

Study of Harmonic Distortion Propagation from a Wind Park

R. Gregory, C. de Azevedo, and I. Santos, *Member, IEEE*

Abstract—Wind parks are electrical generation arrangements with non-linear characteristics. In fact, these complexes are potential sources of harmonic current injection upon the electric power systems, since their operation is fundamentally dependent on power electronic-based devices. Given this reality, for the connection of new installations, access studies must be carried out by the proponent according to the regulatory agency guidelines. In Brazil, these guidelines are given by the National Electric-System Operator according to a set of documents and instructions that support the requested studies. In this context, this paper is aimed at evaluating the influences of the PCC transformer representation and also the levels of background imbalance on the harmonic distortion propagation from a wind park. These influences are evaluated in the context of Brazilian regulatory standards by means of a typical national equivalent grid. In summary, the results suggest that the network representation may influence harmonic propagation.

Index Terms—Access studies, Background imbalances, Characteristic and non-characteristic harmonics, Harmonic propagation, PCC transformer model, Wind parks.

I. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética global tem impulsionado substancialmente os incentivos atrelados à geração de energia a partir de fontes renováveis, haja vista as preocupações relacionadas às questões ambientais, à diversificação da matriz energética e confiabilidade dos sistemas [1]–[3]. Em inúmeros países, a exemplo do Brasil, os suprimentos de energia oriundos dos complexos eólicos e fotovoltaicos têm se destacado sobremaneira, em virtude dos estímulos fiscais e do avanço das tecnologias requeridas, resultando na redução dos custos gerais das instalações [4], [5].

Muito embora o reconhecimento das inúmeras vantagens no que tange à aplicação das mencionadas tecnologias, sabe-se que tais complexos são capazes de provocar expressivas distorções harmônicas, as quais são capazes de se propagar pela rede caso nenhuma medida mitigatória seja aplicada [6]–[9]. Diante dessa conjuntura, as regulamentações nacionais e internacionais que versam sobre o tema estabelecem valores de referência para os indicadores de conformidade no tocante às distorções harmônicas, visando a não depreciação da qualidade da energia fornecida aos consumidores circunvizinhos.

Neste particular, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), por meio do Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, estabelece limites individuais e globais correspondentes aos máximos valores desejáveis para as distorções harmônicas individuais e totais no ponto de acoplamento comum (PAC), os quais são utilizados como referência para estudos e campanhas de medição [10].

Quanto ao acesso de novas instalações à Rede Básica que se enquadram na categoria de perturbadoras, a exemplo dos parques eólicos e das fazendas fotovoltaicas, é imperativa a realização de estudos de qualidade da energia, cujas orientações são estabelecidas em consonância com a Nota Técnica NT 009/2016 do ONS [11]. No tocante aos parques eólicos, objeto de estudo deste trabalho, não obstante a constatação da importância de procedimentos que visem à presciência no que diz respeito a operação dos acessantes, salienta-se que o documento supracitado sugere diversas simplificações atreladas à representação do sistema nos estudos requisitados. Por conseguinte, aspectos relevantes quanto ao real comportamento da rede elétrica podem estar sendo desconsiderados, sobretudo, no que se refere à representação dos transformadores de fronteira que conectam o parque eólico à Rede Básica, o que pode influenciar na propagação das correntes harmônicas para a rede.

Adicionalmente, é cômico que os parques eólicos, a depender das características pertinentes à topologia dos conversores e natureza do controle utilizado, são capazes de gerar harmônicos atípicos nas instalações, ditos “harmônicos não-característicos” [7], [12], [13]. Ademais, cabe ressaltar que estes harmônicos podem, ainda, ser intensificados caso a rede apresente um perfil pré-desequilibrado [14], [15]. Tais implicações não são claramente representadas nos estudos requeridos, haja vista as premissas adotadas na concepção da Rede Básica, a qual é atualmente tratada como um complexo ideal e perfeitamente equilibrado. Por conseguinte, os efeitos manifestados na prática podem ser, de certa forma, discrepantes dos fornecidos pelo relatório de acesso [8], podendo acarretar equívocos na propagação das distorções harmônicas [16].

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da representação do transformador de fronteira e dos níveis de desequilíbrios pré-existentes na rede sobre a propagação das distorções harmônicas oriundas de parques eólicos. Isso tem por princípio analisar as diretrizes demandadas no Brasil quanto ao acesso de novas instalações [11]. Para tanto, simulações computacionais são conduzidas, na plataforma MATLAB/Simulink®, em um complexo elétrico típico representativo do ponto de acoplamento entre um parque eólico e uma Rede Externa, considerando diferentes condições

R. C. F. Gregory, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG 38400-902, Brasil (e-mail: raquel.filiagi@gmail.com).

C. R. de Azevedo Jr., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG 38400-902, Brasil (e-mail: celsoazevedo@ufu.br).

I. N. Santos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG 38400-902, Brasil (e-mail: ivan@ieee.org).

operativas associadas à representação do transformador de fronteira e aos percentuais de desequilíbrios pré-existentes no ponto de conexão.

II. NORMAS E ORIENTAÇÕES PARA O ACESSO DE PARQUES EÓLICOS À REDE BÁSICA NO CONTEXTO HARMÔNICO

Os parques eólicos são complexos de geração com características não lineares, os quais podem contribuir para a elevação das distorções harmônicas presentes na rede de conexão. Sendo assim, para limitar a difusão de tais distúrbios quando do acesso de novas instalações, o ONS solicita aos agentes acessantes a elaboração de um relatório contendo estudos atinentes aos indicadores de conformidade no tocante às distorções harmônicas, os quais devem obedecer os limites apresentados na Tabela I [10], em consonância com a nota técnica NT 009/2016 – REV.02 [11].

TABELA I

LIMITES INDIVIDUAIS PARA OS INDICADORES DTHI E DTHTS95%

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25	1,5%	todos		3 a 25	0,6%	todos	
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

As mencionadas orientações são embasadas no cálculo de parâmetros críticos, ou seja, considerando as situações nas quais as distorções de tensão no PAC são máximas. Visando o atendimento a este quesito, a Rede Interna deve ser modelada a partir do circuito equivalente de Norton para cada ordem harmônica significativa, considerando todas as possíveis condições de operação do parque e que este se encontra desconectado da Rede Básica. Por outro lado, a impedância da rede externa é obtida pelo lugar geométrico (LG) no plano complexo das admitâncias. A Fig. 1 ilustra o circuito equivalente a ser considerado nos estudos em questão.

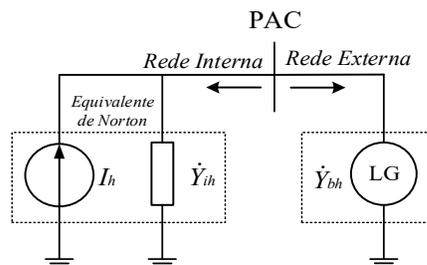


Fig. 1. Arranjo representativo do ponto de acoplamento comum entre o parque eólico e a Rede Básica.

Onde: I_h é a fonte de corrente harmônica equivalente, de ordem h , representativa da Rede Interna; \dot{Y}_{ih} é a admitância harmônica equivalente, de ordem h , da Rede Interna; \dot{Y}_{bh} é a admitância harmônica equivalente, de ordem h , da Rede Básica.

A admitância equivalente da Rede Interna (\dot{Y}_{ih}) é obtida a partir dos parâmetros constituintes do acessante, a exemplo dos cabos, transformadores, bancos de capacitores e filtros harmônicos. Para o cálculo da fonte de corrente equivalente

(I_h), a qual representa o conjunto de aerogeradores a serem operados, emprega-se a expressão enunciada em (1), em consonância com a IEC 61000-3-6 [17].

$$I_h = \left(\sum_{i=1}^m I_{n,i}^a \right)^{\left(\frac{1}{a} \right)} \quad (1)$$

onde: n é a ordem harmônica; m é o número total de fontes; e a é o fator de agregação.

Quanto ao mencionado fator de agregação, este se trata de um parâmetro constante para cada ordem harmônica e os pesos a ele atribuídos encontram-se apresentados na Tabela II.

TABELA II
CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA

Fator de Agregação	Ordem Harmônica
1	$n < 5$
1,4	$5 \leq n \leq 10$
2	$n > 10$

Embora reconheça-se que o fator de agregação permite, em certas situações, abrandar a intensidade das correntes harmônicas oriundas dos aerogeradores, vale salientar que, por vezes, as características de propagação de tais fenômenos não são consideradas nos estudos requisitados, visto que as correntes individuais não se propagam analogamente entre os terminais primário e secundário dos transformadores. Tal premissa se apresenta como base para os estudos de desempenho harmônico no programa HarmZs do CEPTEL, o qual é recomendado na nota técnica 009/2016 – REV.02.

A admitância representativa da Rede Externa (\dot{Y}_{bh}), para cada ordem harmônica, é calculada a partir do lugar geométrico das admitâncias no plano complexo, visando a minimização da admitância resultante entre o parque e a Rede Básica. O ONS recomenda o uso do Polígono de “n” Lados ou do Setor Anular para a representação do denominado LG, o qual contempla uma infinidade de pontos obtidos a partir do contingenciamento das linhas de transmissão e transformadores conectados ao PAC até a terceira vizinhança. Isso resulta em uma nuvem de pontos no plano complexo para cada ordem harmônica, tal como ilustra a Fig. 2 (a) e (b) [11].

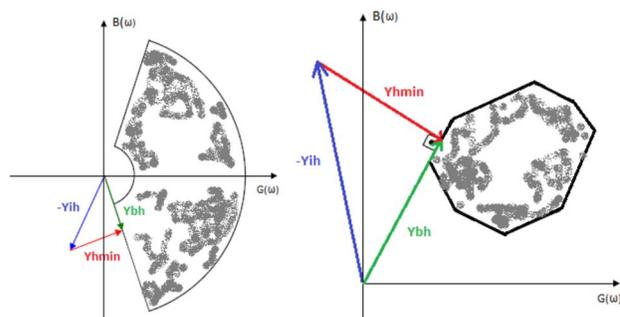


Fig. 2. Representação do Lugar Geométrico das admitâncias da Rede Básica pelo (a) Setor Anular e (b) Polígono de “n” Lados.

Portanto, a admitância mínima equivalente (Y_{hmin}), a qual é responsável pela maximização da tensão no PAC, pode ser

estimada em conformidade com (2).

$$Y_{h\min} = \left| \dot{Y}_{th} + \dot{Y}_{bh} \right| \quad (2)$$

Ressalta-se que caso a Rede Externa apresente um perfil pré-desequilibrado ou pré-distorcido, isso pode propiciar a atenuação ou a intensificação dos harmônicos manifestados no ponto de acoplamento comum. Tais considerações refletem diretamente na capacidade de difusão das correntes distorcidas pela rede e, caso ela seja tratada como um equivalente ideal e perfeitamente equilibrado, isso pode acarretar comportamento divergente da realidade física esperada.

III. COMPLEXO ELÉTRICO IMPLEMENTADO

Com a finalidade de explorar os aspectos concernentes à propagação dos harmônicos característicos e não característicos oriundos de parques eólicos, foi implementada uma Rede Externa e Interna no programa MATLAB/Simulink®. Os parâmetros e detalhes do arranjo são descritos na sequência.

A. Rede Externa

A Fig. 3 apresenta a Rede Externa utilizada nas simulações, a qual consiste de um equivalente elétrico típico do ponto de conexão de um parque eólico da região nordeste brasileira. As informações atreladas à parametrização são apresentadas nas Tabelas III a VII.

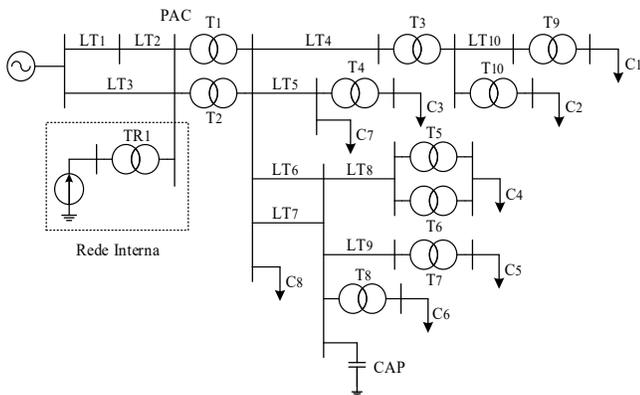


Fig. 3. Rede Externa pertinente a um trecho da interligação da região nordeste do Brasil – MATLAB/Simulink®.

TABELA III
REDE EXTERNA

Potência de Curto-circuito (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Frequência (Hz)
680	138	60

TABELA IV
CAPACITOR

Capacitor	Q (MVar)	Tensão Nominal (kV)
CAP	1,1	69

TABELA V
LINHAS DE TRANSMISSÃO

Linha	Resistência (Ω)		Indutância (mH)		Capacitância (μF)	
	R0	R1	L0	L1	C0	C1
LT1	17,05	17,05	152,55	152,55	1,140	1,140
LT2	2,51	2,51	22,43	22,43	0,167	0,167
LT3	16,72	16,72	172,51	172,51	1,330	1,330
LT4	9,88	9,88	60,34	60,34	0,480	0,480
LT5	0,06	0,06	0,36	0,36	0,003	0,003
LT6	2,37	2,37	14,48	14,48	0,110	0,110
LT7	2,09	2,09	18,19	18,19	0,140	0,140
LT8	0,70	0,70	6,06	6,06	0,050	0,050
LT9	13,05	13,05	54,52	54,52	0,370	0,370
LT10	8,39	8,39	27,32	27,32	0,310	0,310

TABELA VI
TRANSFORMADORES

Trafo	Potência Nominal (MVA)	Tensão Prim. (kV)	Tensão Sec. (kV)	R (%)	X (%)	Conexão
T1	60	138	69	0,10	15,50	Yt-Yt
T2	60	138	69	0,10	15,60	Yt-Yt
T3	12	69	34,5	0,10	6,17	Yt-Yt
T4	12	69	13,8	0,10	4,64	Δ-Yt
T5	12	69	13,8	0,10	6,15	Δ-Yt
T6	12	69	13,8	0,10	6,15	Δ-Yt
T7	5	69	13,8	0,10	6,01	Δ-Yt
T8	44	69	13,8	0,10	8,11	Δ-Yt
T9	6	34,5	13,8	0,10	8,15	Δ-Yt
T10	1	34,5	13,8	0,10	5,60	Δ-Yt

TABELA VII
CARGAS LINEARES

Carga	Tensão (kV)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
C1	13,8	1,70	0,70
C2	13,8	0,60	0,30
C3	13,8	6,30	4,60
C4	13,8	16,60	6,00
C5	13,8	2,20	0,30
C6	13,8	10,50	4,90
C7	69	5,00	2,10
C8	69	14,60	11,10

B. Rede Interna

A Fig. 4 apresenta a topologia da Rede Interna, a qual é composta por cinco aerogeradores de 2 MW com configuração do tipo *doubly-fed induction generator* (DFIG). Os parâmetros da Rede Interna são apresentados nas Tabelas VIII e IX.

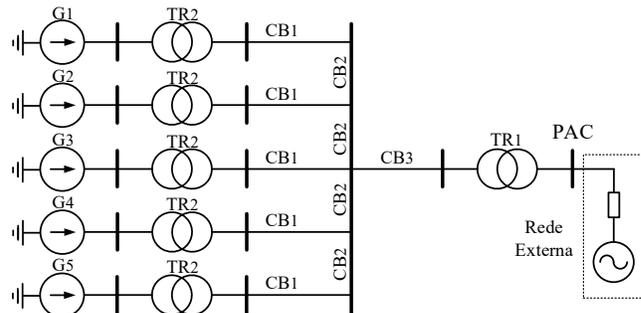


Fig. 4. Rede Interna representativa do parque eólico implementada no programa MATLAB/Simulink®.

TABELA VIII
CABOS – REDE INTERNA

Cabo	Resistência (Ω)		Indutância (mH)		Capacitância (μF)	
	R0	R1	L0	L1	C0	C1
CB1	0,522	0,017	0,143	0,029	9,45e-6	18,9e-6
CB2	3,043	0,101	0,835	0,167	55,1e-6	110e-6
CB3	1,714	0,057	0,833	0,167	59,5e-6	119e-6

TABELA IX
TRANSFORMADORES – REDE INTERNA

Trafo	Potência	Tensão	Tensão	R	X	Conexão
	Nominal (MVA)	Prim. (kV)	Sec. (kV)			
TR1	12	138	34,5	1,00	12,00	Yt- Δ
TR2	2	34,5	575	0,16	5,00	Δ -Yt

Os aerogeradores DFIG foram implementados baseando-se nos modelos disponíveis na biblioteca *SymPowerSystems* do programa MATLAB/Simulink®, os quais são amplamente empregados pela comunidade científica para a realização de estudos computacionais [18],[19]. É oportuno salientar que, no presente trabalho, ajustes quanto ao controle do chaveamento dos conversores e, sobretudo, no que tange ao denominado “tempo morto” de operação das chaves estáticas foram realizados. Tal atraso no chaveamento mostra-se necessário em conversores reais, a fim de evitar um curto-circuito no momento da comutação dos semicondutores operando em uma mesma ponte do conversor, além de influenciar no aspecto da forma de onda gerada pela modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) [13].

Quanto à caracterização da máquina de indução, esta pauta-se em um modelo geral com rotor bobinado, cujas informações encontram-se apresentadas na Tabela X.

TABELA X
GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR BOBINADO

Potência nominal (MVA)	2
Número de polos	6
Tensão nominal (V)	575
Frequência nominal (Hz)	60
Resistência do estator (pu)	0,023
Reatância do estator (pu)	0,18
Resistência do rotor (pu)	0,016
Reatância do rotor (pu)	0,16
Indutância mútua (pu)	2,9
Inércia do gerador (s)	0,685

No que concerne aos conversores de conexão, estes foram modelados de acordo com as topologias típicas empregadas em aerogeradores DFIG comerciais [20], [21], ou seja, considerando um arranjo *back-to-back* de duas unidades conversoras do tipo fonte de tensão (VSC - *Voltage Source Converter*), quais sejam, conversor do lado do rotor (RSC - *Rotor Side Converter*) e conversor do lado da rede (GSC - *Grid Side Converter*), os quais realizam o controle do campo magnético da máquina por meio de chaves semicondutoras do tipo IGBTs.

No que tange às funções de controle do RSC e GSC, vale ressaltar que foram utilizadas técnicas baseadas na teoria de controle vetorial. Conjuntamente, um sistema de geração de pulsos do tipo senoidal (SPWM) promove o comando das chaves semicondutoras. Maiores detalhes acerca das

particularidades dos mencionados conversores são apresentados nas Tabelas XI e XII.

TABELA XI
CONVERSOR DO LADO DO GERADOR (RSC)

“Tempo morto” das chaves (μs)	10
Frequência de chaveamento (Hz)	1620
Ganho proporcional para controle de corrente	0,83
Ganho integral para controle de corrente	5
Ganho proporcional para controle de reativos	0,05
Ganho integral para controle de reativos	20
Ganho proporcional para MPPT	3
Ganho integral para MPPT	30

TABELA XII
CONVERSOR DO LADO DA REDE (GSC)

“Tempo morto” das chaves (μs)	10
Frequência de chaveamento (Hz)	2700
Filtro LCL – Indutância do lado do conversor (pu)	0,003
Filtro LCL – Capacitância (pu)	0,15
Ganho proporcional para controle de corrente	0,83
Ganho integral para controle de corrente	5
Ganho proporcional para controle da tensão no barramento CC	8
Ganho integral para controle da tensão no barramento CC	400

Por fim, o espectro harmônico resultante da operação de apenas um aerogerador, sob condição nominal de operação, é apresentado na Fig. 5. Ressalta-se que o conteúdo harmônico aqui representado é condizente com resultados típicos de medições auferidas em campo [22].

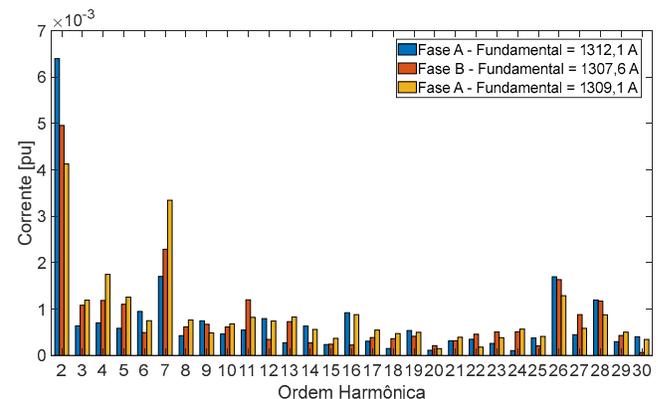


Fig. 5. Espectro harmônico de corrente de um aerogerador, operando com velocidade nominal – 2MW.

IV. ESTUDOS DE CASOS

Nesta seção, são apresentados os estudos computacionais avaliando distintas condições operativas associadas à topologia do transformador de fronteira e aos níveis de desequilíbrio pré-existent na rede de conexão. Nesse sentido, salienta-se que os percentuais de desequilíbrio foram arbitrados a fim de avaliar a influência de diferentes níveis de desequilíbrios pré-existent sobre a propagação dos harmônicos oriundos do parque. Além disso, os percentuais de 2% e 4% foram obtidos a partir de combinações aleatórias dos módulos e ângulos das tensões de alimentação do equivalente da Rede Externa, de forma a gerar o fator de desequilíbrio desejado no PAC de acordo com o método das Componentes Simétricas.

No que se refere aos modelos representativos dos

transformadores de fronteira, duas topologias foram consideradas. A primeira, dita como simplificada, baseia-se na representação sugerida em [11], ou seja, considerando que o transformador é representado por uma simples impedância. Além disso, por se tratar de uma representação monofásica, esse modelo não contempla o defasamento angular entre o primário e secundário do transformador, desconsiderando as características de propagação das componentes de sequência. A segunda topologia, aqui nomeada como realística, baseia-se no modelo de transformador trifásico disponível na biblioteca *SimPowerSystems* do software MATLAB/Simulink®, o qual foi escolhido por se tratar de um modelo mais fidedigno, além de ser largamente utilizado pela comunidade científica [19].

A. Caso 1 – Rede Externa com Desequilíbrio de 0%

Neste caso são analisadas as correntes harmônicas procedentes do parque eólico considerando uma Rede Externa perfeitamente equilibrada e abrangendo as duas topologias do transformador TR1 (Fig. 4). Isso tem por meta observar a influência dos modelos representativos dos transformadores de fronteira na propagação das distorções harmônicas individuais, considerando uma Rede Externa com características ideais.

B. Caso 2 – Rede Externa com Desequilíbrio de 2%

No presente estudo foram adotadas as mesmas premissas abordadas no Caso 1, entretanto, considerando que a Rede Externa gera um desequilíbrio de tensão em torno de 2% no PAC, objetivando analisar a influência dos níveis máximos de desequilíbrios recomendados pelas regulamentações vigentes sobre os harmônicos oriundos do parque.

C. Caso 3 – Rede Externa com Desequilíbrio de 4%

Similarmente, no terceiro caso foram exploradas condições operativas análogas aos demais estudos, contudo, supondo-se que a Rede Externa provoca um desequilíbrio de tensão próximo a 4% no PAC. De fato, tal abordagem objetiva analisar a propagação dos harmônicos característicos e não-característicos quando da presença de desequilíbrios expressivos no ponto de acoplamento.

V. RESULTADOS

A. Caso 1 – Rede Externa com Desequilíbrio de 0%

A Fig. 6 e Fig. 7 ilustram os resultados auferidos no que tange à propagação das distorções individuais de corrente manifestadas no PAC quando TR1 é representado de forma simplificada e realística, respectivamente.

Comparando-se as Fig. 6 e Fig. 7 é possível inferir que os harmônicos mais significativos, quais sejam, de 2^a, 7^a e 11^a ordens propagados no lado de alta do transformador TR1 são mais acentuados quando da sua representação simplificada do que os harmônicos manifestados na condição em que tal equipamento é modelado de forma realística.

Já em relação às distorções de tensão, as Fig. 8 e Fig. 9 apresentam o espectro harmônico considerando TR1 representado de forma simplificada e realística, respectivamente.

Os resultados supracitados evidenciam que as distorções de tensão do PAC são mais acentuadas quando o transformador de

fronteira é modelado de forma simplificada, especialmente no que tange às ordens mais significativas, que no caso são os de 2^a, 4^a e 7^a ordens. Por conseguinte, é plausível afirmar que, de fato, a representação do transformador pode exercer influência na propagação dos harmônicos para a Rede Externa.

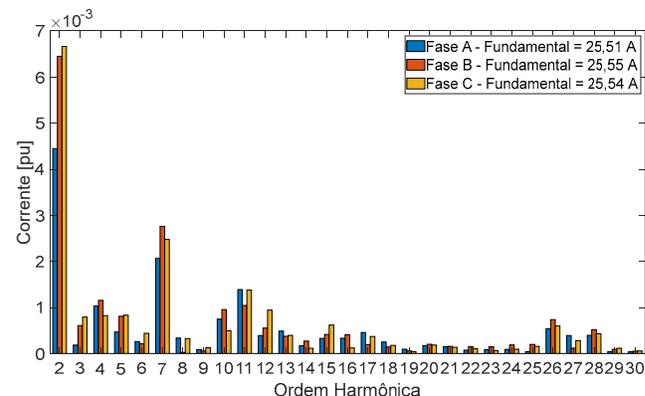


Fig. 6. Espectro harmônico das correntes no PAC para TR1 simplificado – Caso 1.

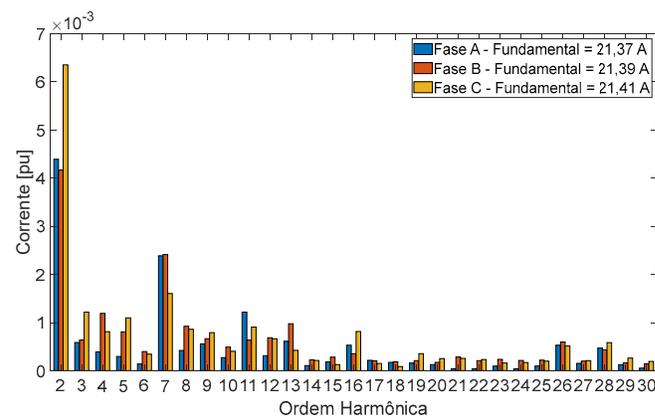


Fig. 7. Espectro harmônico das correntes no PAC para TR1 realístico – Caso 1.

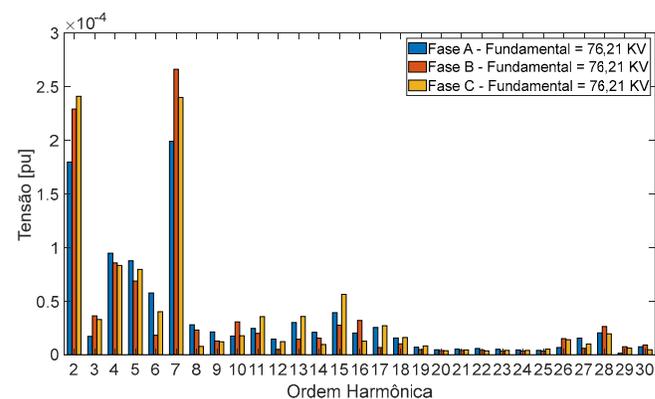


Fig. 8. Espectro harmônico das tensões no PAC para TR1 simplificado – Caso 1.

B. Caso 2 – Rede Externa com Desequilíbrio de 2%

Para o segundo caso, as Fig. 10 e Fig. 11 apresentam os resultados obtidos no tocante às distorções de corrente no PAC, para TR1 representado via modelo simplificado e realístico, respectivamente.

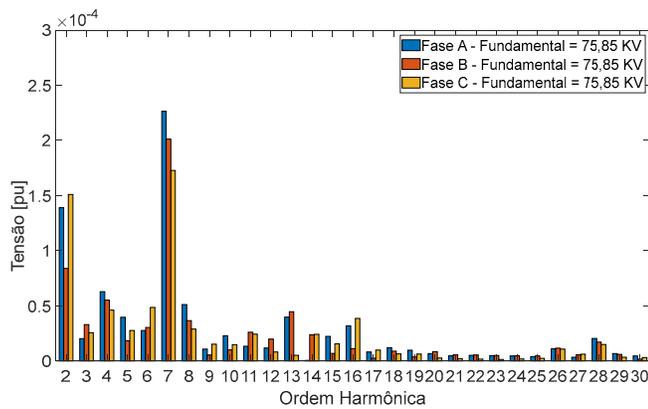


Fig. 9. Espectro harmônico das tensões no PAC para TR1 realístico – Caso 1.

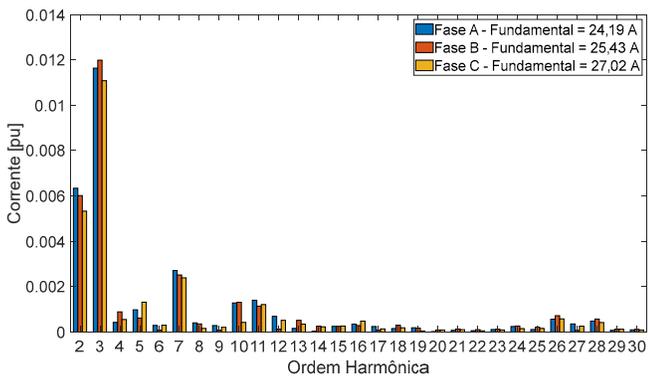


Fig. 10. Espectro harmônico das correntes no PAC para TR1 simplificado – Caso 2.

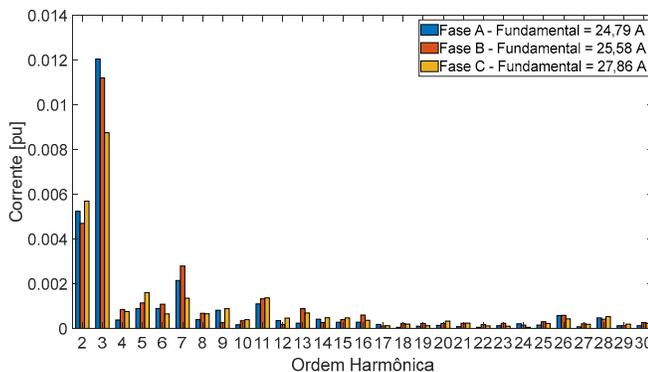


Fig. 11. Espectro harmônico das correntes no PAC para TR1 realístico – Caso 2.

As Fig. 10 e Fig. 11 sugerem que, na presença de uma rede com perfil pré-desequilibrado, para os dois modelos de transformadores, há um aumento da 3ª ordem. De fato, era esperado que o aumento da 3ª ordem ocorreria, haja vista a presença de desequilíbrios no barramento de conexão. Ademais, comparando-se ambos os modelos do transformador, observou-se uma breve redução das ordens harmônicas mais significativas (2ª, 3ª e 7ª ordens), muito embora tenha ocorrido um leve incremento de outras harmônicas, a exemplo da 5ª, 6ª, 8ª e 9ª ordens. Nesse sentido, vale salientar que tais desbalanceamentos podem provocar a acentuação ou atenuação das distorções harmônicas no PAC, a depender do módulo e ângulo de defasagem entre as correntes de sequência geradas

pela rede com perfil pré-desequilibrado e as provenientes da operação assimétrica do parque para cada ordem harmônica. De modo geral, no presente estudo notou-se que o transformador realístico se apresentou como instrumento atenuador para as ordens mais significativas.

Os espectros harmônicos de tensão para ambos os modelos de transformador encontram-se ilustrados na Fig.12 e Fig. 13.

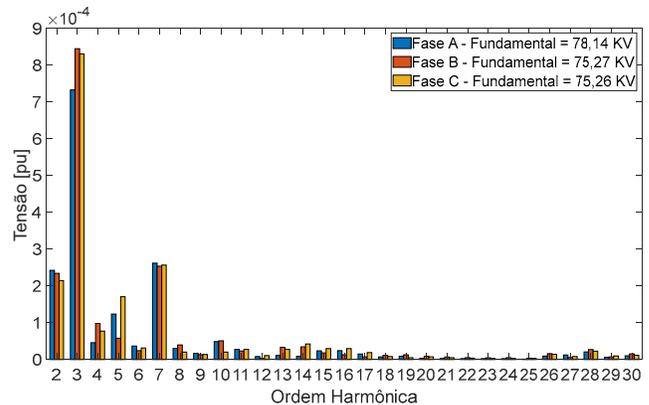


Fig. 12. Espectro harmônico das tensões no PAC para TR1 simplificado – Caso 2.

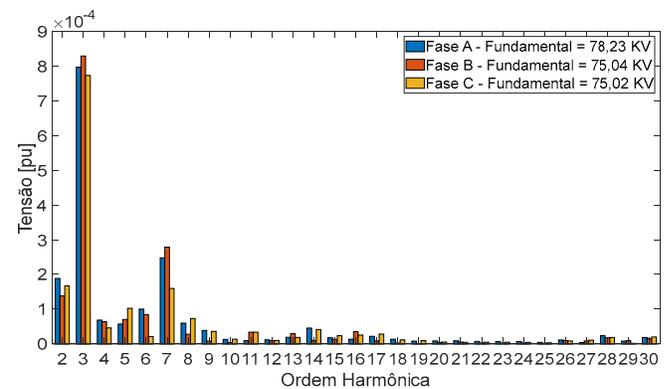


Fig. 13. Espectro harmônico das tensões no PAC para TR1 realístico – Caso 2.

De posse das informações supramencionadas, vale destacar que, genericamente, a amplitude do espectro harmônico das tensões mais significativas (2ª e 3ª), para a condição na qual considerou-se a representação realista do transformador TR1, é ligeiramente menor quando comparada àquela apresentada pela concepção simplificada. De fato, tais resultados evidenciam a importância da representação dos transformadores de fronteira na elaboração dos estudos para a conexão de parques eólicos às redes elétricas.

C. Caso 3 – Rede Externa com desequilíbrio de 4%

A presente situação de operação conduziu às informações expostas nas Fig. 14 a Fig. 17.

Para um PAC com 4% de desequilíbrio, considerando ambos os modelos de transformadores, observou-se que a magnitude das tensões e correntes individuais mais significativas (2ª e 3ª ordens) é ligeiramente menor quando da concepção realística, muito embora as diferenças não tenham sido substanciais para as demais ordens.

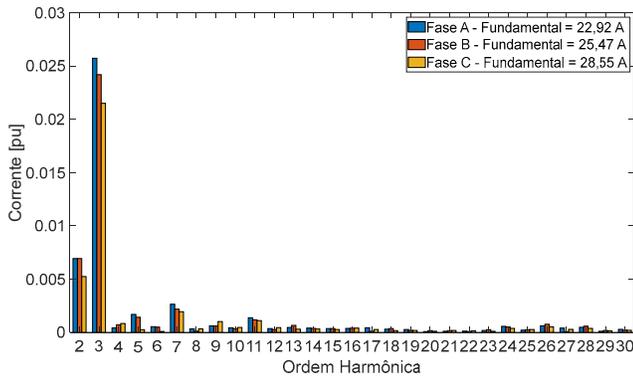


Fig. 14. Espectro harmônico das correntes no PAC para TR1 simplificado – Caso 3.

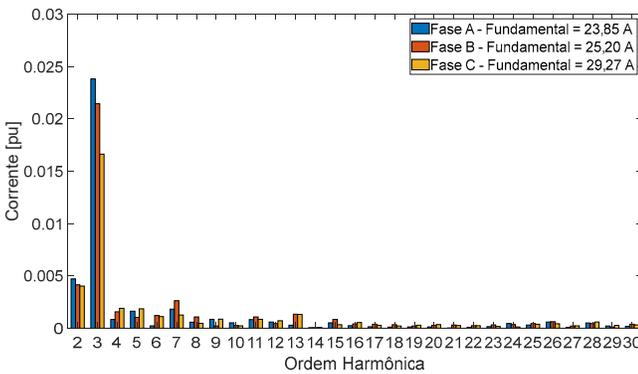


Fig. 15. Espectro harmônico das correntes no PAC para TR1 realístico – Caso 3.

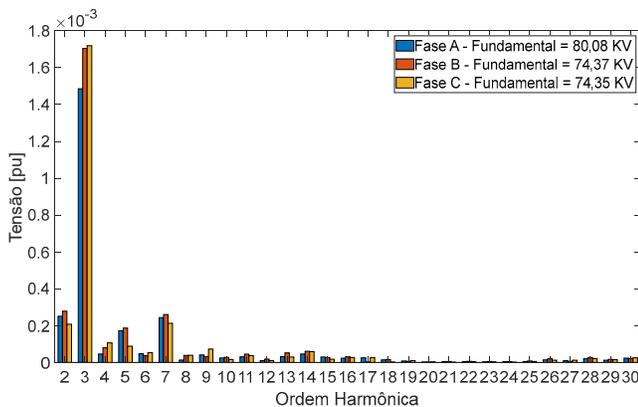


Fig. 16. Espectro harmônico das tensões no PAC para TR1 simplificado – Caso 3.

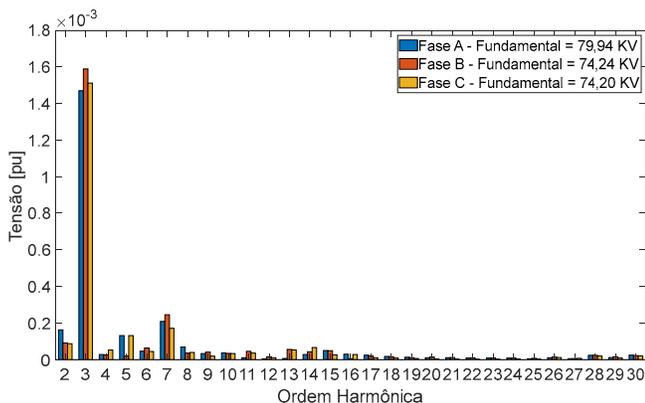


Fig. 17. Espectro harmônico das tensões no PAC para TR1 realístico – Caso 3.

Tais constatações sugerem que, mais uma vez, a representação realística se apresenta como instrumento atenuador na propagação dos harmônicos não-característicos em frequências próximas a fundamental.

A Tabela XIII apresenta as distorções harmônicas totais de tensão (DTHT) e corrente (DIHT), cujos valores correspondem ao maior percentual obtido entre as fases [10], considerando as duas representações do transformador TR1 e todos os casos em estudo.

TABELA XIII
DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS

Casos	Transformador Simplificado		Transformador Realístico	
	DTHT (%)	DIHT (%)	DTHT (%)	DIHT (%)
1	0,04	0,75	0,03	0,71
2	0,09	1,38	0,09	1,34
3	0,17	2,69	0,16	2,45

A partir da Tabela XIII nota-se que, no contexto da topologia do transformador de fronteira, as distorções totais de correntes são mais acentuadas quando da sua representação simplificada. As distorções totais de tensão, por sua vez, não manifestaram diferenças substanciais entre as representações utilizadas e os resultados apresentaram percentuais muito abaixo do limite regulamentado de 1,5% (Tabela I).

Quanto às interações entre a rede com perfil pré-desequilibrado e as distorções totais no PAC, ressalta-se que houve um incremento das DTHTs e DIHTs em ambas as representações quando do aumento do desequilíbrio.

Em suma, uma vez que o parque eólico em questão é responsável pela propagação de harmônicos de baixa magnitude, pode-se inferir que, para este estudo, não houve uma influência significativa do modelo de transformador sobre as distorções totais de tensão. Contudo, nas condições em que os percentuais de distorção são elevados ou próximos aos limites estabelecidos pela regulamentação vigente, tal como ocorre em redes ressonantes, deve-se considerar que o modelo simplificado do transformador de fronteira pode causar um incremento dos harmônicos propagados para a rede, acarretando na necessidade de estratégias de mitigação que, em tese, poderiam ser dispensáveis caso fosse empregada a concepção realista.

VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou investigar a influência do modelo do transformador de fronteira e dos níveis de desequilíbrios pré-existentes no PAC sobre a propagação dos harmônicos oriundos de parques eólicos. Isso teve por foco analisar as premissas adotadas para a representação da rede nos estudos requisitados pelas regulamentações brasileiras, de forma a contribuir com avaliações no contexto da temática aqui tratada. Para atingir tais objetivos, foram realizadas simulações computacionais em um complexo elétrico análogo a uma instalação real, representando o ponto de conexão entre um parque eólico e o sistema elétrico interligado.

Nesse contexto, os resultados evidenciaram que o modelo do transformador, de fato, pode exercer influência sobre a magnitude das distorções individuais de corrente no PAC,

sobretudo quanto às harmônicas não-características mais significativas (2ª e 3ª ordens). No que concerne as interações entre as tensões com perfil pré-desequilibrado e as distorções provenientes do parque, notou-se uma intensificação das harmônicas de 3ª ordem proporcional ao aumento do desequilíbrio. Em contrapartida, as demais ordens harmônicas ora sofreram incremento ora decréscimo a depender do ângulo de defasagem entre as correntes de sequência geradas pela rede com perfil pré-desequilibrado e as provenientes da operação assimétrica do parque. Todavia, no que tange às distorções totais, não foi observada influência significativa do modelo de transformador sobre as DTHTs, muito embora as contribuições de corrente tenham se apresentado de forma mais acentuada quando da representação simplificada.

Diante das constatações supracitadas, não obstante o reconhecimento dos esforços empregados por parte dos órgãos reguladores na concepção de documentos orientativos para o acesso de parques eólicos à Rede Básica, estudos e discussões ainda se fazem necessários, a fim de contribuir com a proposição de modelos que reflitam o comportamento do sistema de forma mais realista.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Aguilar, A. Vazquez, F. Canales, and J. Gordillo, "Integrated DC - AC Converter as Power Conditioner for Fuel Cell Based System," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2107–2113, May 2016. 10.1109/TLA.2016.7530402.
- [2] A. S. Cerqueira, C. A. Duque, M. V. Ribeiro, and R. M. Trindade, "Digital System for Detection and Classification of Power Quality Disturbances," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 4, no. 5, pp. 345–352, Sep. 2006. 10.1109/TLA.2006.4472134.
- [3] A. Reis, "Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização das Distorções Harmônicas," Ph.D dissertation, Dept. Elect. Eng., Fed. Univ. of Uberlândia, MG, Brazil, 2015.
- [4] L. P. Moura, "Avaliação Experimental do Desempenho de Unidades Eólicas Quanto à Geração de Distorções Harmônicas," M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Fed. Univ. of Uberlândia, MG, Brazil, 2017.
- [5] F. C. Melo, R. R. Spaduto, L. C. G. Freitas, C. E. Tavares, J. R. Macedo Jr, and P. H. O. Rezende, "Harmonic Distortion Analysis in a Low Voltage Grid-Connected Photovoltaic System," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 1, pp. 136–142, Jan. 2015. 10.1109/TLA.2015.7040640.
- [6] L. P. Moura, A. Reis, M. da S. Lima, J. C. De Oliveira, and I. N. Santos, "Experimental Evaluation of Wind Turbines Inverters on Generating Harmonic Currents," *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, Jan. 2019. 10.1515/ijeeps-2018-0210.
- [7] M. H. J. Bollen, Liangzhong Yao, S. K. Rönnerberg, and M. Wahlberg, "Harmonic and interharmonic distortion due to a windpark," in *IEEE PES General Meeting*, 2010.
- [8] A. Reis, I. N. Santos, and R. O. Diniz, "Performance Evaluation of Harmonic Current Summation Law Applying to the Wind and Photovoltaic Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2291–2297, May 2016. 10.1109/TLA.2016.7530425.
- [9] J. M. Rondina, "Technology Alternative for Enabling Distributed Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 9, pp. 4089–4096, 2016. 10.1109/TLA.2016.7785938.
- [10] ONS, "Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica," 2016.
- [11] ONS NT 009/2016 - REV.02, "Instruções para a Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras," Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2018.
- [12] M. H. J. Bollen, S. Cundeva, S. K. Rönnerberg, M. Wahlberg, K. Yang, and L. Yao, "A wind park emitting characteristic and non-characteristic harmonics," in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC*, 2010, pp.

22–26.

- [13] D. Xu, N. Zhu, W. Chen, and F. Blaabjerg, *Advanced control of doubly fed induction generator for wind power systems*. Wiley-IEEE Press, 2018.
- [14] M. Grotzbach and J. Xu, "Noncharacteristic Line Current Harmonics in Diode Rectifier Bridges Produced by Network Asymmetries," in *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, 1993.
- [15] C. F. Nascimento *et al.*, "Analysis of Noncharacteristic Harmonics Generated by Voltage-Source Converters Operating Under Unbalanced Voltage," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 2, pp. 951–961, 2017. 10.1109/TPWRD.2016.2593684.
- [16] I. N. Santos and J. C. Oliveira, "A proposal of methodology for the assignment of responsibilities on harmonic distortions using the superposition principle," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 12, no. 8, pp. 1426–1431, Dec. 2014. 2014. 10.1109/TLA.2014.7014510.
- [17] IEC/TR 61000-3-6, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 38: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems," 2008.
- [18] N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca, W. W. Price, and R. W. Delmerico, "Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine-generators for stability simulations," in *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, 2003, pp. 1977–1983.
- [19] R. Gagnon, G. Turmel, C. Larose, J. G. Brochu, G. Sybille, and M. Fecteau, "Large-Scale Real-Time Simulation of Wind Power Plants into Hydro-Québec Power System," in *9th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems*, 2010.
- [20] F. Blaabjerg, M. Liserre, and K. Ma, "Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 2, pp. 708–719, 2012. 10.1109/TIA.2011.2181290.
- [21] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, and J. Rodriguez, "Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, 2011. 10.1109/TIE.2010.2103910.
- [22] Z. Liu, J. Rong, G. Zhao, and Y. Luo, "Harmonic Assessment for Wind Parks Based on Sensitivity Analysis," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1373–1382, Oct. 2017. 10.1109/TSTE.2017.2680461.



Raquel C. F. Gregory é engenheira eletricista (2014) pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e mestre (2016) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado da UFU com período de pesquisa na University of Warwick – Reino Unido (2018–2019). Suas principais áreas de interesse são em sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.



Celso R. de Azevedo, Jr. é licenciado em física (2010) e engenheiro eletricista (2016) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica da UFU. Suas principais áreas de interesse são em sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.



Ivan N. Santos (M'10) é engenheiro eletricista (2005), mestre (2007) e doutor (2011) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Realizou o pós-doutorado na Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands (2013–2014). Atualmente é professor e pesquisador da Faculdade Engenharia Elétrica da UFU. Suas áreas de interesse são: geração distribuída, redes elétricas inteligentes e qualidade da energia elétrica.