



**GRUPO 10**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA GRÁFICA DESTINADA À VISUALIZAÇÃO DE ÁREAS DE CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DETERMINADAS PELOS LIMITES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DO PONTO DE CONEXÃO DE FONTES RENOVÁVEIS**

**Fabício Montes Silva (\*)**  
UFU

**Ivan Nunes Santos**  
UFU

**Paulo Fernando Ribeiro**  
UNIFEI

**RESUMO**

O estudo de capacidade de hospedagem está voltado à determinação da máxima quantidade de geração eólica e fotovoltaica 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. No contexto da inserção destas gerações renováveis, dois índices em particular despertam maior interesse: sobretensões e distorções harmônicas. Assim sendo, este trabalho está voltado ao desenvolvimento de uma ferramenta gráfica para melhor visualização de áreas de capacidade de hospedagem determinadas pelos limites estabelecidos pelas distorções harmônicas do ponto de conexão.

**PALAVRAS-CHAVE**

Capacidade de Hospedagem, Distorções Harmônicas, Geração Eólica, Geração Solar, Geração Distribuída

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A matriz energética brasileira vem apresentando significantes alterações nesta última década, sendo que um fator de relevância nestas mudanças que estão ocorrendo, está ligado ao crescimento da inserção de energia solar, em sua forma fotovoltaica, e a eólica. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a previsão de crescimento da potência instalada dos parques eólicos nacionais para o fim de 2020 é de 17,3 GW, frente aos 10,7 GW de 2016, ou um crescimento de 60,9% em apenas três anos (1). Em termos de energia fotovoltaica, no Brasil, as primeiras fazendas solares ainda estão em processo de inserção, todavia a geração distribuída está com crescimento acelerado em toda rede de distribuição, vale ainda salientar que em termos mundiais, esta fonte, cresceu de 40 GW instalados em 2010 para mais de 130 GW instalados em 2013 (2).

Devido às particularidades intrínsecas das gerações de energia ora focadas, podem-se verificar distintos efeitos danosos correlatos à inserção destas na rede elétrica. Os efeitos mais comuns de serem encontrados nas redes quando da inserção são (3): sobretensões e subtensões; sobrecorrentes ou sobrecargas; harmônicos e; fluxo reverso de potência.

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. (4).

Ao se observar todos os impactos resultantes da 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, devido ao aumento da deterioração dos indicadores de qualidade. Esse ponto máximo tolerável de inserção de geração renovável é conhecido por capacidade de hospedagem. A definição de capacidade de hospedagem pode ser escrita como a quantidade máxima de geração dispersa, ou distribuída, que é suportada pela rede em um ponto específico do sistema de distribuição (5).

Este trabalho está focado na capacidade de hospedagem definida em termo das distorções harmônicas. Será apresentada uma ferramenta computacional desenvolvida com a intenção de contribuir para uma melhor

visualização, bem como a determinação da capacidade de hospedagem em função da elevação das distorções harmônicas de tensão no ponto de conexão.

## 2.0 - CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM EM TERMOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A integração dos parques eólicos e fazendas fotovoltaicas à rede é um ponto importante a se observar, tanto em relação à forte dinâmica imposta por estas no ponto de conexão no que se refere aos efeitos de injeção de potência, quanto por efeitos do processo de conversão de energia. As fontes de geração eólica e fotovoltaica se conectam à rede, em sua maioria, através de equipamentos de eletrônica de potência para inversão, que apresentam características não lineares. Tais características tornam estes equipamentos potenciais fontes de correntes harmônicas (5), como consequência de sua propagação na rede, distorções harmônicas de tensão podem ser verificadas. Devido aos efeitos danosos destas em equipamentos do sistema, diversas normas e recomendações foram criadas, com o intuito de limitar a poluição injetada na rede. Cabe citar:

- A *International Electrotechnical Commission* (IEC) que tem abrangência europeia e sua norma IEC 61000-3-2 (6) é referente às limitações de correntes injetadas na rede de baixa tensão. Normatiza e classifica equipamentos residenciais, como eletrônicos e eletrodomésticos, ferramentas e dispositivos de iluminação.
- Em 1992 o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) produziu a recomendação IEEE-519 (7) a qual descreve os principais fenômenos que causam a distorção harmônica, bem como estabelecimento de limites harmônicos no sistema elétrico em termos de níveis de tensão. Tal norma foi revisada em 2014, trazendo atualizações e adequações à realidade atual do sistema.
- No Brasil, a ANEEL possui no documento Procedimentos de Distribuição (PRODIST) de energia elétrica, em seu módulo 8 (8), diretrizes sobre a qualidade da energia elétrica, incluindo harmônicos. Nesta seção, dentre outros, é estabelecido limites para tensões harmônicas, bem como definição de termos para estudos harmônicos. Abrange circuitos de baixa, média e alta tensão até 230 kV.
- Para a rede básica, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estabelece os parâmetros mínimos de qualidade através do documento Procedimentos de Rede, no submódulo 2.8 (9).

Estas normas estabelecem, de uma forma geral, valores limites (ou recomendados) para as distorções harmônicas de tensão e, em alguns casos específicos, de corrente. Neste tocante, no presente trabalho, será empregada somente a norma brasileira relacionada à Rede Básica, para efeitos do cálculo de capacidade de hospedagem.

Entrando no mérito da capacidade de hospedagem em termos das distorções harmônicas, esta pode ser definida como o valor máximo de corrente harmônica de ordem  $h$  que pode ser injetada em um ponto do sistema de modo que a tensão harmônica, de mesma ordem, não ultrapasse o valor máximo de distorção aceitável. Tal valor de capacidade dependerá de distintos fatores, conforme será na sequência destacado, por meio dos equacionamentos pertinentes.

### 2.1 Equacionamento

O equacionamento será feito em um ponto de acoplamento comum (PAC) genérico, em conformidade com o embasamento matemático proposto na referência (10). A Figura 1 apresenta o circuito equivalente de Thévenin, de ordem  $h$ , representativo do sistema elétrico no ponto estudado para inserção de novas gerações de energia de característica não lineares (eólica e fotovoltaica).

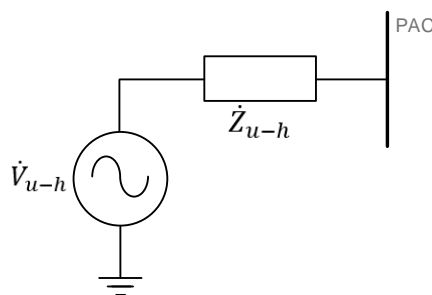


FIGURA 1- Equivalente de Thévenin para harmônicas de ordem  $h$ .

Nesta figura,  $\dot{V}_{u-h}$  representa a tensão harmônica de ordem  $h$  equivalente do sistema, este valor também é conhecido como *background distortion* do PAC, enquanto  $\dot{Z}_{u-h}$  é a impedância harmônica de mesma ordem vista a partir desta barra (11).

Uma forma alternativa ao circuito de Thévenin é o circuito equivalente de Norton, o qual pode ser observado na ilustração da Figura 2.

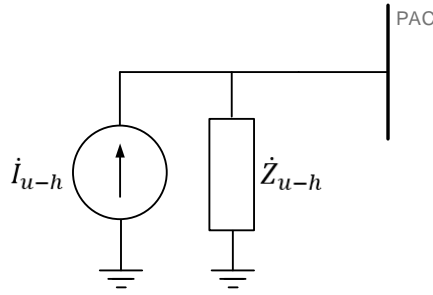


FIGURA 2 - Equivalente de Norton para harmônicas de ordem  $h$ .

Nesta:  $\dot{I}_{u-h}$  é a fonte equivalente de correntes geradas de ordem  $h$ , enquanto  $\dot{Z}_{u-h}$  é a mesma impedância anteriormente mencionada, contudo, neste circuito, conectada em paralelo (11).

Ao considerar a capacidade de hospedagem harmônica como o valor máximo de corrente harmônica de ordem  $h$  que pode ser injetada no PAC, de tal maneira que a tensão de mesma ordem não ultrapasse o valor máximo aceitável estabelecido por normas, pode-se assim escrever (10):

$$(\dot{I}_{u-h} + \dot{I}_{HC-h}) \cdot \dot{Z}_{u-h} = \dot{V}_{limite-h} \quad (1)$$

Na equação (1):  $V_{limite-h}$  é a tensão limite de ordem  $h$  determinada pelos códigos de redes para o barramento PAC e  $\dot{I}_{HC-h}$  representa a corrente de capacidade de hospedagem de ordem  $h$ .

Assumindo a forma de fasores para  $\dot{I}_{u-h}$  e  $\dot{I}_{HC-h}$  sendo  $\alpha$  e  $\beta$ , tem-se:  $\dot{I}_{u-h} = I_{u-h} \angle \alpha$  e  $\dot{I}_{HC-h} = I_{HC-h} \angle \beta$ . Na soma fasorial, o mínimo valor de capacidade de hospedagem é encontrado quando  $\alpha = \beta$  (10):

$$I_{HC-h} = \frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}} - I_{u-h} \quad (2)$$

Por outro lado, o máximo valor para a capacidade de hospedagem ocorre quando os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  se opõem, ou seja, quando  $\alpha - \beta = 180^\circ$ . Nesse caso, a equação de inserção de corrente  $I_{HC-h}$  será (10):

$$I_{HC-h} = \frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}} + I_{u-h} \quad (3)$$

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

$$I_{HC-h} = \frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}} \quad (4)$$

Uma vez aferida a tensão *background distortion*, de ordem  $h$ , no PAC ( $\dot{V}_{u-h}$ ), é possível determinar a corrente harmônica equivalente ( $\dot{I}_{u-h}$ ) por meio da equação (5), todavia é necessário o conhecimento das impedâncias harmônicas do sistema.

$$\dot{I}_{u-h} = \frac{\dot{V}_{u-h}}{Z_{u-h}} \quad (5)$$

De uma forma geral, a capacidade de hospedagem, no PAC, será atingida quando:

$$\dot{V}_{pac-h} = \dot{V}_{limite-h} \quad (6)$$

Vale ressaltar que a corrente de capacidade de hospedagem definida pela equação (2), quando  $\alpha = \beta$ , é tida como pior caso, enquanto aquela determinada pela equação (3), quando  $\alpha - \beta = 180^\circ$ , é considerada melhor caso. Isto se justifica, segundo autor da proposta, que na primeira situação tem-se um valor mínimo de capacidade de hospedagem, já no segundo caso este valor é máximo. Evidentemente, tais cálculos são empregados para determinação de uma faixa de capacidade de hospedagem, a qual dependerá da defasagem angular entre a fonte poluidora previamente existente no PAC e aquela que irá ser inserida. Cálculo este feito para cada ordem harmônica.

### 3.0 - PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO GRÁFICO PARA VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM HARMÔNICA

Com a aplicação direta dos equacionamentos mostrados na seção 2.1, é possível encontrar apenas valores máximos - equação (3) - e mínimos - equação (2) - para a capacidade de hospedagem, pois o conhecimento dos ângulos das fontes não são viáveis ou triviais de se estimar. Diante disto, é realizada, neste trabalho de pesquisa, uma proposição de ferramenta gráfica contemplando todas possibilidades de defasagens angulares entre as

correntes harmônicas equivalentes do sistema supridor e da geração. Assim sendo, será possível visualizar, em função da corrente a ser injetada, todos os pontos limites de capacidade de hospedagem. Para elaboração do gráfico tem-se por base a equação (5), já apresentada. Uma vez conhecida as tensões de *background* do PAC e, conseqüentemente as correntes ( $I_{u-h}$ ), 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 (7):

$$|(I_{u-h} + I_{HC-h}) \cdot Z_{u-h}| = V_{pac-h} \quad (7)$$

Com a variação da corrente  $I_{HC-h}$ , cria-se uma superfície que representa o módulo de tensão para os valores combinado entre módulo e ângulo desta equação. Isto deverá ser feito para cada ordem harmônica  $h$ . A Figura 3 ilustra um gráfico hipotético desta proposição.

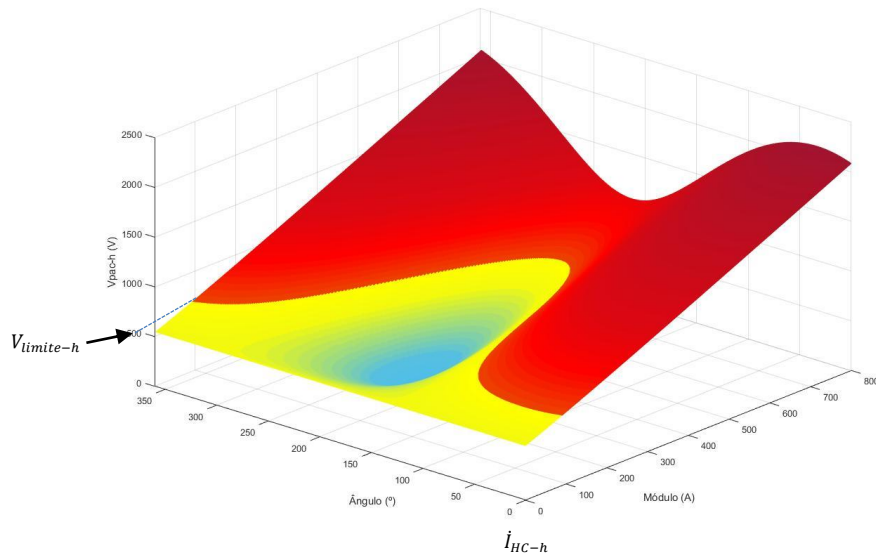


FIGURA 3 - Gráfico ilustrativo de um caso hipotético de avaliação de capacidade de hospedagem.

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 superior da capacidade de hospedagem.

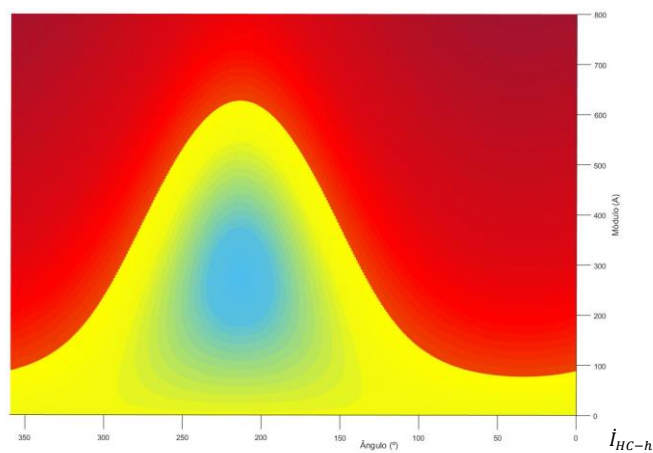


FIGURA 4 - Gráfico ilustrativo de um caso hipotético de avaliação de capacidade de hospedagem.

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  $30^\circ$ . 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  $50^\circ$ , o limite de distorção harmônica é violado, porém se o ângulo for de  $250^\circ$ , 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.

#### 4.0 - ESTUDO DE CASO COMPUTACIONAL E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO PROCESSO PROPOSTO

Para conduzir o estudo de caso, será utilizado como base o sistema de 14 barras do IEEE, o qual, via de regra, é empregado em estudos de fluxo de potência e dinâmica de sistemas. O mesmo encontra-se ilustrado na Figura 5, onde *LT* são as linhas de transmissão, *G* as gerações, *C* as cargas, *T* os transformadores e *CS* os compensadores estáticos presentes no sistema.

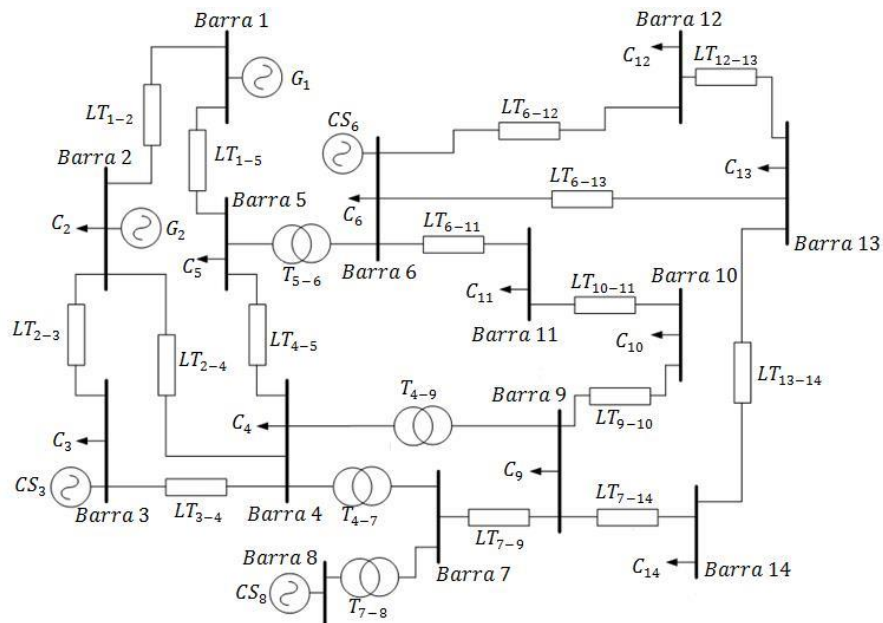


FIGURA 5 - Sistema IEEE 14 barras.

A opção pela utilização deste arranjo deu-se por conta de sua grande correlação com sistemas reais, além deste já ser amplamente difundido e utilizado no meio acadêmico. Por este mesmo motivo, dados detalhados deste arranjo não serão aqui repetidos, porém podem ser encontrados em diversas referências bibliográficas, tal qual a (11).

O sistema IEEE 14 barras, para fins do presente trabalho, será implementado no *software Matlab/Simulink*, por se tratar de uma ferramenta computacional confiável, de fácil operação e amplamente empregada.

O sistema teste selecionado terá, neste presente estudo, a inserção de fontes de distorções harmônicas em 6 barramentos distintos, a saber: barras 3, 4, 6, 9, 13 e 14. Este procedimento é necessário para que se possa ser realizadas as avaliações de capacidade de hospedagem aqui desenvolvidas. Tais fontes de distorção são implementadas por meio da inclusão de fontes de corrente harmônicas, que têm, neste estudo de caso, magnitudes variando entre 2% e 10% da corrente nominal do barramento. Foram escolhidas as ordens harmônicas: 5h, 7h, 11h e 13h, para realização das simulações. A TABELA 1 mostra as fontes de distorção inseridas no sistema IEEE 14 barras.

TABELA 1 - Fontes de distorção harmônica adicionadas ao sistema.

| Barramento | $i_{5h}$ (A)            | $i_{7h}$ (A)            | $i_{11h}$ (A)           | $i_{13h}$ (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         | $7,85\angle 137^\circ$  | $7\angle 108^\circ$     | $10,39\angle 222^\circ$ | $3,86\angle 48^\circ$   |

Uma vez estabelecido o sistema teste, foram selecionadas as barras 5 e 12 para avaliação de capacidade de hospedagem, via procedimento gráfico ora proposto. Vale destacar que os barramentos 5 e 12 possuem, respectivamente, níveis de tensão de 69 kV e 13,8 kV.

Para este estudo de capacidade de hospedagem, tendo em vista inserções de geração, tem-se que a norma pertinente, no que tange ao estabelecimento de valores limites de distorções harmônicas, são os Procedimentos de Rede do ONS (9). A TABELA 2 evidencia tais limites de distorções de tensão.

TABELA 2 – Limites individuais de distorção de tensão em porcentagem da tensão fundamental.

| 13,8 kV ≤ V < 69 kV |       |       |       | V ≥ 69 kV      |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| Impares             |       | Pares |       | Impares        |       | 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% |       |       |       |

Por meio de simulações computacionais foi possível encontrar as tensões harmônicas existentes nas barra 5 e 12 do sistema teste e, complementarmente, torna-se também factível a determinação das impedâncias harmônicas, ambas informações referentes às ordens harmônicas estudadas. Tais dados estão evidenciados nas TABELAS 3 e 4, respectivamente, para os barramentos 5 e 12.

TABELA 3 - Tensões e impedâncias harmônicas – Barra 5.

| Ordem Harmônica | Tensão (V)    | Impedância (Ω) |
|-----------------|---------------|----------------|
| 5               | 326,50∠137°   | 23,40∠13,16°   |
| 7               | 228,55∠147,6° | 24,30∠20,32°   |
| 11              | 58,77∠9,77°   | 25,57∠10,53°   |
| 13              | 111,01∠23,2°  | 44,32∠0,06°    |

TABELA 4 - Tensões e impedâncias harmônicas – Barra 12.

| Ordem Harmônica | Tensão (V)   | Impedância (Ω) |
|-----------------|--------------|----------------|
| 5               | 73,20∠101,4° | 2,10∠64,25°    |
| 7               | 40,26∠175,6° | 2,68∠66,5°     |
| 11              | 17,08∠46,5°  | 4,00∠68,23°    |
| 13              | 25,62∠131,7° | 4,7∠66,95°     |

Em posse dos dados de tensão e impedância harmônicas e também o *background distortion*, torna-se possível gerar os gráficos, apresentado o comportamento da tensão harmônica resultante no barramento em função do módulo e ângulo da corrente harmônica injetada, representativa, em termos, das geração a ser conectada no barramento. Para a barra 5, foram encontrados os gráficos ilustrados nas Figuras 6 e 7, respectivamente para as ordem harmônicas 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>.

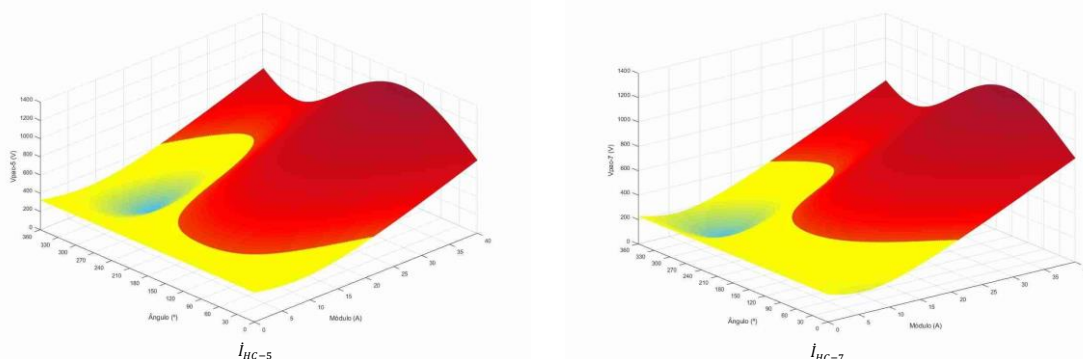


FIGURA 6 – Gráficos para análise da capacidade hospedagem - 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> harmônica - Barra 5.



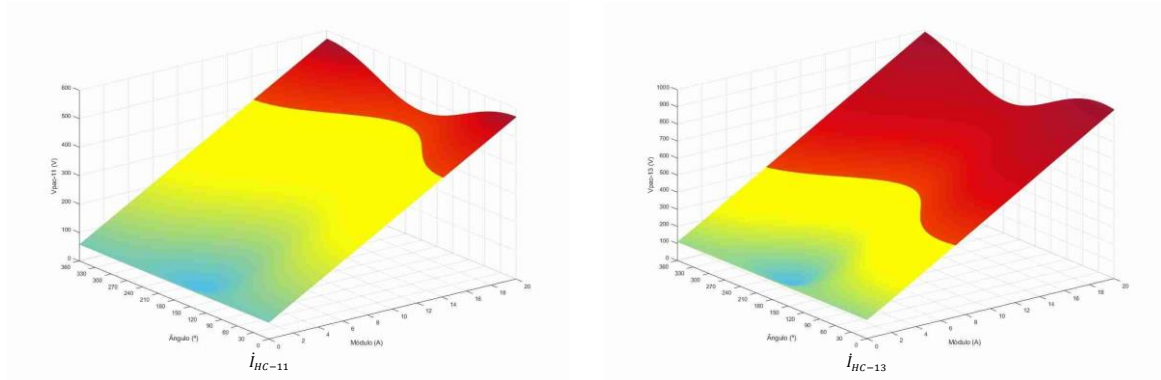


FIGURA 7 - Gráficos para análise da capacidade hospedagem - 11ª e 13ª harmônicas - Barra 5.

Na FIGURA 6 (gráfico à esquerda) é possível observar que a injeção de corrente de 5ª harmônica é restrita a menos de 5 A para ângulos entre 60 e 180 graus. Já o melhor cenário ocorre próximo aos 300 graus, 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 7ª harmônica demonstrado também nesta Figura 6 (gráfico à direita), visto que o valor mínimo de aproximadamente 7 A também ocorrem na faixa de 60 a 180 graus, e o melhor caso de capacidade de hospedagem – 25 A – ocorre próximo aos 300 graus.

Para as ordens 11ª e 13ª harmônicas (Figura 7), a variação é semelhante entre elas e menos significativa, 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 11ª é de 14 a 18 A e para 13ª é de 7 a 12 A.

Para o barramento 12, tem-se as Figuras 8 e 9 contemplando, respectivamente, as ordens harmônicas 5ª e 7ª, 11ª e 13ª, deste ponto do sistema.

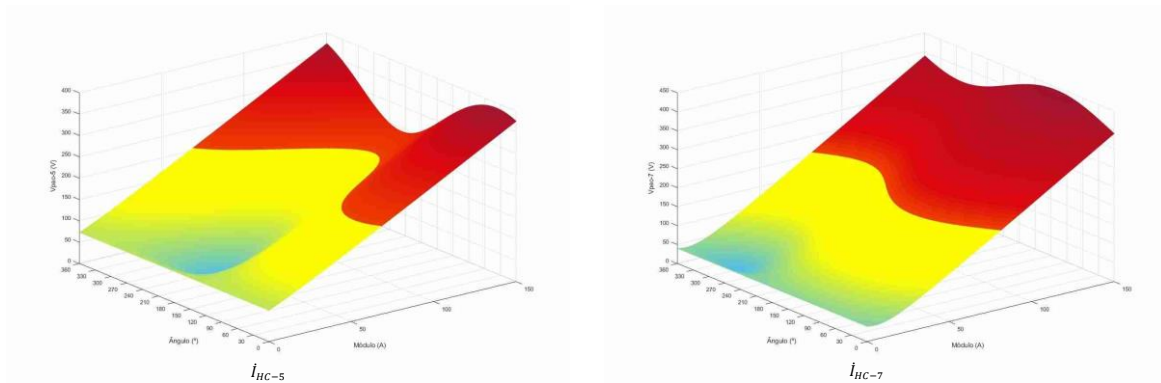


FIGURA 8 - Gráficos para análise da capacidade hospedagem - 5ª e 7ª harmônicas - Barra 12.

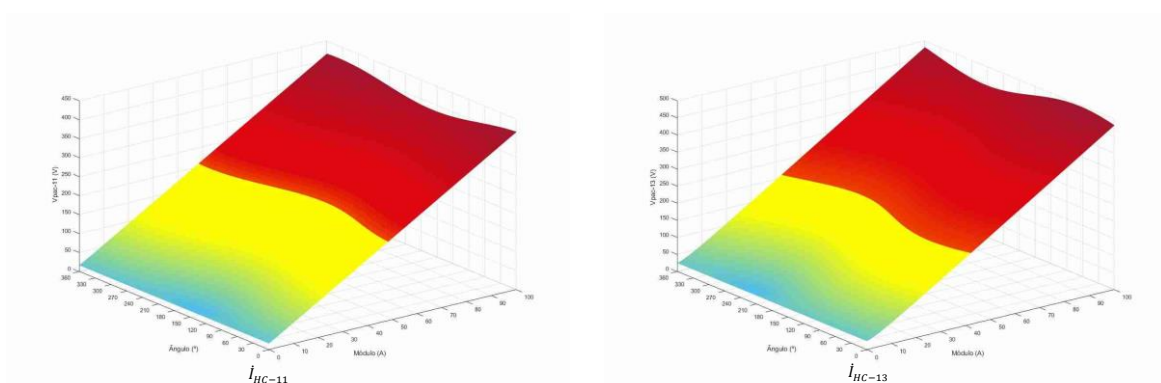


FIGURA 9 - Gráficos para análise da capacidade hospedagem - 11ª e 13ª harmônicas - Barra 12.

Para a 5ª Harmônica exibida na Figura 8 (gráfico à esquerda), o gráfico apresenta os limites mais restritos de injeção para valores entre 0 e 90°, aproximadamente 60 A e os melhores na região de 210°, atingindo até 130 A. Cabe notar que os gráficos de 7ª, 11ª e 13ª harmônicas (Figuras 8 e 9) para este caso apresentaram pequenas

variações entre o mínimo e máximo de corrente harmônica a ser injetada. Para 7ª harmônica, estes foram 60 A e 90 A a 120° e 300°, respectivamente. Para a 11ª, foi de 30 A a 40 A com ângulos 170° e 350°, respectivamente e finalmente para a 13ª 32 A a 42 A apresentando ângulos 60° e 240°.

## 5.0 - CONCLUSÃO

O estudo de capacidade de hospedagem integrando harmônicos é um assunto recente e carece de novas abordagens. Este trabalho propôs uma ferramenta para contribuir na visualização das distorções harmônicas, visto que além das situações de máxima e mínima capacidade de hospedagem, existem situações intermediárias, que com o devido controle, podem ser administradas pelo operador de uma rede genérica.

O estudo de caso executado traz um sistema bem difundido no meio acadêmico, que apresenta diferentes níveis de tensão e curto circuito. Os barramentos escolhidos para o desenvolvimento do estudo de caso ilustram o comportamento de injeção harmônica em alta e média tensão.

Este trabalho 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 apresentados ilustram tão somente estudo de distorções harmônicas individuais, cabendo ainda estudos futuros contemplando a distorção harmônica total e a correlação entre elas, bem como estabelecer meios de realização da análise em termo de potência e não de correntes. Não obstante à isto, torna-se mais fácil e didática a visualização da capacidade de hospedagem do sistema através desta ferramenta desenvolvida.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade Federal de Uberlândia, ao CNPq (proc. 460208-2014/4) e ao Grupo Neoenergia (PD ANEEL 7284-0001/2016) por todo suporte financeiro dado a esta pesquisa.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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>
- (2) Díaz-Gonzalez, F., Sumper, A., & Gomis-Bellmunt, O. (2016). Energy Storage in Power Systems
- (3) Seguin, R., Woyak, J., Costyk, D., Hambrick, J., & Mather, B. (2016). High-Penetration PV Integration Handbook for Distribution Engineers. NREL - National Renewable Energy Laboratory
- (4) 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
- (5) Bollen, M. H., Hassan, F. (2011). Integration of distributed generation in the power system. Nova Iorque: IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-Blackwell
- (6) International Electrotechnical Commission. (2001). IEC 61000-3-2 Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Limits for harmonic current emissions
- (7) Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). IEEE-519 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- (8) ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2015). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8
- (9) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). (2010). Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8.
- (10) Santos, I. N., Čuk, 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, 199-206
- (11) 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



## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Fabrício Montes Silva** nascido em 22/05/1990, em Uberlândia-MG, é engenheiro eletricitista (2013) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Experiência no setor de Construção Civil Pesada, Montagem Industrial e Orçamentos. Atualmente é estudante de mestrado na UFU. Sua principal área de interesse é qualidade da energia elétrica.



**Ivan Nunes Santos** nascido em 13/07/1979, em Prata-MG, é engenheiro eletricitista (2005), mestre (2007) e doutor (2011) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Em 2014 finalizou seu estágio pós-doutoral na Eindhoven University of Technology (TU/e), Holanda. Atualmente é professor e pesquisador na Faculdade Engenharia Elétrica da UFU. Suas principais áreas de interesse são: qualidade da energia, redes elétricas inteligentes e geração distribuída.



**Paulo Fernando Ribeiro** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1975), especialização pelo Power Technologies Inc. (PTI) 1979, Schenectady, New York, USA, doutorado pela University of Manchester (1985), MBA pelo Lynchburg College, Virginia, USA (2000). Atuou como professor na Universidade de Tecnologia de Eindhoven, Eindhoven, Holanda, na Virginia Tech University, Blacksburg, Virginia, Calvin College, Grand Rapids, Michigan, e Dordt College, Sioux Center, IA, USA. Atualmente é professor e pesquisador na Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. Suas áreas de interesse são: redes elétricas inteligentes e qualidade da energia.