

CALCULANDO A CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DA REDE COM VISTAS À INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO TOCANTE ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Ivan Nunes Santos e Laura Elisa Issa
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG, E-mails: ivan@ieee.org e lauraiissa@gmail.com

Resumo — Uma crescente inserção de geração distribuída vem sendo notada atualmente em todo o mundo. Este tipo de geração se apresenta sobremaneira caracterizada por conter em suas interfaces com o sistema elétrico dispositivos não lineares. Tais dispositivos podem levar os valores de distorções harmônicas à patamares inaceitáveis. Neste contexto, torna-se necessário a avaliação de metodologias para determinação do quanto de geração pode ser conectada ao sistema sem deteriorar sua performance, a então chamada “capacidade de hospedagem”. Neste artigo tem-se a apresentação e avaliação de uma metodologia para a determinação da capacidade de hospedagem no tocante às distorções harmônicas. Tem-se, também, a avaliação da mesma por meio de um estudo de caso.

Palavras chave — geração distribuída, distorções harmônicas, capacidade de hospedagem, qualidade da energia, geração renovável.

HARMONIC HOSTING CAPACITY ASSESSMENT FOR DISTRIBUTED GENERATION INSERTING

Abstract – Nowadays the distributed generation is increasing throughout the world. This kind of generation is mainly characterized by non-linear devices. These devices can carry the harmonic distortion to unacceptable values. In this context, the maximum amount of distributed generation that can be connected in a point of system is called hosting capacity. In the present research, it is applied and analyzed a methodology for hosting capacity assessment regarding harmonic distortions. A case study also has been performed.

Keywords – distributed generation, harmonic distortions, hosting capacity, power quality, renewable generation.



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

I. INTRODUÇÃO

O aumento mundial na geração de energia elétrica com base em fontes renováveis, sobremaneira alternativas, de energia distribuída tais como a energia eólica e solar tem preocupado os operadores de rede em relação a seu impacto sobre o sistema de energia elétrica. Esta integração é um dos desafios mais importantes para o futuro do sistema de elétrico de energia.

A quantidade de novas fontes de energia distribuídas que podem ser conectados a uma rede depende de vários fatores. As características das unidades de geração, parâmetros elétricos de rede local, requisitos regionais de conexão, capacidade de carregamento, etc. devem ser levados em consideração [1]. A quantidade máxima de geração dispersa que pode ser suportada pela rede de um ponto específico de sistema de distribuição pode ser chamada de capacidade de hospedagem [2]. Em outras palavras, a capacidade de hospedagem é a maior quantidade de geração distribuída (GD) que pode ser ligada a este ponto singular até um nível limite de desempenho particular seja alcançado [3-5].

O termo capacidade de hospedagem (do inglês “hosting capacity”) está relacionado, sobretudo, às questões da integração GD. Hoje em dia, esta é uma questão importante para várias áreas em sistema elétrico de potência. Na área de qualidade de energia, ela pode cobrir alguns índices, como sobretensão, subtensão, sobrecarga de corrente, harmônicos, tensão/correntes desequilibradas, etc. Estes indicadores podem restringir a quantidade máxima de GD que pode ser conectado ao sistema. A curva genérica com o índice de desempenho pode ser vista na Figura 1. Onde a aplicação de índice de desempenho genérico é usada para determinar a capacidade de hospedagem ilustrada [6].

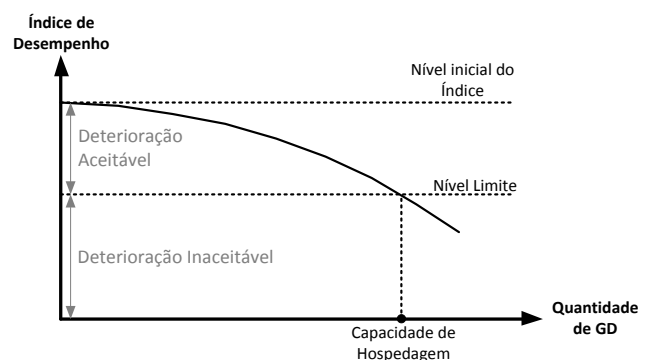


Fig. 1. Índice de desempenho versus quantidade de geração distribuída.

A geração distribuída, por exemplo a eólica e fotovoltaica, tipicamente usa conversores eletrônicos como interface para o acoplamento com a rede. Portanto, torna-se uma potencial fonte de correntes harmônicas [2]. A corrente introduzida não senoidal pode levar a distorção da tensão na rede para valores inadequados. Neste contexto, a capacidade de hospedagem harmônica pode ser definida como a quantidade máxima de GD que pode ser ligado à rede sem ultrapassar o limite de distorção harmônica em quaisquer das componentes harmônicas individuais de tensão.

Neste contexto, o presente artigo pretende tecer considerações acerca da metodologia para o cálculo da capacidade de hospedagem de Gerações distribuídas no que se refere às distorções harmônicas [8] e realizar uma aplicação da mesma em um sistema contendo geração eólica.

Na Figura 2, o comportamento deste indicador específico é descrito. Neste gráfico, o índice em destaque é a distorção harmônica existente no ponto de avaliação e o limite de distorção é a máxima distorção harmônica permitida neste ponto específico do sistema. Este limite depende dos códigos de redes vigentes. Além disso, é importante destacar que a forma da curva deste gráfico depende fortemente dos ângulos de fase harmônica da GD (efeitos de agregação), e impedâncias da rede.

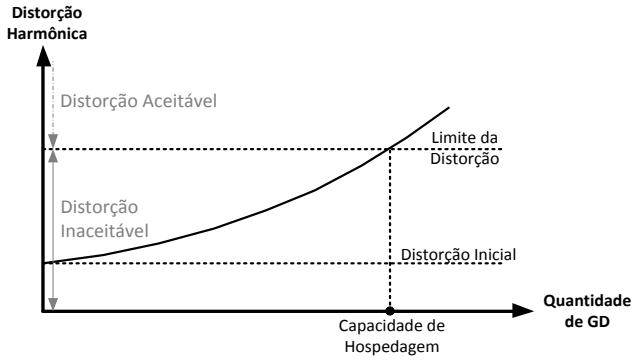


Fig. 2. Distorção harmônica versus quantidade de geração distribuída.

II. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM HARMÔNICA

Assumindo um instante particular do sistema elétrico em análise, uma situação genérica para distorção harmônica de ordem h pode ser considerado usando o circuito equivalente de Thévenin exibido na Figura 3. Nesta figura, \dot{Z}_{u-h} é a impedância equivalente harmônica do sistema da concessionária de ordem h e \dot{V}_{u-h} é a tensão harmônica de ordem h no barramento da concessionária. A distorção harmônica de tensão previamente verificada \dot{V}_{u-h} é devido às distorções harmônicas de um mesmo nível de tensão e também de redes à montante e à jusante.

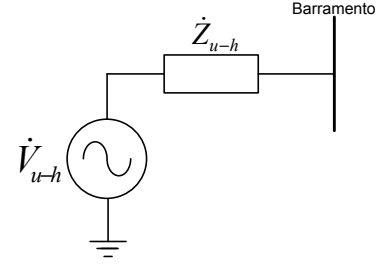


Fig. 3. Circuito Equivalente de Thévenin para harmônica de ordem h .

Este circuito pode ser representado usando seu circuito equivalente de Norton, como mostrou na Figura 4.

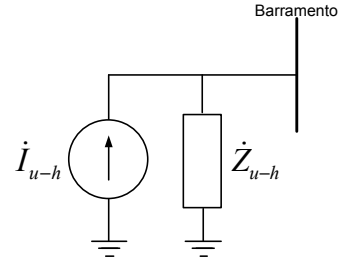


Fig. 4. Circuito equivalente de Norton para harmônica de ordem h .

Nesta figura \dot{I}_{u-h} é a corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo sistema da concessionária, que pode ser calculada por (1).

$$\dot{i}_{u-h} = \frac{\dot{V}_{u-h}}{\dot{Z}_{u-h}} \quad (1)$$

Se o ponto de conexão não tem conteúdo harmônico previamente existente (barramento sem distorção de fundo), os valores de $\dot{V}_{u-h} = \frac{\dot{V}_{u-h}}{\dot{Z}_{u-h}}$ serão nulos. Este é um caso particular deste processo genérico.

A capacidade de hospedagem de harmônica é definida como o valor máximo da corrente harmônica de ordem h que irá conduzir a tensão harmônica para um limite de distorção máxima aceitável. Definindo $\dot{V}_{limite-h}$ como o valor máximo da tensão harmônica, a capacidade de hospedagem harmônica para a harmônica de ordem h pode ser calculada pela seguinte equação:

$$|(\dot{I}_{u-h} + \dot{I}_{HC-h}) \cdot \dot{Z}_{u-h}| = V_{limite-h} \quad (2)$$

\dot{I}_{HC-h} é a capacidade de hospedagem da corrente harmônica de ordem h . Isto significa que o limite para a tensão harmônica de ordem h será atingida quando a corrente \dot{I}_{HC-h} for inserida nesse barramento. Supondo que $\dot{I}_{u-h} = \dot{I}_{uh} \angle \alpha$ e $\dot{I}_{HC-h} = \dot{I}_{HC-h} \angle \beta$, o valor mínimo para a capacidade de hospedagem harmônica (melhor caso) \dot{I}_{HC-h} pode ser calculada por (3).

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

Onde, Z_{uh} é o valor absoluto da impedância \dot{Z}_{uh} .

Por outro lado, o valor máximo para a capacidade de hospedagem harmônica (melhor situação) acontece quando o ângulo de fase α se opõe ao ângulo de fase β , isto é, $\alpha - \beta = 180^\circ$. A equação (4) representa esta situação.

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

Para ambos os cenários (piores e melhores), não é necessário conhecer os ângulos de fase das correntes harmônicas inseridas no barramento. No entanto, apenas um intervalo de capacidade de hospedagem poderá ser calculado, em que (3) e (4) dá o limite inferior e superior, respectivamente, para tal intervalo. Note-se que o intervalo é maior quando se aumenta a distorção harmônica existente no ponto avaliado. Por outro lado, que o intervalo será simétrico em torno da capacidade de hospedagem quando a distorção previamente verificada é nula.

Para realizar esta avaliação, é necessário saber o valor aproximado da impedância equivalente harmônica do sistema da concessionária. Isso pode ser estimado aplicando metodologias e medições específicas. Várias publicações na literatura abordam esta questão [9-13]. Neste trabalho, tais procedimentos não serão explorados.

A. Procedimento completo para o cálculo do pior e do melhor cenário

Para piores e melhores situações, o seguinte procedimento pode ser aplicado para cada harmônica de ordem h :

1. Selecione um barramento e defina a máxima distorção de tensão, qual será obtida por meio de informações de códigos de rede locais ou normas de regulação;
2. Determine a impedância harmônica equivalente de ordem h do sistema da concessionária (\dot{Z}_{u-h});
3. Meça a distorção harmônica de tensão do barramento; (\dot{V}_{uh}) - distorção harmônica de tensão previamente existente;
4. Calcule a corrente harmônica de ordem h equivalente produzida pelo lado do sistema da concessionária (\dot{I}_{uh}) com (1). Se não há distorção no barramento é nula, esta corrente será zero;
5. A partir da impedância da fonte e da distorção harmônica medida, calcular a magnitude da capacidade harmônica de ordem h (I_{HC-h}) para a pior situação usando (3) e para a melhor usando (4).

B. Levando em consideração as variações da rede elétrica

A fim de realizar este cálculo numa rede real para um longo ou curto período de tempo, certa quantidade de dados tem que estar disponível. Isto é devido às muitas variações que podem ser encontradas no presente sistema, tais como: variação das distorções de tensão do barramento e modificações da impedância harmônica da rede. Esse comportamento dinâmico é muito comum no sistema de energia, pois, entre outros fatores: variações de carga, o chaveamento de capacitores e transformadores, e as mudanças na inserção harmônica como consequência de cargas não lineares e GD.

Nesta situação, para calcular a emissão em função da capacidade instalada, as seguintes informações são necessárias:

- ✓ Valores da distorção harmônica da barra (magnitude da tensão e ângulo de fase), suas variações diárias, semanais e sazonais e mudanças esperadas no futuro próximo;
- ✓ Emissão do novo dispositivo ou instalação (instalação de energia solar ou eólica, neste caso, mas a mesma abordagem vale para outros tipos de equipamento): corrente harmônica, suas variações diárias, semanais e sazonais e qualquer correlação com a distorção de tensão;
- ✓ Fonte de impedância em função da frequência e qualquer variação de impedância da fonte, incluindo a sua correlação com as variações na tensão medida na barra e/ou as emissões harmônicas de novos dispositivos a serem inseridos.

Uma vez disponível esta informação, é possível determinar a capacidade de hospedagem, por meio do procedimento avaliado, para uma rede elétrica, mesmo quando as suas características e seus parâmetros estão variando.

III. ESTUDO DE CASO

O procedimento apresentado será avaliado nesta seção por um estudo de caso simples. Neste estudo, um verdadeiro sistema elétrico brasileiro é analisado para uma determinada condição de operação da rede. O esquema elétrico do sistema avaliado é mostrado na Figura 5.

O G1 é um gerador hidrelétrico, enquanto os outros são plantas de energia eólica. Neste estudo de caso, a capacidade de hospedagem é avaliada no barramento de 69 kV número 11. Tal escolha deveu-se ao fato desta barra possuir um nível de tensão menor e também ter a ela conectada geração eólica. As seguintes ordens harmônicas são considerados: 3^a, 5^a, 7^a, 11^a e 13^a.

A Tabela I apresenta os valores estimados de impedância do barramento 11, e na Tabela II mostra as tensões harmônicas verificadas no mesmo barramento.

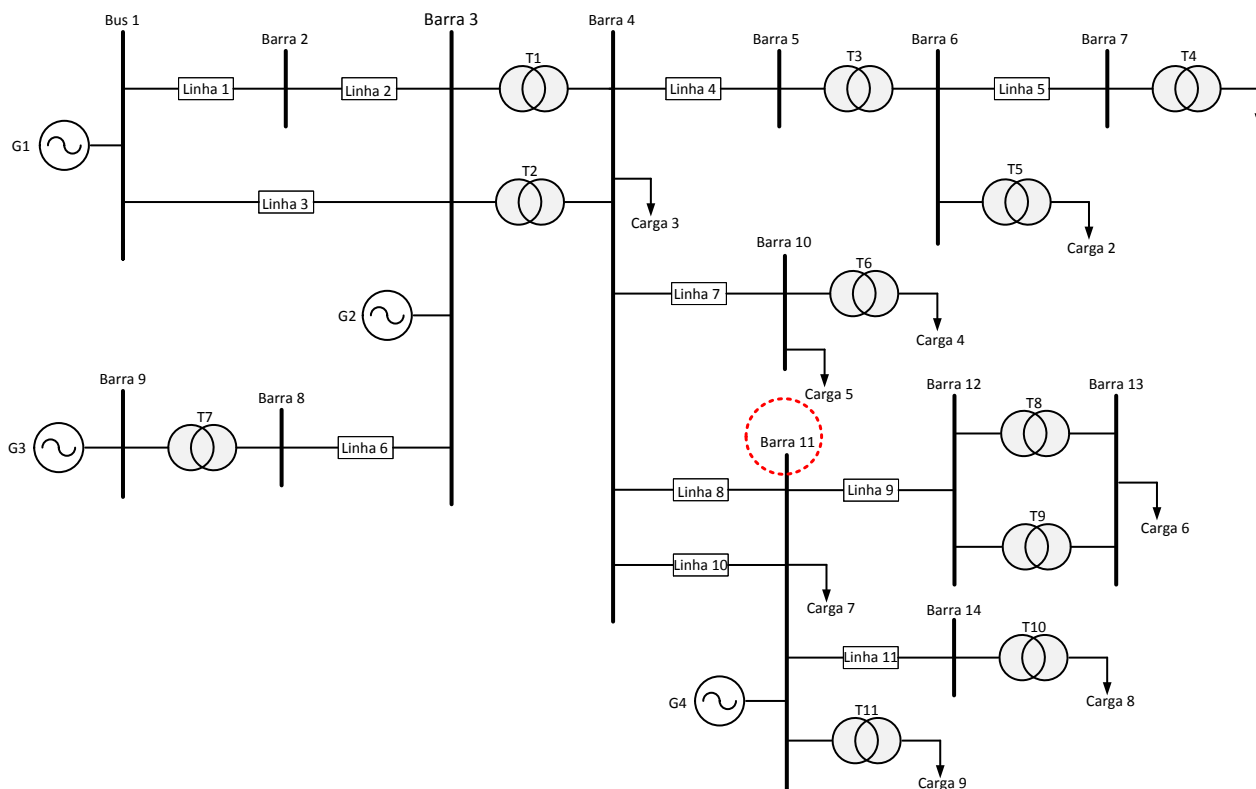


Fig. 5. Estudo de caso: diagrama de uma única linha elétrica de uma rede de distribuição brasileira.

TABELA I
IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS – BARRAMENTO 11 – ESTUDO DE CASO

Ordem	pu^a (%)
3 ^a	151,2
5 ^a	188,0
7 ^a	180,6
11 ^a	363,4
13 ^a	386,5

^a Valores de base: 69kV e 100MVA

TABELA II
DISTORÇÃO HARMÔNICA DA TENSÃO – BARRAMENTO 11 – ESTUDO DE CASO

Ordem	pu^a (%)
3 ^a	0,816
5 ^a	9,664
7 ^a	16,693
11 ^a	0,502
13 ^a	2,460

Na atual legislação de rede, para o sistema sob foco, tem-se o documento “Procedimentos de rede básica” como referência a ser empregada nos estudos ora objetivados. Portanto, os limites de distorção harmônica individual para este nível de tensão (69 kV) estão resumidos na Tabela III (limites globais).

TABELA III
LIMITES DE TENSÃO HARMÔNICA DA REDE ELÉTRICA BRASILEIRA

Ordem	pu (%)
3 ^a	2,0
5 ^a	2,0
7 ^a	2,0
11 ^a	1,5
13 ^a	1,5

O procedimento proposto é aplicado em relação a ambas as situações extremas (cenários piores e melhores) para as seis ordens harmônicas acima mencionadas.

Os resultados da avaliação da capacidade de hospedagem harmônica são apresentados na Tabela IV, para ambas as situações destacadas.

TABELA IV
RESULTADOS DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE HARMÔNICOS – BARRAMENTO 11 – ESTUDO DE CASO

Ordem	Pior Situação (limite inferior)		Melhor Situação (limite superior)	
	pu^a (%)	I (A)	pu^a (%)	I (A)
3 ^a	2,59	21,7	2,70	22,6
5 ^a	1,61	13,5	2,64	22,1
7 ^a	1,29	10,8	3,14	26,3
11 ^a	0,81	6,8	0,84	7,0
13 ^a	0,71	6,0	0,84	7,0

Podemos verificar, por meio da tabela anterior, que em verdade a aplicação das equações destinadas ao pior e melhor caso estabelece um limite mínimo e máximo para a capacidade da rede para hospedagem de novas gerações

distribuídas em um determinado PAC. Estes limites (superiores e inferiores) encontram-se, neste primeiro momento, em função da corrente, contudo há a necessidade de maiores desenvolvimentos para estabelecer uma paralelo desta corrente limite e o montante de potência de geração distribuída a ser conectada.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo enfatizou uma proposta de um procedimento para avaliação da capacidade de hospedagem relativo às distorções harmônicas em sistemas de transmissão e distribuição. Uma metodologia capaz de determinar a capacidade de hospedagem para um ponto específico da rede do sistema de energia foi apresentada. Além disso, um estudo de caso simples foi realizado destacando a aplicação da metodologia em questão.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressão seus agradecimentos à Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Elétrica e à CAPES (proc. BEX 10105/12-3).

REFERÊNCIAS

- [1] N. Etherden, and M. H. J. Bollen, "Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources," in *IEEE PowerTech*, Trondheim, 2011, pp. 1-7.
- [2] M. H. J. Bollen, and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System – IEEE Press Series on Power Engineering*, New York: Wiley-Blackwell, 2011.
- [3] J. Deuse, S. Grenard, and M. H. J. Bollen, "EU-DEEP integrated project – technical implications of the hosting-capacity of the system for DER," *Int. Journal of Distributed Energy Resources*, 4(1), pp. 17-34, 2008.
- [4] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen and G. Strbac, *Embedded generation - IEE Power and Energy Series*, Institution of Engineering and Technology, 2000.
- [5] M. H. J. Bollen, and N. Etherden, "Overload and overvoltage in low-voltage and medium-voltage networks due to renewable energy — Some illustrative case studies," in *IEEE PES ISGT Europe*, Sweden, 2011, pp. 1-8.
- [6] M. H. J. Bollen, Y. Yang, and F. Hassan, "Integration of distributed generation in the power system - a power quality approach," in *Int. Conf. on Harmonic and Quality of Power (ICHQP)*, Australia, 2008, pp. 1-8.
- [7] I. N. Santos, M. H. J. Bollen, and P. F. Ribeiro, "Methodology for Estimation of Harmonic Hosting," in *Int. Conf. on Harmonic and Quality of Power (ICHQP)*, Romania, 2014.
- [8] A. Oliveira, J. C. Oliveira, J. W. Resende, and M. S. Miskulin, "Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements," *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. 6, no. 4, pp. 1721-1726, 1991.
- [9] G. D. Breuer, G. Addis, R. H. Lasseter, and J. J. Vithayathil, "HVDC-AC harmonic interaction, Part I: A.C. system harmonic model with comparison of calculated and measured data," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 3, pp. 701-708, 1982.
- [10] G. D. Breuer, G. Addis, R. H. Lasseter, and J. J. Vithayathil, "HVDC-AC harmonic interaction, Part II: A.C. system harmonic model with comparison of calculated and measured data," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 3, pp. 709-718, 1982.
- [11] A. A. Girgis, and R. B. Mcmanis, "Frequency domain techniques for modeling distribution or transmission networks using capacitor switching induced transients," *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. 4, n. 3, pp. 1882-1890, 1989.

- [12] R. P. Stratford, "Harmonic pollution on power systems – a change in philosophy," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA-16, no. 5, pp. 43-67, 1980.
- [13] W. Xu, E. E. Ahmed, X. Zhang, and X. Liu, "Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions," *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 17, n. 1, pp. 210-216, 2002.

DADOS BIOGRÁFICOS

Ivan Nunes Santos, nascido em 13/07/1979 em Prata-MG, é engenheiro eletricista (2005), mestre (2007) e doutor em Engenharia Elétrica (2011) pela Universidade Federal de Uberlândia, tendo realizado recentemente pós-doutorado na Eindhoven University of Technology (2014). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Uberlândia. Suas áreas de interesse são: Redes Elétricas Inteligentes, Qualidade da Energia e Geração Distribuída.

Laura Elisa Issa, nascida em 28/11/1992 em Uberlândia-MG, é estudante do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente realiza pesquisa de Iniciação Científica com o projeto intitulado "Implementação e validação de interface computacional para análise de impactos de parques eólicos no ponto de conexão com o sistema elétrico de potência". Em 2013 realizou estágio na empresa Mi Omega Engenharia. Suas áreas de interesse são: Geração Distribuída e Qualidade da Energia Elétrica.