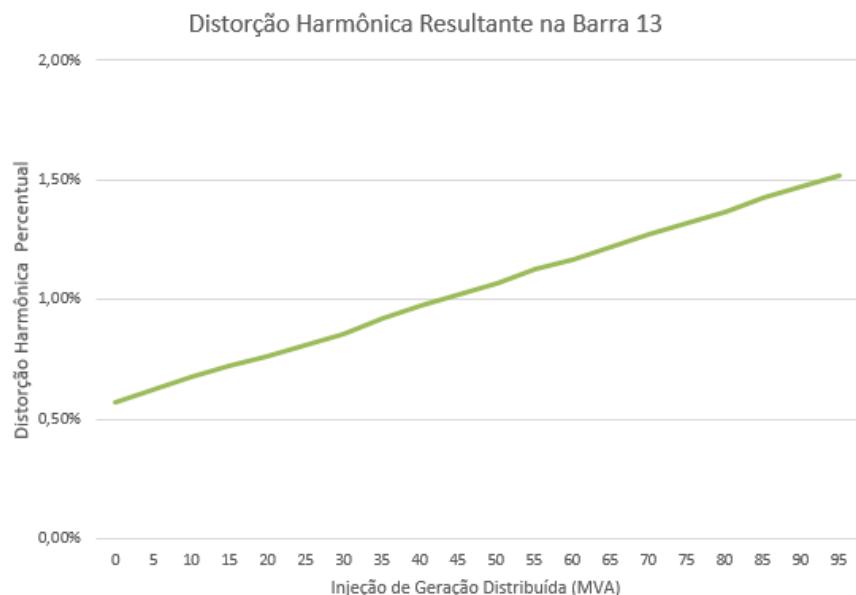


Figura 18 – Tensão resultante de 5ª harmônica na Barra 13 em função do acréscimo de GD neste mesmo barramento.

Vale ressaltar que além das ordens harmônicas, nas tabelas destacadas, a distorção total de tensão (DTT) também foi levada em conta no presente estudo de caso.

3.6. ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS

O objetivo desta seção é integrar as variáveis apresentadas nas seções anteriores deste capítulo, trazendo a capacidade de hospedagem ao se considerar múltiplas variáveis. Para tal, nesta seção a determinação da capacidade de hospedagem ocorrerá quando a primeira variável violar o limite estabelecido. Tal consideração será feita, em separado, para cada barra avaliada.

3.5.1. Barra 12

Para o caso da barra 12, ao unificar os resultados das seções 3.2, 3.3 e 3.4, obtém-se o gráfico síntese a seguir.

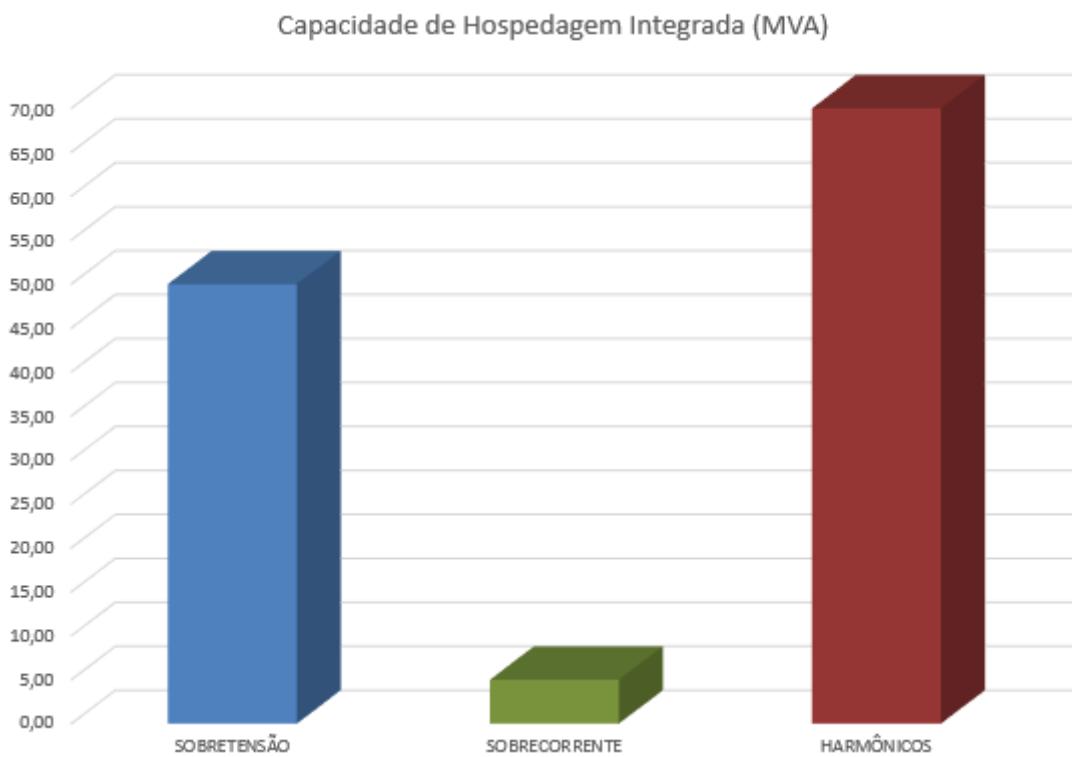


Figura 19 - Capacidade de hospedagem integrada - Barra 12.

Ao analisar a Figura 19 pode-se observar que a capacidade de hospedagem limitante é a em termos de sobrecorrente/sobrecarga. Portanto em uma análise integrada, a capacidade total de hospedagem da barra 12 é de 5 MVA. Para tal capacidade de hospedagem, as outras variáveis estão longe de atingir seu limite, como observado na Tabela 35.

Tabela 35 - Análise das variáveis envolvidas na análise da capacidade de hospedagem - Barra 12.

Variável	Medição	Límite
Tensão (V)	13.489,5	14.490
Sobrecorrente/Sobrecarga (A)	173	175
Distorção Harmônica (%)	0,64	1,5

3.5.2. Barra 13

Nesta mesma perspectiva, agora para a barra 13, obtém-se o seguinte gráfico de capacidade de hospedagem:

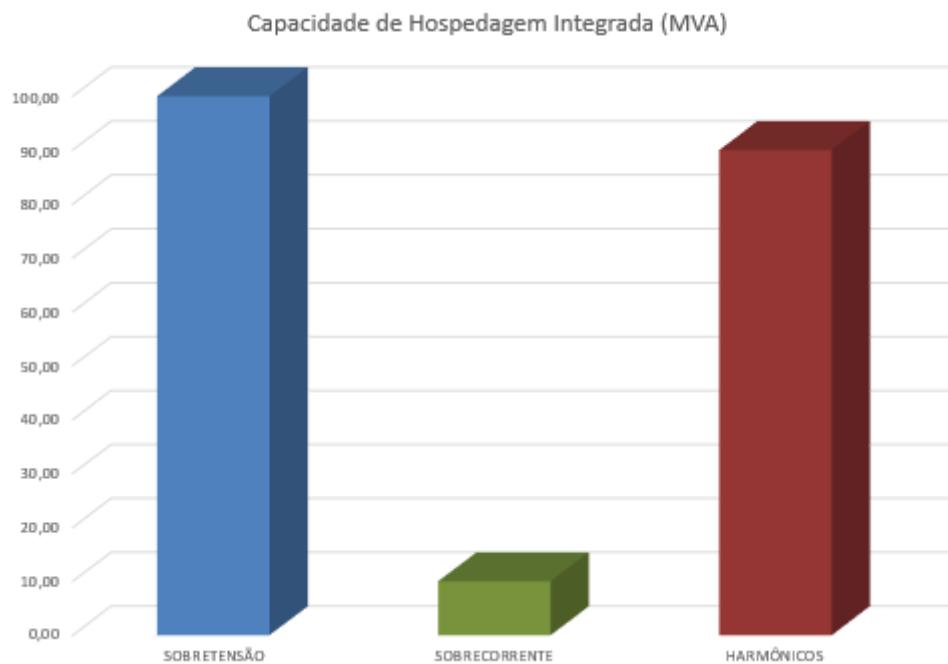


Figura 20 - Capacidade de hospedagem integrada - Barra 13.

Ao analisar a Figura 20, pode-se observar que a capacidade de hospedagem limitante é, mais uma vez, em termos de sobrecorrente. Portanto em uma análise integrada, a capacidade total de hospedagem da Barra 13 é de 10 MVA. Para tal capacidade de hospedagem, as outras variáveis estão longe de atingir seu limite, como observado na Tabela 36.

Tabela 36 - Análise das variáveis envolvidas na análise da capacidade de hospedagem - Barra 13.

Variável	Medição	Limite
Tensão (V)	13.461,9	14.490
Sobrecorrente/Sobrecarga (A)	416	430
Distorção Harmônica (%)	0,67	1,5

3.5.3. Análise Complementar – Adequação do sistema

Ao observar a capacidade de hospedagem integrada dos casos exibidos em 3.5.1 e 3.5.2, conclui-se que, em ambos os casos, a capacidade de hospedagem é limitada também pela sobrecorrente. Porém, caso o parâmetro sobrecorrente não fosse um fator limitante, assim ficaria a capacidade de hospedagem:

- Barra 12: nesta condição, a capacidade de hospedagem salta para 50 MVA e é limitada pela sobretensão;
- Barra 13: neste caso, a capacidade de hospedagem atinge 90 MVA e é limitada pelos harmônicos de tensão.

Portanto, pode-se, desde já, concluir que um dos parâmetros mais importantes no que tange à limitação da capacidade de hospedagem é o indicador de sobrecorrente/sobrecarga das linhas e transformadores do sistema elétrico.

3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi feito o desenvolvimento da simulação computacional e a coleta de seus resultados. O sistema estudado foi composto por uma rede elétrica amplamente utilizada no meio acadêmico, qual seja: arranjo IEEE de 14 barras. Esta rede apresenta

dois distintos níveis de tensão principal, 69 kV e 13,8 kV, com geradores, cargas e compensadores síncronos, e ainda um terceiro nível de 18 kV onde encontra-se conectado apenas um gerador síncrono, em uma única barra.

Nas seções subsequentes foram efetuados os estudos de capacidade de hospedagem devido a inserção de GD nas barras 12 e 13, considerando as principais variáveis de forma isolada. Para tensão, a Barra 13 apresentou maior capacidade de hospedagem – 100 MVA – que a Barra 12 – 50 MVA.

No que tange a correntes, a Barra 12 atinge o limite logo aos 5 MVA de injeção de GD e a Barra 13 aos 10 MVA. Por fim, em termos de distorção harmônica, a Barra 12 se limitou em 70 MVA de injeção de GD e a Barra 13 em 95 MVA. Ambos os casos, ocorreu devido à violação da distorção individual de tensão de quinta harmônica.

Este capítulo ainda contém, em sua penúltima seção, uma análise integrada dos resultados, onde a capacidade de hospedagem é determinada pelo menor valor de capacidade de hospedagem do conjunto das variáveis apresentadas anteriormente, obtendo 5 MVA para a Barra 12 e 10 MVA para a Barra 13, ambos os casos limitados por sobrecorrente.

CAPÍTULO IV

FERRAMENTA GRÁFICA PARA VISUALIZAÇÃO DE CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DE HARMÔNICOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será exibido uma ferramenta gráfica, desenvolvida durante este mestrado, para auxiliar a visualização da capacidade de hospedagem em termos de harmônicos num determinado ponto do sistema elétrico. Com a aplicação direta dos equacionamentos mostrados no Capítulo 2, é possível encontrar tão somente valores máximos - equação (4) - e mínimos - equação (5) - para a capacidade de hospedagem, pois o conhecimento dos ângulos das fontes não são viáveis ou triviais de se estimar. Diante disto, neste momento, é realizada a proposição de uma ferramenta que contempla todas possibilidades de defasagens angulares entre as correntes harmônicas equivalentes do sistema supridor e da geração, tornando possível visualizar, em função das

características da corrente a ser injetada (magnitude e ângulo), todos os pontos limites de capacidade de hospedagem.

4.2. FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA E PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PROPOSTO

Para elaboração do gráfico tem-se por base a equação (7), já apresentada no Capítulo 2. Uma vez conhecida as tensões de *background* do PAC e, consequentemente as correntes (\dot{I}_{u-h}), são feitas variações de magnitude e ângulo da corrente a ser injetada pela fonte de conexão (geração eólica ou fotovoltaica). Desta feita, é possível a obtenção da magnitude da tensão (V_{pac-h}) gerada no PAC, em consonância com a equação (3):

$$|(I_{u-h} + \dot{I}_{HC-h}) \cdot \dot{Z}_{u-h}| = V_{pac-h} \quad (9)$$

Com a variação da corrente \dot{I}_{HC-h} , tanto em módulo, quanto em ângulo, cria-se uma superfície que representa o valor absoluto da tensão. Este procedimento deverá ser feito para cada ordem harmônica h . Neste sentido, a Figura 21 apresenta um gráfico ilustrativo de um sistema hipotético com a finalidade de demonstração desta proposição. É importante mencionar que tais gráficos podem ser gerados por meio de distintos programas computacionais. Neste particular, a figura em questão foi gerada por meio do software Matlab.

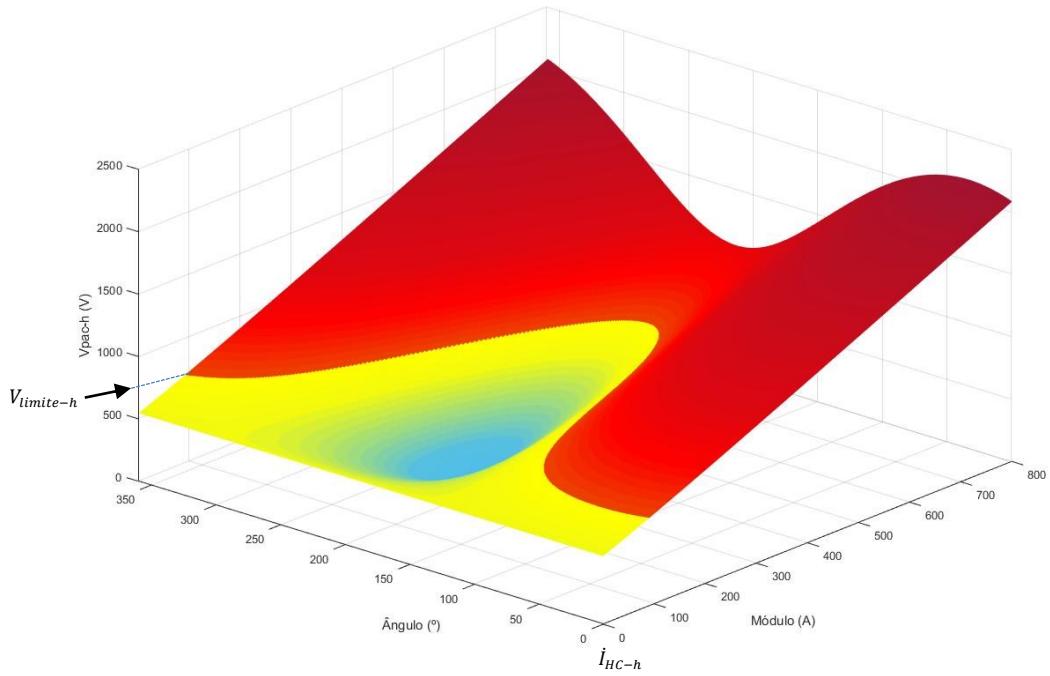


Figura 21 - Gráfico ilustrativo de um caso hipotético de avaliação de capacidade de hospedagem.

Nesta figura, tem-se que na base estão as variações de ângulo e módulo da corrente I_{HC-h} , enquanto que o eixo de “altura” está o resultado da magnitude de tensão harmônica de ordem genérica h no PAC (V_{pac-h}). Na cor azul estão os menores valores de distorção encontrados. Em amarelo estão os valores de tensão mais elevados, contudo ainda abaixo do valor limite ($V_{limite-h}$). Por fim, em vermelho, são todos os valores onde houve a ultrapassagem do limite de distorção harmônica para aquele barramento. Portanto, a linha limítrofe entre as cores vermelha e amarela representa uma linha de capacidade de hospedagem em termos harmônicos, para a ordem h , para o sistema em questão. A Figura 4 apresenta uma visão em perspectiva superior da capacidade de hospedagem.

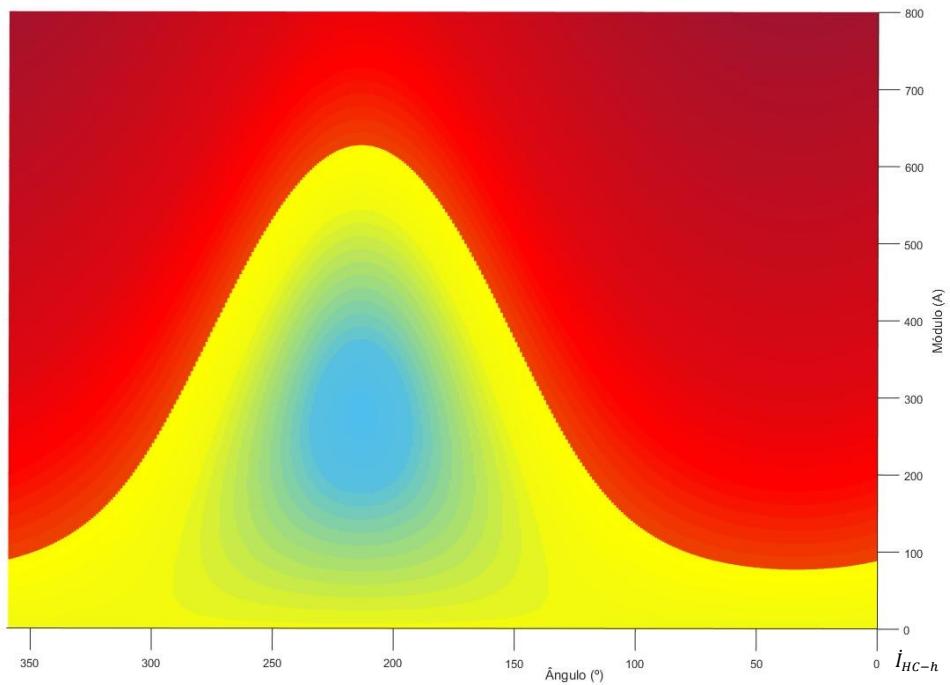


Figura 22 - Gráfico ilustrativo de um caso hipotético de avaliação de capacidade de hospedagem – perspectiva superior.

Esta figura esboça, de forma mais direta, importantes elementos de avaliação da capacidade de hospedagem. Nesta linha de raciocínio, tendo em vista a presente simulação, o ponto mais elevado da curva em questão, ou seja, próximo a $610\angle 220^\circ$ A, é justamente a melhor condição de capacidade de hospedagem, pois há uma alta magnitude de corrente sem que haja a ultrapassagem do limite de distorção. Por outro lado, a pior condição é quando o ângulo da corrente injetada se apresenta nas proximidades de 30° . Neste caso, a corrente máxima permitida será de aproximadamente 80 A. Ainda a título de ilustração, se for injetada uma corrente de 300 A com um ângulo de 50° , o limite de distorção harmônica é violado, porém se o ângulo for de 250° , mantida a magnitude anterior, este limite não é atingido. Muitas outras correlações podem ser

feitas, contudo pretende-se explorá-las melhor quando da análise dos resultados do estudo de caso, o qual será realizado na sequência dos trabalhos.

4.3. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

DESENVOLVIDA EM UM ESTUDO DE CASO

Como aplicação de tal ferramenta, será utilizado o mesmo sistema de 14 Barras do IEEE empregado no Capítulo 3 (Seção 3.1) com as mesmas condições iniciais. Vale ressaltar que foram também utilizadas as mesmas condições de inserção de fontes harmônicas proposta na mesma seção citada.

Ademais, para o presente estudo de caso foram selecionadas as barras 5 e 12 para efeitos de cálculo de capacidade de hospedagem. Esta escolha foi feita com vista a contemplar distintos níveis de tensão e de curto-circuito do sistema.

As frequências harmônicas exploradas são as de ordem 5, 7, 11 e 13, que, conforme já justificadas, são as mais comumente encontradas no sistema elétrico de potência. Enquanto, os limites estabelecidos para o estudo em questão são aqueles definidos por normas do ONS [43].

4.3.1. Barra 5

Para a barra 5 do sistema, são encontradas as seguintes informações no que tange às condições iniciais de distorções harmônicas:

Tabela 37 – Resultados de simulação com as tensões e impedâncias harmônicas equivalentes na barra 5.

Ordem Harmônica	Tensão (V)	Impedância (Ω)
5	$312\angle166,7^\circ$	$22,45\angle13,4^\circ$
7	$222,86\angle119,1^\circ$	$23,63\angle20,03^\circ$
11	$63,67\angle38,9^\circ$	$25,52\angle11,56^\circ$
13	$114,61\angle-4,8^\circ$	$44,24\angle0,3^\circ$

Em posse dos dados de tensão e impedância harmônicas equivalentes, torna-se factível gerar os gráficos estimando o comportamento da tensão harmônica em função do módulo e ângulo da corrente injetada. A seguir, serão apresentados os diversos gráficos resultantes da implementação desta proposta de ferramenta computacional, os quais cobrem as distintas ordens harmônicas selecionadas.

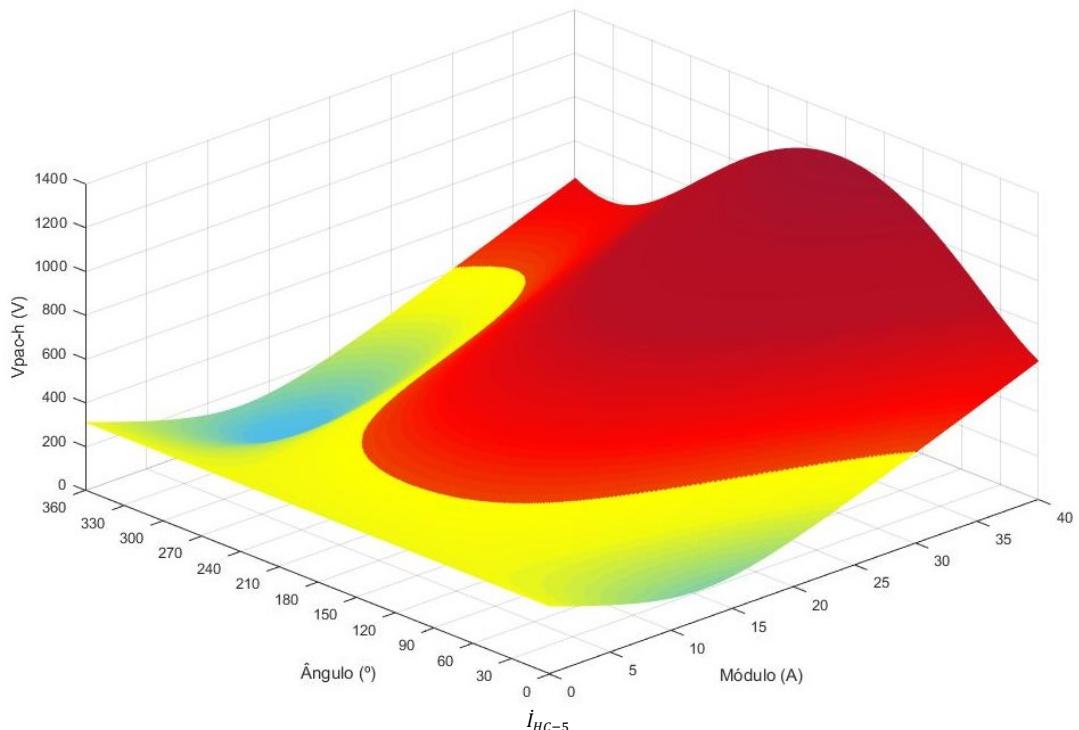


Figura 23 - Tensão de 5^a Ordem Harmônica na barra 5.

Nesta Figura 23 é possível observar que a injeção de corrente de 5^a harmônica é restrita a pouco mais de 5 A para ângulos entre 90° e 240° (pior situação). Já o melhor cenário ocorre próximo aos 330°, onde é possível injetar até 32 A sem atingir a tensão limite de 0,6% da tensão fundamental para esta ordem.

O caso é semelhante para a 7^a harmônica, conforme demonstrado na Figura 24, visto que o valor mínimo de aproximadamente 7 A também ocorrem na faixa de 60° a 180°, e o melhor caso de capacidade de hospedagem – 25 A – ocorre próximo aos 300°.

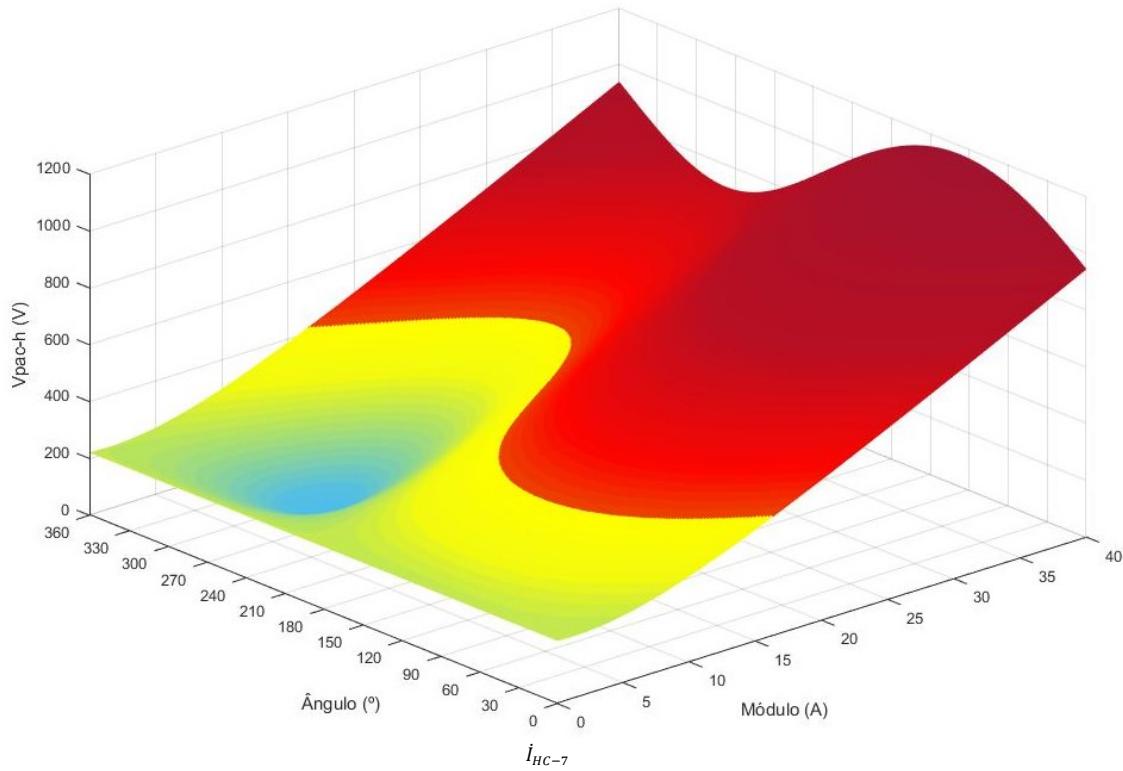


Figura 24 - Tensão de 7^a Ordem Harmônica na barra 5.

Já para as 11^a e 13^a harmônicas (

Figura 25 e

Figura 26), a variação é semelhante entre elas, todavia menos significativas, tendo como pior caso a região próxima a zero graus, e sua melhor possibilidade nos arredores de 180°, sendo que o intervalo entre módulos mínimos e máximos para a 11^a é de 14 a 19 A e para 13^a é de 6 a 12 A.

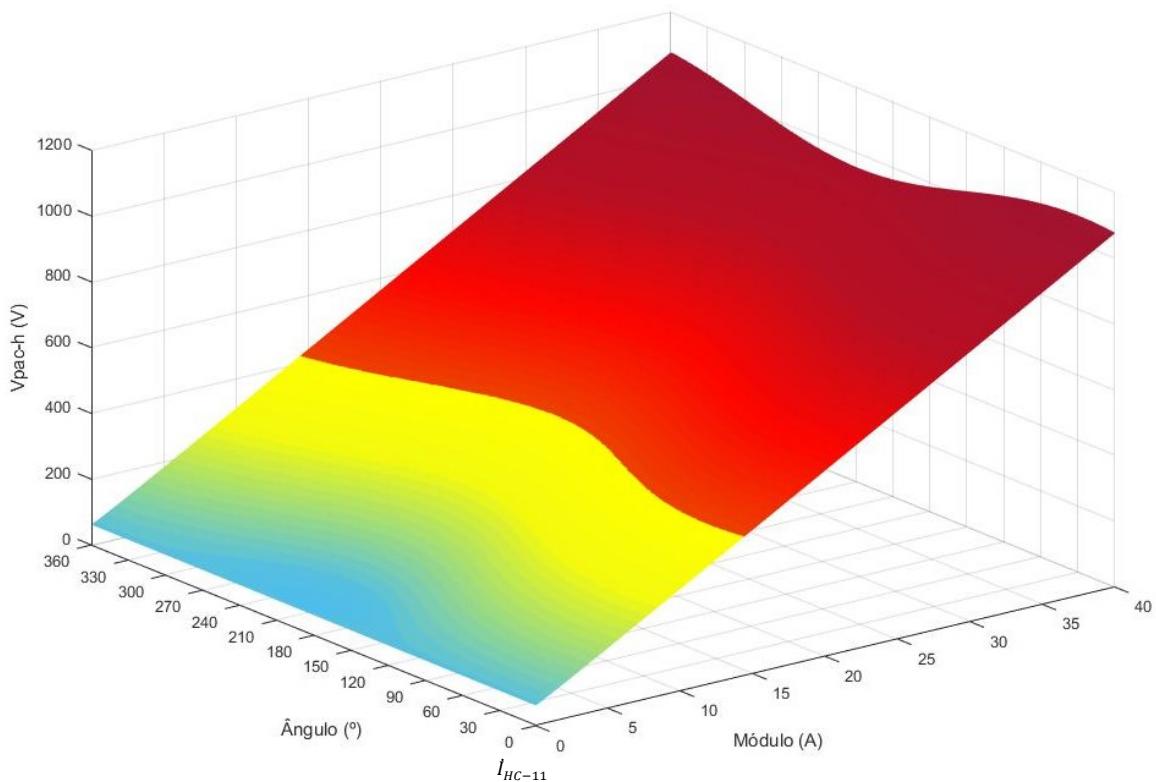


Figura 25 - Tensão de 11^a Ordem Harmônica na barra 5.

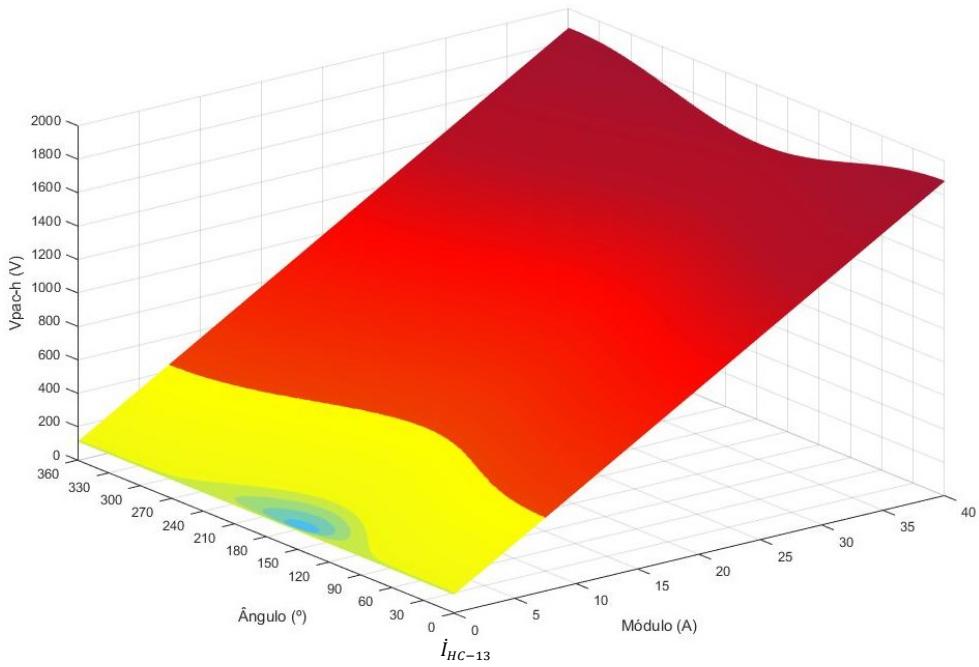


Figura 26 - Tensão de 13^a Ordem Harmônica na barra 5.

Este foram os resultados da aplicação da metodologia para a barra 5 (69kV). Na sequência são apresentados os resultados atrelados à barra de 13,8kV.

4.3.2. Barra 12

Na barra 12, sob investigação, tem-se as seguintes condições iniciais e medições de impedâncias equivalentes:

Tabela 38 – Resultados de simulação com as tensões e impedâncias harmônicas equivalentes na barra 12.

Ordem Harmônica	Tensão (V)	Impedância (Ω)
5	$77,5 \angle 129,5^\circ$	$2,19 \angle 62,3^\circ$
7	$45,42 \angle 145,4^\circ$	$2,75 \angle 64,7^\circ$
11	$17,37 \angle 71,5^\circ$	$4,08 \angle 66,9^\circ$
13	$26,72 \angle 100^\circ$	$4,77 \angle 65,67^\circ$

Diante tais informações, é possível gerar os seguintes gráficos referentes às tensões harmônicas selecionadas. Na sequência tais resultados são apresentados e discutidos.

A Figura 27 exibe o gráfico de 5^a harmônica advindo da implementação computacional aqui proposta.

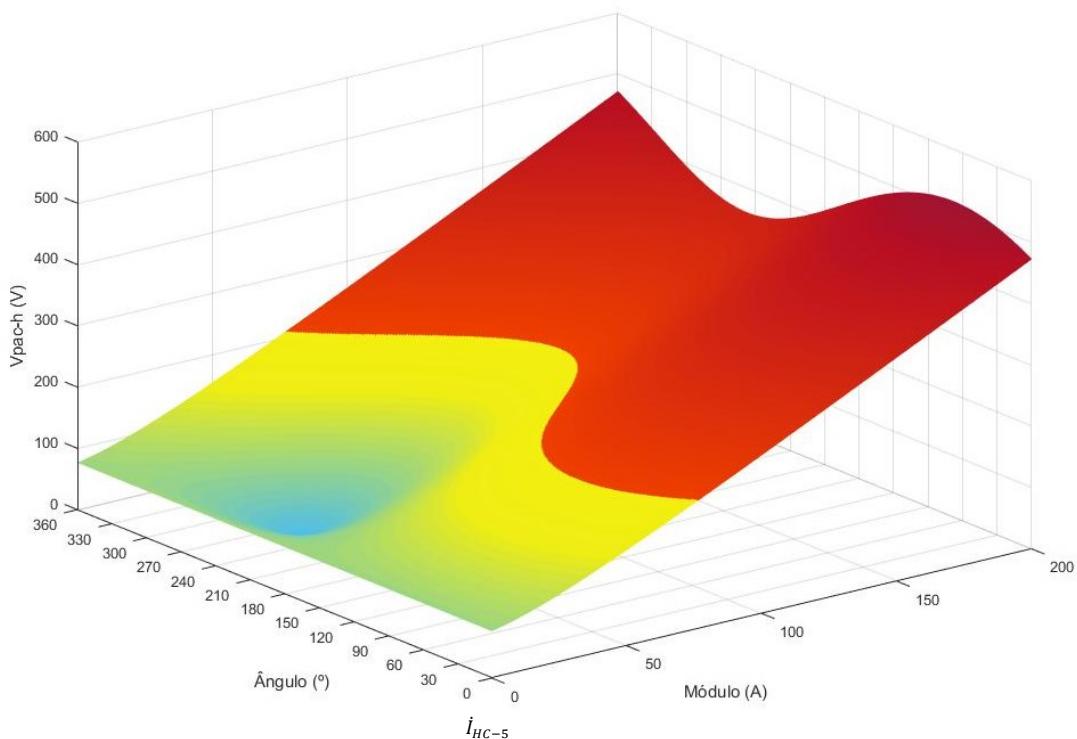


Figura 27 - Tensão de 5^a Ordem Harmônica na barra 12.

Por este gráfico percebe-se que os limites mais restritos de injeção são referentes à valores angulares de corrente entre 0 e 150° e magnitude aproximada de 60 A. Esta é a pior condição. Por outro lado, os melhores resultados estão na região de 210°, atingindo até 130 A de corrente de injeção.

Nas Figuras abaixo estão os resultados para as ordens harmônicas 7, 11 e 13.

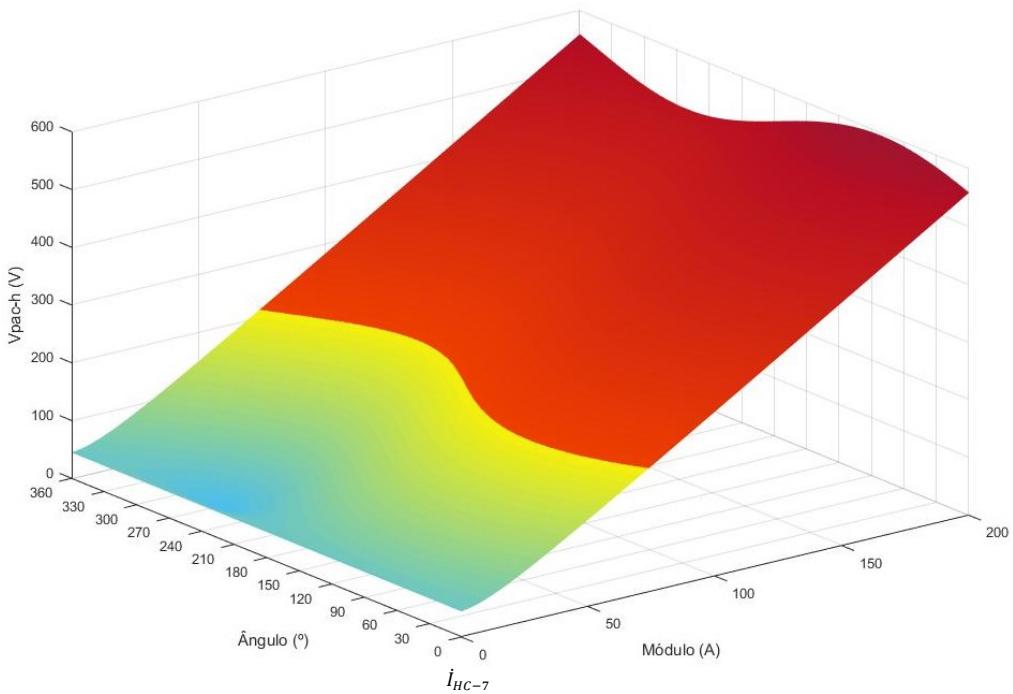


Figura 28 - Tensão de 7^a Ordem Harmônica na barra 12.

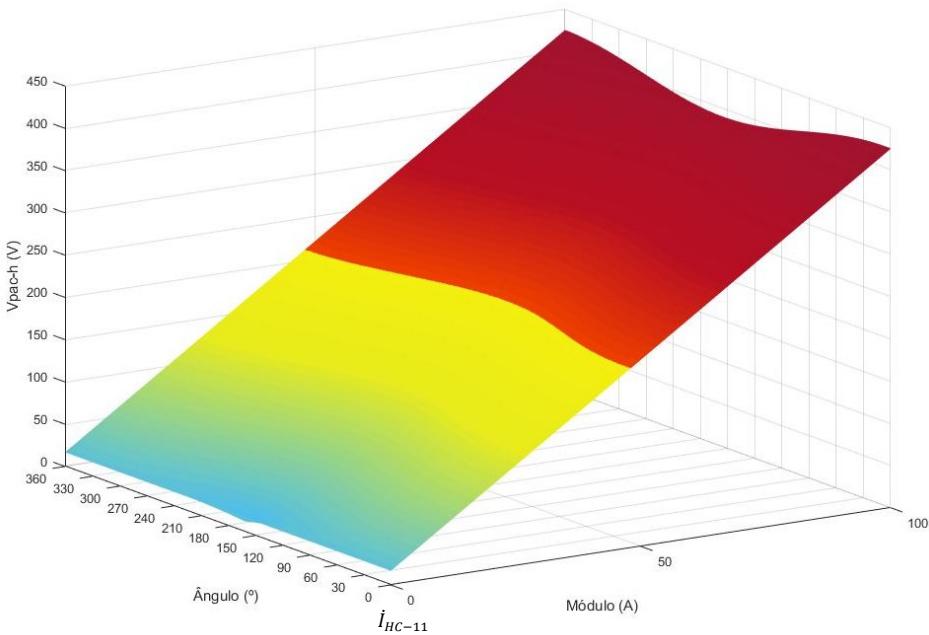


Figura 29 - Tensão de 11^a Ordem Harmônica na barra 12.

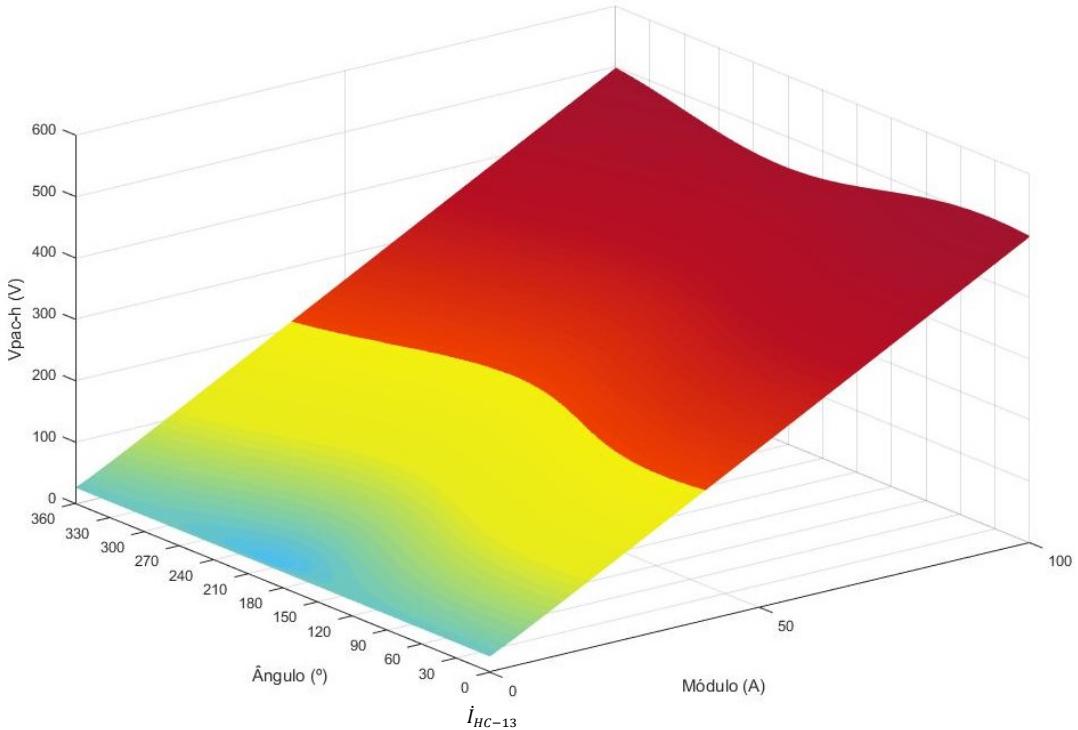


Figura 30 - Tensão de 13^a Ordem Harmônica na barra 12.

Nota-se que os gráficos de 7^a, 11^a e 13^a harmônicas (Figuras 28, 29 e 30) apresentaram, neste estudo, variações significantes entre o mínimo e máximo de corrente harmônica a ser injetada. Para 7^a harmônica, estes foram 60 A e 95 A a 80° e 260°, respectivamente. Para a 11^a, foi de 45 A a 56 A com ângulos 0° e 180°, respectivamente. E, finalmente, para a 13^a os valores verificados foram entre 38 A e 50 A, apresentando ângulos de 30° e 210°, respectivamente para os valores extremos.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção foi apresentada uma ferramenta computacional para contribuir na visualização das distorções harmônicas, uma vez que além das situações de máxima e

mínima capacidade de hospedagem, existem situações intermediárias, que com o devido controle, podem ser administradas, eventualmente, pelo operador de uma rede genérica.

Com a ferramenta proposta, esta traz a possibilidade de que, ao se deparar com uma determinada injeção harmônica, seja possível estudar para quais ângulos de injeção esta corrente impacta menos o nível de tensão do barramento. Para sistemas com controle avançado em tempo real, é possível aumentar a capacidade de hospedagem para o barramento, visto que não é necessário se limitar aos valores mínimos encontrados, trabalhando a curva de forma a obter a injeção no ângulo de máxima capacidade de hospedagem, ou valores intermediários conforme possibilidade/capacidade do controle. Os resultados mostrados trazem gráficos para distorções harmônicas individuais, cabendo ainda estudos futuros contemplar a distorção harmônica total e a correlação entre elas. Além disto, os limites de capacidade de hospedagem ainda se encontram como função da corrente injetada. Portanto, também são necessários desenvolvimentos adicionais para estabelecer uma relação entre tais limites de hospedagem em função da potência de geração a ser inserida.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O presente trabalho de pesquisa explorou a temática da capacidade de hospedagem em sistemas elétricos de potência para fins de avaliação de inserção de novas fontes de geração eólica e/ou fotovoltaica. Num primeiro momento, houve uma contextualização do tema em níveis nacionais e internacionais, por meio do estabelecimento do estado da arte, com a constituição de um posterior quadro genérico de aplicabilidade de cada parâmetro elencado.

Num segundo momento – Capítulo II – foram realizados detalhamentos dos principais parâmetros limitadores da capacidade de hospedagem, a saber: sobretensões, sobrecorrentes/sobrecargas e harmônicos. Cada parâmetro foi descrito de forma pormenorizada, trazendo, para tanto, os principais trabalhos de pesquisa desenvolvidos em cada linha de análise selecionada.

No Capítulo III concentrhou-se as principais contribuições desta dissertação, quais sejam, avaliação dos principais procedimentos de cálculo de capacidade de hospedagem. Para tanto, foram conduzidos testes avaliativos no sistema de 14 barras do IEEE, o qual foi prontamente adaptado para condução dos distintos parâmetros selecionados. Para os

estudos de sobretensão os limites encontrados foram 50 MVA para a barra 12 e 100 MVA para a barra 13. Para sobrecorrente, 5 e 10 MVA, respectivamente. Em harmônicos o resultado foi 70 e 90 MVA, novamente nas barras 12 e 13. No estudo integrado dos resultados, prevaleceu a limitação imposta pela sobrecorrente em ambos os casos, ou seja, 5 e 10 MVA de injeção de geração.

O Capítulo IV teve como principal objetivo trazer uma contribuição adicional à análise de capacidade de hospedagem em termos de distorção harmônica. Isto foi feito por meio da proposição de uma ferramenta gráfica, tornando-se possível visualizar, em função da injeção harmônica, de todos os pontos limites de capacidade de hospedagem, e não apenas os valores mínimos como até então se procedia. Mais uma vez, foi empregado uma avaliação, neste particular, desta proposta, no sistema 14 barras do IEEE. Os resultados evidenciaram a aplicabilidade de tal ferramenta.

Assim sendo, os trabalhos mostraram de forma detalhada a aplicação dos distintos procedimentos existentes, trazendo, como importante conclusão o fato do parâmetro “sobrecorrente/sobrecarga” ser o mais impactante na limitação da capacidade de hospedagem no sistema elétrico avaliado. Os parâmetros sobretensão e distorção harmônica se mostram, neste tocante, menos impactantes em termos de limitação da capacidade para hospedagem de novas fontes de energia no sistema elétrico de distribuição ou transmissão.

Não obstante às contribuições deste trabalho, mais pesquisas necessitam ser desenvolvidas de modo a considerar outros parâmetros e também redes elétricas mais condizentes com os sistemas comumente encontrados no país. Outra análise seria a aplicação dos conceitos elencados em sistemas com inserção de múltiplas de gerações.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (30 de Novembro de 2016). *Matriz de Energia Elétrica*. Fonte: Banco de Informações de Geração: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>
- [2] Díaz-Gonzalez, F., Sumper, A., & Gomis-Bellmunt, O. (2016). *Energy Storage in Power Systems*. Wiley.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA). (1 de Julho de 2016). *Renewable energy highlights*. Acesso em 1 de Dezembro de 2016, disponível em http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_stats_highlights_2016.pdf
- [4] Associação Brasileira de Energia Eólica. (2015). *Boletim Anual de Geração Eólica*. Acesso em 03 de Março de 2017, disponível em http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2016/08/Abeeolica_BOLETIM-2015_low.pdf
- [5] Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEE). (Novembro de 2016). *Dados Mensais ABEEólica | Fevereiro de 2017*. Acesso em 3 de Março de 2017,

disponível em <http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/02/Dados-Mensais-ABEEolica-02.2017.pdf>

- [6] Bonelli, A. F. (2010). *Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- [7] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (17 de Abril de 2012). *Resolução Normativa nº 482*.
- [8] Empresa de Pesquisa Energética. (11 de Novembro de 2014). Acesso em 06 de Março de 2017, disponível em Leilão de Energia de Reserva 2014 atrai investimentos de R\$7,1 bilhões:
[http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202014/Leil%C3%A3odeEnergiadeReserva2014atraiinvestimentosdeR\\$7,1bi.aspx?CategoriaID=6942](http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202014/Leil%C3%A3odeEnergiadeReserva2014atraiinvestimentosdeR$7,1bi.aspx?CategoriaID=6942)
- [9] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (24 de Novembro de 2015). *Resolução Normativa nº 687*.
- [10] Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (s.d.). *Distributed generation: a definition*. Eletric Power Systems Research, vol 57, no. 3, pp 195-204, Abr 2001.
- [11] Barker, P. P., & Mello, R. W. (2000). *Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems*. Power Engineering Society Summer Meeting.
- [12] Seguin, R., Woyak, J., Costyk, D., Hambrick, J., & Mather, B. (2016). *High-Penetration PV Integration Handbook for Distribution Engineers*. NREL - National Renewable Energy Laboratory.

- [13] Bollen, M. H., & Hassan, F. (2011). *Integration of distributed generation in the power system*. Nova Iorque: IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-Blackwell.
- [14] Santos, I. N., Cuk, V., Almeida, P. M., Bollen, M. H., & Ribeiro, P. F. (2015). *Considerations on hosting capacity for harmonic distortions on transmission and distribution systems*. Electric Power Systems Research 119 199-206, Elsevier.
- [15] Reno, M. J., Coogan, K., Grijalva, S., Broderick, R. J., & Quiroz, J. E. (s.d.). *PV Interconnection Risk Analysis trough Distribution System Impact Signatures and Feeder Zones*. PES General Meeting Conference & Exposition, 2014 IEEE.
- [16] Menniti, D., Merlo, M., Scordino, N., Sorrentino, N., & Zanellini, F. (s.d.). *A DSO-oriented Mathematical Model for Dispersed Generation management on MV networks*. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting.
- [17] Rylander, M., Smith, J., & Sunderman, W. (2015). *Streamlined Method for Determining Distribution System Hosting Capacity*. IEEE Rural Electric Power Conference.
- [18] Baccino, F., Nigris, M. d., Gianinoni, I., Grillo, S., Massucco, S., & Tironi, E. (2012). *A methodology for evaluating PEVs hosting capacity margins in distribution grids*. IEEE Power and Energy Society General Meeting.
- [19] Kirby, J., & Hassan, F. (2012). *AC Recharging Infrastructure for EVs and Future Smart Grids - A Review*. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).
- [20] Dubey, A., Santoso, S., & Maitra, A. (2015). *Understanding photovoltaic hosting capacity of distribution circuits*. IEEE Power & Energy Society General Meeting.

- [21] Altin, M., Oguz, E. U., Bizkevelci, E., & Simsek, B. (2014). *Distributed Generation Hosting Capacity Calculation of MV Distribution Feeders in Turkey*. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies.
- [22] Keane, A., Ochoa, L. F., Borges, C. L., Ault, G. W., Alarcon-Rodriguez, A. D., Currie, R. A., . . . Harrison, G. P. (2013). *State-of-the-Art Techniques and Challenges Ahead for Distributed Generation Planning and Optimization*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, Nº 2.
- [23] Zheng, Z., Hong, B., Yin, G., & Zhu, J. (2015). *Relative Merit of Improving Network Hosting Capacity for Renewable Generation*. International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015).
- [24] Ballanti, A., & Ochoa, L. F. (2015). *On the Integrated PV Hosting Capacity of MV and LV Distribution Networks*. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America.
- [25] Etherden, N., & Bollen, M. H. (2011). *Increasing the Hosting Capacity of Distribution Networks by Curtailment of Renewable Energy Resources*. IEEE Trondheim PowerTech.
- [26] Salih, S. N., Chen, P., Carlson, O., & Tjernberg, L. B. (2014). *Optimizing Wind Power Hosting Capacity of Distribution Systems Using Cost Benefit Analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, Nº 3, June 2014.
- [27] Capitanescu, F., Ochoa, L. F., Margossian, H., & Hatziargyriou, N. D. (2015). *Assessing the Potential of Network Reconfiguration to Improve Distributed Generation Hosting Capacity in Active Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, Nº 1.

- [28] Sun, W., Harrison, G. P., & Djokic, S. Z. (s.d.). *Incorporating Harmonic Limits Into Assessment of the Hosting Capacity of Active Networks*. CIRED Workshop - Lisboa Maio de 2012.
- [29] Sun, W., Harrison, G. P., & Djokic, S. Z. (2012). *Distribution Network Capacity Assessment: Incorporating Harmonic Distortion Limits*. IEEE Power and Energy Society General Meeting.
- [30] Bollen, M. H., & Yang, K. (2013). *Harmonic aspects of wind power integration*. J. Mod. Power Syst. Clean Energy.
- [31] Santos, I. N., Bollen, M. H., & Ribeiro, P. F. (2014). *Methodology for Estimation of Harmonic Hosting*. 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 708-712.
- [32] Dartawan, K., Hui, L., Austria, R., & Suehiro, M. (2012). *Harmonic Issues that Limit Solar Photovoltaic Generation on Distribution Circuits*. Denver, Colorado: ASES.
- [33] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). *IEEE-519 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*.
- [34] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2003). *IEEE-1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*.
- [35] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2005). *IEEE 1547-1 Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*.
- [36] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2008). *IEEE 1547-2 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*.

- [37] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2007). *IEEE 1547-3 Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems.*
- [38] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011). *IEEE 1547-4 Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems.*
- [39] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011). *IEEE 1547-6 Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks.*
- [40] Sakar, S., Balci, M. E., Aleem, S. H., & Zobaa, A. F. (2016). *Hosting Capacity Assessment and Improvement for Photovoltaic-Based Distributed Generation in Distorted Distribution Networks.* IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering.
- [41] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2015). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8.*
- [42] International Electrotechnical Commission. (2008). *IEC 61000-3-6 Electromagnetic compatibility - Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.*
- [43] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). (2010). *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8.*
- [44] Kerchner, R. M., & Corcoran, G. F. (1977). *Circuitos de Corrente Alternada.* Porto Alegre: Globo.

[45] Labeca, A. C. (2016). *Uma Visão Geral Sobre a Capacidade de Hospedagem de Geração Distribuída em Redes de Distribuição*. Uberlândia.

[46] Alubar. (11 de Junho de 2017). Fonte: Condutores em Alumínio com Alma de Aço CAA:

http://www.alubar.net.br/downloads/produtos/cabos_caa_condutores_de_aluminio_com_alma_de_aco.pdf