

A Influência do Dimensionamento de Filtros de Harmônicas no Fluxo de Potência Reativa - Uma Análise em Usinas Eólicas Baseada em Medições

João Paulo Jorge de Oliveira
Universidade de Brasília
joaoolive@gmail.com

Gabriel Barreto dos Santos
Universidade de Brasília
gaabriel.barreto@gmail.com

Resumo — Atualmente, para acesso ao sistema elétrico, usinas eólicas desenvolvem uma série de estudos elétricos. Dentre eles, os estudos de qualidade de energia e de fluxo de potência merecem investigação, com especial atenção à influência que os resultados de um podem ter sobre o outro. Neste sentido, o presente artigo avalia medições de correntes harmônicas em aerogeradores, comparando-as com os valores informados pelo fabricante, bem como o dimensionamento de filtros de harmônicas calculados a partir destas correntes. Posteriormente, é avaliado o impacto que tais filtros possuem sobre o fluxo de potência reativa, especialmente em situações de carga leve, e especula-se qual seria a redução de reativos caso os filtros fossem redimensionados a partir das correntes medidas. Ao final, são sugeridas novas investigações.

Palavras-chaves --- medição de correntes harmônicas, filtros de harmônicas, fluxo de potência reativa, energia eólica.

I. INTRODUÇÃO

Com o intenso desenvolvimento da tecnologia em um contexto mundial, a eletricidade se tornou um insumo fundamental para a sociedade moderna. Seu fornecimento contínuo e de qualidade impacta diretamente no desenvolvimento social e econômico das nações [1].

A diversificação da matriz energética, no sentido de geração de energia elétrica por diferentes fontes, traz benefícios para a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN), uma vez que a eventual escassez de uma fonte, como, por exemplo, a diminuição da geração hidrelétrica em épocas de poucas chuvas, tem suas consequências atenuadas pela possibilidade de geração de energia por fontes eólicas e fotovoltaicas, aumentando a probabilidade de manutenção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

Outro aspecto relevante desta diversificação é aumento da distribuição de investimentos pelo Brasil, com consequente melhoria da situação socioeconômica, visto que regiões menos favoráveis à exploração de uma fonte podem ser bastante favoráveis a outras. Como exemplo, cita-se a região nordeste, com menor potencial hidrelétrico, mas com o maior potencial eólico e fotovoltaico do país.

Ademais, a exploração de fontes alternativas e renováveis, como a eólica e a fotovoltaica, apresentam consideráveis vantagens ambientais, quando comparadas com outras, como as térmicas a carvão.

Especificamente quanto à geração eólica, é notável a expansão no Brasil. Em fevereiro/2017, a potência instalada atingiu 10.315,34 MW [2], contra cerca de 2600 MW em fevereiro/2014 [3]. Ou seja, verifica-se que a capacidade eólica

praticamente quadruplicou em um espaço de 3 anos.

Não obstante ao cenário promissor e às vantagens supramencionadas, a conexão de múltiplas centrais geradoras eólicas (CGEs) ao SIN traz seus desafios. A utilização da eletrônica de potência para adequar a frequência dos geradores à da rede, apesar do significativo avanço, ainda pode resultar em níveis de distorções harmônicas além dos limites estabelecidos pela regulamentação brasileira em [4].

Por sua vez, em relação à estabilidade do SIN, são necessários controles cada vez mais eficazes de tensão e de potência reativa. Como exemplo, cita-se [5], cuja revisão publicada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) em dezembro/2016 traz a necessidade da CGE propiciar compensação de potência reativa em qualquer situação de potência ativa, devendo todo o recurso reativo estar disponível para todas as situações de potência ativa maior ou igual a 20% da potência ativa nominal, além de, na situação de potência ativa nula, propiciar, no mínimo, geração/absorção nula no ponto de conexão. Tais obrigações, dentre outras, não estavam previstas nas revisões anteriores dos Procedimentos de Rede e explicitam a crescente necessidade de participação efetiva no controle da tensão, aumentando as margens de estabilidade de tensão.

Com o objetivo de procurar soluções que fortaleçam e preservem o sistema elétrico, é evidente o esforço de pesquisadores nas diversas áreas correlatas. Como exemplo, [6] apresenta propostas desde a modelagem das unidades de geração eólica, passando por estratégias de regulação de tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), por meio da compensação dinâmica de reativos, realizada pelos aerogeradores, até estratégias de controle complementar dos inversores dos aerogeradores, de forma a minimizar a geração de distorções harmônicas.

Nesse contexto, o presente artigo apresenta os resultados de um estudo de caso, elaborado com base em medições de parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) conduzidas em parques eólicos em operação, cujo diagrama simplificado pode ser visto na Fig. 1, visando revisar: os estudos de harmônicas desenvolvidos, antes da entrada em operação, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, para solicitação do Parecer de Acesso ao ONS; o dimensionamento feito para filtros de harmônicas, atualmente implantados; e o consequente aumento da injeção de potência reativa capacitiva pelos parques eólicos na rede, que podem amplificar problemas já existentes e demandar a implantação de controles e compensações.

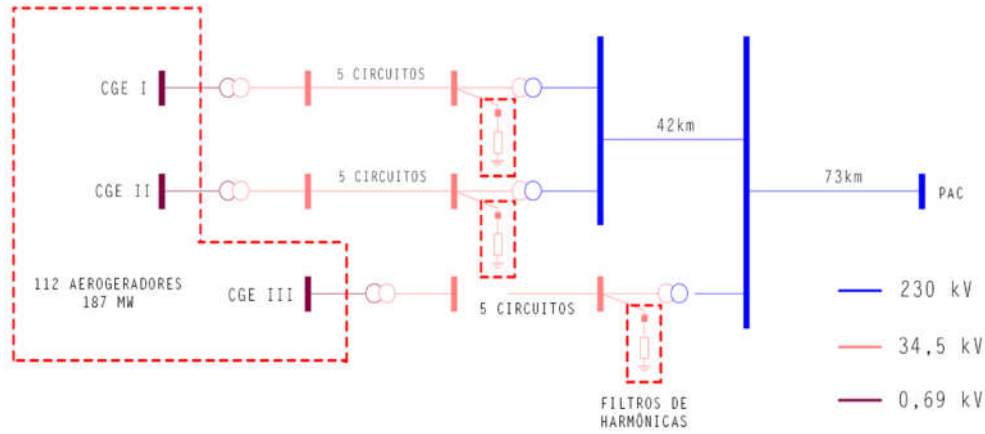


Fig. 1. Diagrama simplificado das instalações

II. ESTUDOS REALIZADOS NA PRÉ-IMPLANTAÇÃO

Conforme mostrado de forma simplificada na Fig. 1, o sistema em avaliação é composto por três parques eólicos (três CGEs), cada um com 5 circuitos a 34,5 kV e um transformador 34,5/230 kV. Há ainda duas linhas de transmissão, somando 115 km a 230 kV. As três CGEs totalizam 112 aerogeradores, todos de mesmo modelo, e 187 MW de potência instalada.

A. DISTORÇÃO HARMÔNICA

O fabricante dos aerogeradores forneceu, antes da implantação das CGEs e para a elaboração dos estudos de QEE, os níveis de correntes harmônicas constantes na Tabela I. Para as ordens não listadas na Tabela I, o valor fornecido pelo fabricante foi nulo.

TABELA I. CORRENTES HARMÔNICAS - DADOS DO FABRICANTE

Ordem	Corrente Harmônica [%]
2	0,38
3	1,17
4	0,48
5	2,24
7	0,64

A partir de tais correntes harmônicas, foi elaborado estudo de QEE, com o objetivo de mensurar os níveis de distorções harmônicas de tensão, no ponto de conexão ao SIN (PAC), decorrentes da conexão das CGEs. O estudo foi desenvolvido seguindo as diretrizes fornecidas pelo ONS em [7], cujos principais passos são relacionados a seguir:

- Estabelecimento da topologia da rede acessada, tanto na condição completa (N) quanto em situações de contingência (N-1).
- Determinação, para cada ordem harmônica de 2 a 50, das impedâncias harmônicas máximas no PAC ($Z_{b,h}$), considerando, para cada ordem h , as impedâncias correspondentes às ordens $h - 1$ e $h + 1$.
- Definição dos lugares geométricos (LG) das impedâncias ($Z_{b,h}$) e admitâncias ($Y_{b,h}$) harmônicas vistas do PAC, bem como os pontos dos seus respectivos envelopes.
- Modelagem e cálculo das impedâncias ($Z_{i,h}$) e admitâncias ($Y_{i,h}$), equivalentes das CGEs e seus sistemas associados, para cada ordem harmônica.

- Obtenção da admitância em paralelo mínima ($Y_{min,h}$), por meio da análise geométrica da menor distância entre o vetor $-Y_{i,h}$ ao LG de admitância harmônica da rede elétrica.
- Obtenção das correntes harmônicas combinadas dos aerogeradores ($I_{T,h}$), por meio das correntes harmônicas individuais ($I_{i,h}$), utilizando (1), conforme fornecida em [7].

$$I_{T,h} = \sqrt[a]{\sum_{i=1}^m I_{i,h}^a} \quad (1)$$

Onde h é a ordem harmônica, m é número total de fontes e a é o fator para combinação de fonte independentes de correntes harmônicas, conforme [7].

- Cálculo da distorção de tensão de harmônica individual máxima (DTHI), para cada ordem, por meio de (2).

$$DTHI_h = I_h / Y_{h,min}, h = 2 \text{ a } 50 \quad (2)$$

- Cálculo da distorção de tensão harmônica total (DTHT), por meio de (3), conforme trazido em [4].

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} DTHI_h^2} \quad (3)$$

Como resultado, o estudo apontou que as instalações não atendiam aos critérios estabelecidos pelo ONS, tanto quanto a algumas distorções de tensão harmônicas individuais (DTHI) quanto à distorção de tensão harmônica total (DTHT) e, a partir daí, propôs a instalação de três conjuntos de filtros, um em cada CGE, do tipo passa alta, sintonizados nas 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas. A configuração dos filtros pode ser vista na Fig. 2 e os seus parâmetros na Tabela II. Já o ponto de instalação dos filtros de harmônicas pode ser visto na Fig. 1.

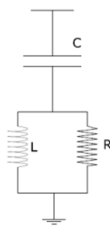


Fig. 2. Configuração dos filtros de harmônicas passa alta.

TABELA II. PARÂMETROS DOS FILTROS DE HARMÔNICAS

Ordem	Q [Mvar]	Capacitor [μF]	Reator [mH]	Resistor [ohm]
2	1,5	3,34	526	7935
3	1,5	3,34	234	7935
4	2,0	4,46	99	2976
5	2,0	4,46	63	4761
7	0,5	1,11	129	6802

B. FLUXO DE POTÊNCIA

Além dos estudos de QEE, para solicitação do Parecer de Acesso, foram desenvolvidos também estudos de fluxo de potência.

Os estudos foram desenvolvidos utilizando a ferramenta computacional Anarede e seguindo os critérios e premissas retirados de [5], [9] e [10], cujos principais passos são relacionados a seguir:

- Obtenção dos dados referentes a linhas de transmissão e transformadores das vizinhanças do ponto de interesse.
- Obtenção dos dados de geração e carga, para patamares de carga leve, média e pesada.
- Modelagem dos elementos de maneira mais compatível ao comportamento real possível.
- Realizar simulações para condições operativas normais e condições operativas de contingência (N-1).
- Avaliação dos níveis de potência reativa e das tensões nos piores casos.

Após as simulações, os estudos apontaram que ambas as linhas de transmissão a 230 kV contribuem com 20,1 Mvar de potência reativa capacitiva no PAC. Por sua vez, os 15 circuitos em 34,5 kV (5 em cada CGE) produzem cerca de 5,0 Mvar, também capacitivo.

Ocorre que a região em que se localiza o PAC, independente da conexão das três CGEs, apresenta dificuldades de controle de tensão, especialmente em carga leve.

Nesse cenário, a variação de potência ativa, inerente à geração eólica, torna-se um novo desafio à estabilidade do sistema. Os períodos com baixa incidência de ventos, e a consequente baixa injeção de potência ativa, aumentam a característica capacitiva das linhas de transmissão e dos circuitos, sendo problemática para o PAC, uma vez que, em uma região já com dificuldades no controle de tensão, a injeção de 25,1 Mvar capacitivo contribui para a elevação da tensão.

Somando-se a essa situação os três bancos de filtros de harmônicos previamente citados, que, na frequência fundamental, possuem características capacitivas ($3 \times 7,5 =$

22,5 Mvar), os estudos de fluxo de potência apontam uma injeção total de 46 Mvar capacitivos no PAC (na situação de tensão nas barras de 34,5 kV em 1 p.u.).

Apesar do escopo deste artigo estar circunscrito à avaliação da influência das instalações previamente mencionadas, que podem ser vistas na Fig. 1, é interessante notar que é comum uma determinada região acumular diversas CGEs. Dessa forma, apesar da influência de uma ou de poucas CGEs possuir pouco impacto sobre o SIN, mesmo que o PAC esteja localizado em um ponto com menor controle de tensão, as condições climatológicas tendem a ser as mesmas em toda a região. Ou seja, numa situação em que as CGEs em avaliação estejam presenciando baixas velocidades de vento e, consequentemente, baixa potência ativa, é comum que as demais CGEs da região também estejam em situação similar. Como consequência, o SIN não sofre a influência de uma (ou de poucas) CGEs isoladamente, mas sim do resultado das diversas instalações a ele conectadas.

III. MEDIÇÕES REALIZADAS NA PÓS-IMPLANTAÇÃO

Por solicitação do ONS, após a entrada em operação das CGEs, foram medidas as correntes harmônicas efetivamente geradas pelos aerogeradores. Para a realização das medições foi utilizado o medidor Power Visa, de fabricação Dranetz. As medições foram conduzidas na saída dos aerogeradores, em 690 V, antes dos transformadores 0,69 / 34,5 kV.

As medições foram feitas conforme [8], cujos principais requisitos são listados abaixo, e objetivaram atender às solicitações do ONS, constantes em [7].

- Medição de correntes harmônicas até a 50ª ordem.
- Agrupamento das correntes harmônicas a cada intervalo (bin) de 10% da potência ativa, sendo os valores múltiplos de 10% os valores centrais dos intervalos.
- Períodos de observação de 10 minutos para cada intervalo de potência ativa.
- Mínimo de 9 séries temporais de medições instantâneas para cada intervalo de potência ativa (3 testes e 3 fases).
- Distorção harmônica calculada como porcentagem da corrente nominal do aerogerador.
- Medições e agrupamentos realizados de acordo com [8] e [11].

A Fig. 3. traz o gráfico de barras, por intervalo de potência ativa e por ordem harmônica. São mostradas as 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, que são as de maior interesse. Conforme estabelecido em [8], como valor representativo para cada banda de frequência e para cada intervalo de 10% da potência ativa foi registrado o maior valor entre as médias de 10 minutos.

Por sua vez, a Tabela III traz os valores das correntes harmônicas para cada ordem, bem como os valores fornecidos pelo fabricante e a comparação entre eles. Para a determinação de cada valor representativo foi também adotado o maior valor entre as médias de 10 minutos das medições realizadas, mas independente da faixa de potência de cada medição. Todos os valores de correntes harmônicas são expressados em percentual da corrente nominal de um aerogerador (In).

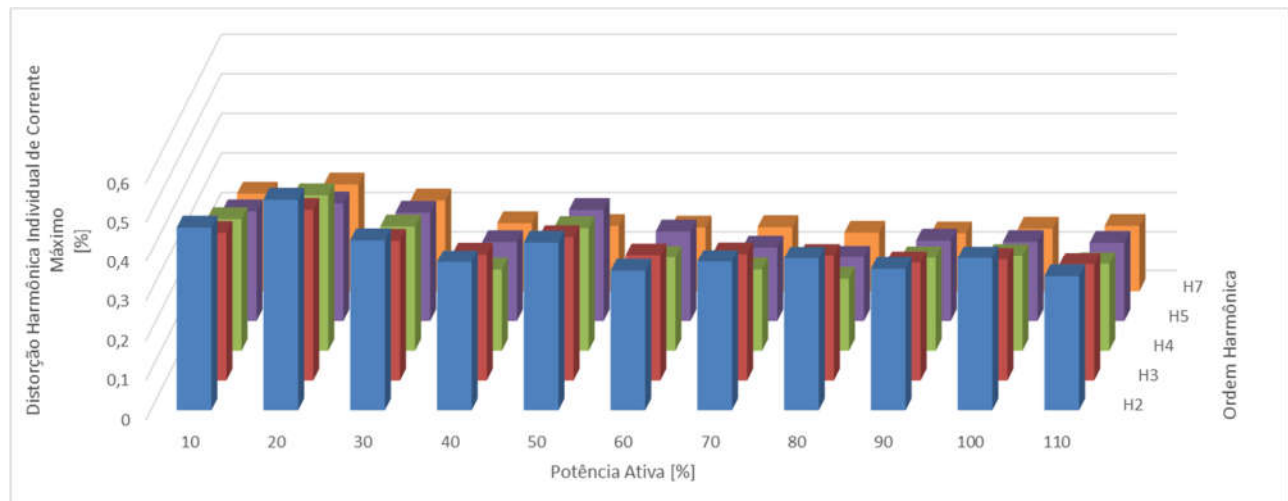


Fig. 3. Correntes harmônicas medidas, separadas para cada intervalo de 10% da potência ativa e por ordem harmônica. Valor máximo entre as médias de 10 minutos.

TABELA III. CORRENTES HARMÔNICAS, EM % DE IN, UTILIZANDO-SE O VALOR MÁXIMO ENTRE AS MÉDIAS DE 10 MINUTOS.

Ordem	Corrente informada pelo fabricante (I_f) [% de In]	Corrente medida (I_m) [% de In]	Diferença em pontos percentuais ($I_f - I_m$) [% de In]	Diferença percentual ($(I_f - I_m)/I_f$) [%]
2	0,38%	0,535%	0,155%	40,684%
3	1,17%	0,434%	-0,736%	-62,932%
4	0,48%	0,396%	-0,084%	-17,583%
5	2,24%	0,300%	-1,940%	-86,607%
7	0,64%	0,272%	-0,368%	-57,428%

IV. ANÁLISE DAS MEDIÇÕES OBTIDAS

Conforme pode ser visto na Tabela III, a corrente de 2ª ordem apresentou aumento de 0,155 pontos percentuais (40,684% do valor fornecido pelo fabricante). Apesar de tal variação ser significativa, todas as demais ordens apresentaram reduções expressivas em seus valores, sendo notórios os casos de:

- Menor variação, apresentada pela corrente harmônica de 4ª ordem, que passou de 0,48% de In para 0,396% de In, uma redução de 17,583% em relação ao valor fornecido pelo fabricante; e
- Maior variação, constatada para a corrente de 5ª ordem, que variou de 2,24% de In para 0,300% de In, ou seja, uma redução de 86,607% em relação ao valor fornecido pelo fabricante

Tais constatações tornam-se de grande relevância, uma vez que os valores fornecidos pelo fabricante foram aqueles utilizados no dimensionamento dos filtros de harmônicas, que, portanto, podem estar subdimensionados para a 2ª ordem e sobredimensionados para todas as demais ordens.

Esta possibilidade, caso confirmada, pode significar que foi realizado um investimento financeiro equivocado em todas as etapas de implantação dos filtros, com especial destaque à fabricação dos equipamentos eletromecânicos, transporte, mão de obra para montagem e comissionamento e obra civil.

Ademais, conforme já explorado no item II.B, os três filtros de harmônicas totalizam uma injeção de potência reativa capacitiva de 22,5 Mvar. Tal montante é superior ao

efeito capacitivo dos 115 km de linhas de transmissão a 230 kV, que contribuem com 20,1 Mvar, e prejudica o controle de tensão no PAC.

Assim sendo, uma mensuração precisa das correntes harmônicas dos aerogeradores não é interessante apenas do ponto de vista de qualidade de energia, mas também tem impacto considerável na injeção de potência reativa e na manutenção dos níveis de tensão, aspectos imprescindíveis para a estabilidade do sistema regional.

Supondo-se uma reavaliação do estudo de QEE, realizada com base nas correntes harmônicas medidas, apresentadas na Tabela III, mesmo que seja necessário um aumento do filtro de 2ª ordem, reduções nos filtros de todas as demais ordens (3ª, 4ª, 5ª e 7ª) provavelmente culminariam em uma redução da potência reativa capacitiva total.

Este fato é bastante relevante, tendo em vista que tal redução, que pode ser significativa para o controle de tensão no PAC, é motivada unicamente pela representação das correntes harmônicas produzidas pelos aerogeradores, sem nenhuma alteração em outros parâmetros.

De forma a confirmar tal suposição e obter o valor da redução de potência reativa capacitiva, faz-se ainda necessário recalcular as distorções harmônicas de tensão, tanto individuais quanto totais, redimensionar os filtros de harmônicas e, posteriormente, reconduzir os estudos de fluxo de potência.

V. ANÁLISE DO CRITÉRIO PARA OBTENÇÃO DO VALOR REPRESENTATIVO

Durante o processo de análise dos dados medidos, notou-se que os maiores valores de distorção harmônica de corrente ocorreram poucas vezes para cada ordem harmônica, quando comparados com o restante do período de medição. De forma a evidenciar tal situação, a Fig. 4 traz os valores medidos para cada intervalo de 10 minutos e cada ordem harmônica, em percentual da corrente nominal de um aerogerador (I_n), e ordenados de forma crescente.

Tal constatação suscita a indagação de se o critério trazido por [8], a saber, o de registrar o valor máximo das médias de 10 minutos, é de fato representativo para o comportamento dos aerogeradores.

A Fig. 4 traz ainda barras indicativas dos valores de percentil 90, 95 e 99, sendo exemplos de outros critérios que poderiam ser utilizados na determinação do valor representativo para a distorção harmônica individual de

corrente. A Tabela IV explicita os valores obtidos por meio de cada percentil, bem como a variação de sua magnitude em relação ao valor máximo.

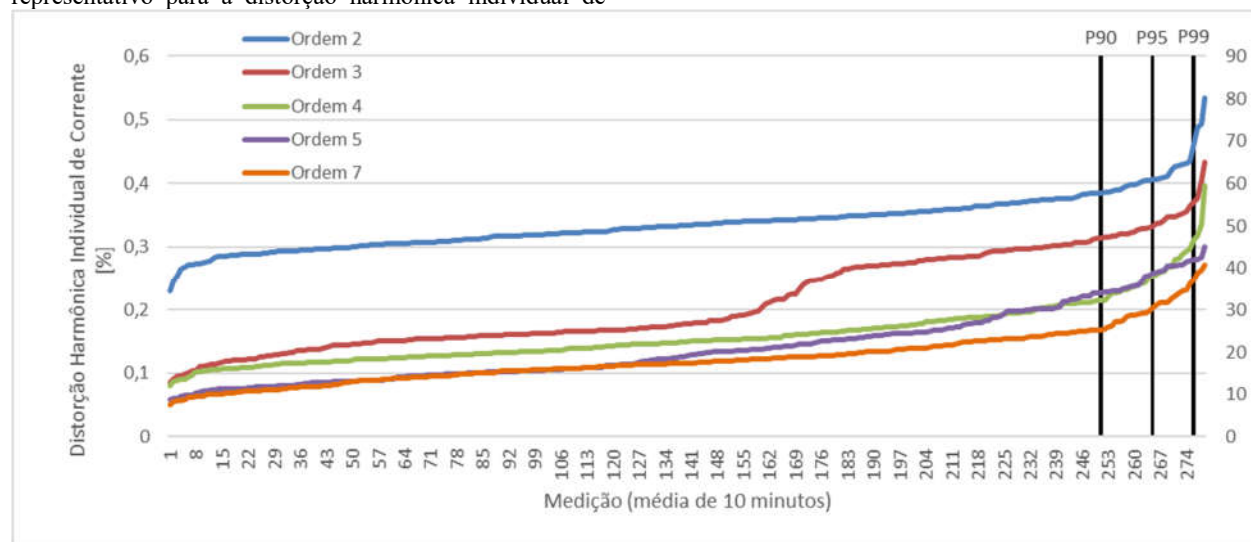


Fig. 4. Distorções harmônicas medidas, para cada intervalo de 10 minutos, ordenados de forma crescente.

TABELA IV. CORRENTES HARMÔNICAS MEDIDAS, EM % DE I_N , E SEUS PERCENTIS							
Ordem	Distorção Harmônica de Corrente				Variação		
	[% de I_N]				em relação ao máximo		
	Percentil 100 (máximo)	Percentil 99	Percentil 95	Percentil 90	Percentil 99	Percentil 95	Percentil 90
2	0,535%	0,469%	0,406%	0,385%	-12,227%	-24,106%	-27,905%
3	0,434%	0,372%	0,333%	0,315%	-14,265%	-23,304%	-27,437%
4	0,396%	0,313%	0,254%	0,215%	-20,774%	-35,799%	-45,581%
5	0,300%	0,280%	0,258%	0,227%	-6,739%	-13,889%	-24,221%
7	0,272%	0,251%	0,204%	0,168%	-7,747%	-24,993%	-38,330%

Para uma avaliação imediata, os valores obtidos com o percentil 95 foram eleitos para análise e comparados com os valores fornecidos pelo fabricante. Os resultados são mostrados na Tabela V.

TABELA V. CORRENTES HARMÔNICAS, EM % DE I_N , UTILIZANDO-SE O PERCENTIL 95 DAS MÉDIAS DE 10 MINUTOS.				
Ordem	Corrente informada pelo fabricante (I_f)	Corrente medida (I_m)	Diferença em pontos percentuais ($I_f - I_m$)	Diferença percentual $((I_f - I_m)/I_f)$
	[% de I_N]	[% de I_N]	[% de I_N]	[%]
2	0,38%	0,406%	0,026%	6,771%
3	1,17%	0,333%	-0,837%	-71,570%
4	0,48%	0,254%	-0,226%	-47,088%
5	2,24%	0,258%	-1,982%	-88,467%
7	0,64%	0,204%	-0,436%	-68,068%

Nota-se da Tabela V que, utilizando o percentil 95, há diferenças consideráveis em relação aos valores apresentados na Tabela III, com especial atenção a:

- A diferença em relação ao valor do fabricante, para a corrente de 2ª ordem, caiu de 40,684% para 6,771%.
- A diferença em relação ao valor do fabricante para a corrente de 4ª ordem aumentou, indo de -17,583% para -47,088%.
- As correntes para as demais ordens harmônicas sofreram menor variação, mas também apresentaram queda, o que era esperado ao utilizarmos o percentil 95.

Dessa forma, caso o valor representativo para as correntes harmônicas individuais não fosse o maior valor entre as médias de 10 minutos, mas um percentil destes, os efeitos considerados no item IV seriam ainda mais acentuados.

Similarmente ao raciocínio constante no item IV, caso a reavaliação do estudo de QEE, utilizando as correntes harmônicas apresentadas na Tabela V, mantivesse o dimensionamento do filtro de 2ª ordem e dispensasse a instalação dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens (que apresentaram, respectivamente, reduções de 71,570%, 88,467% e 68,068%), haveria uma redução de potência reativa capacitiva da ordem de $3 \times (1,5 + 2,0 + 0,5) = 12$ Mvar (conforme valores de potência reativa dos filtros para cada ordem harmônica, constantes na Tabela II), o que é um montante considerável.

Novamente, para a confirmação deste montante, faz-se necessário recalcular as distorções harmônicas de tensão, redimensionar os filtros de harmônicas e reconduzir os estudos de fluxo de potência.

VI. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou a comparação entre dois conjuntos de valores para as correntes harmônicas produzidas por aerogeradores. O primeiro conjunto foi fornecido pelo fabricante, tendo sido utilizado como premissa nos estudos de solicitação do Parecer de Acesso ao ONS, que indicaram a necessidade da instalação de

filtros de harmônicas de 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 7ª ordens. O segundo conjunto foi obtido durante campanha de medição, realizada após a entrada em operação das CGEs.

Conforme exposto na Tabela III e nas análises em IV, à exceção da corrente harmônica de 2ª ordem, os valores obtidos na campanha de medição foram consideravelmente menores que aqueles fornecidos pelo fabricante.

O motivo de tais diferenças ainda não está esclarecido, podendo ser alvo de investigação futura.

No entanto, caso os valores medidos sejam mais próximos aos valores realmente produzidos pelos aerogeradores do que aqueles considerados nos estudos de acesso, isso significa que foram instalados filtros de harmônicas subdimensionados para a 2ª ordem e sobredimensionados para todas as demais ordens e, como consequência, que foram alocados recursos financeiros e de tempo equivocados.

Posteriormente, questionou-se a utilização do maior valor entre as médias de 10 minutos como representativo para as correntes harmônicas geradas por aerogeradores, uma vez que há alguns valores muito superiores à grande maioria, o que pode distorcer a representatividade do dado.

Caso seja utilizado o percentil 95 como valor representativo, os valores medidos tornam-se bastante inferiores aos fornecidos pelo fabricante, o que sugere a investigação quanto à possibilidade de dispensa de parte dos filtros de harmônicas.

Por sua vez, do ponto de vista do fluxo de potência, os filtros de harmônicas instalados contribuem com 22,5 MVAR capacitivo ao sistema, valores superiores aos dos 115 km de linhas de transmissão.

Devido ao ponto de acoplamento em questão apresentar dificuldades referentes ao controle de tensão, com ocorrências frequentes de sobretensão, tal injeção de potência reativa torna-se relevante, sendo que uma redução no dimensionamento dos filtros de harmônicas diminuiria o montante de reativo capacitivo injetado e contribuiria para a manutenção da tensão no sistema local.

Por fim, ressalta-se que os aspectos mencionados revelam modificações que o sistema poderia ter experimentado, caso os níveis de correntes harmônicas empregados nos estudos de acesso fossem mais próximos à maioria dos valores medidos nos aerogeradores após a implantação.

VII. POSSIBILIDADES DE INVESTIGAÇÕES FUTURAS

Com o objetivo de intensificar o entendimento da interação entre equipamentos de QEE e de fluxo de potência reativa, bem como traçar recomendações para o desenvolvimento de estudos conjuntos, que otimizem soluções em ambos os sentidos, durante o processo de solicitação de acesso de novas CGEs, sugerem-se como investigações futuras:

- Aumentar o número de medições de correntes harmônicas, efetuando-as em diferentes aerogeradores e pontos da rede diversos, visando confirmar as medições anteriores e criar uma base de dados robusta.

- Investigação das causas que levaram à obtenção de níveis incompatíveis entre si, quando comparados os valores obtidos pelo fabricante e pela campanha interna pós-implantação. Com esse objetivo:
 - Explorar possíveis diferenças climatológicas, uma vez que muitas grandezas fornecidas por fabricantes são obtidas em medições realizadas durante certificações de tipo, processos comumente realizados nos Estados Unidos ou em países da Europa. Dessa forma, perfis de vento consideravelmente diferentes podem alterar a produção de correntes harmônicas, bem como diferenças bruscas na temperatura ambiente podem estar relacionadas a variações no funcionamento dos conversores.
- Investigar a influência que distorções preexistentes no PAC ou produzidas por outros aerogeradores podem ter sobre as medições realizadas no aerogerador em investigação. Investigar se o maior valor entre as médias de 10 minutos de fato é um valor representativo adequado para as correntes harmônicas individuais, incluindo o exame de outros critérios, como os percentis 90, 95 e 99.
- A partir dos valores de correntes harmônicas medidas, recalcular os níveis de Distorções de Tensão Harmônica, tanto individuais (DTHI) quanto total (DTHT) no PAC, verificando as respectivas variações.
- A partir do item anterior, redimensionar a solução de filtragem de harmônicas. Nesta etapa, há a expectativa de considerável redução dos filtros.
- Reavaliar os estudos de fluxo de potência, mensurando a provável redução da potência reativa capacitiva injetada no PAC.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] Gomez-Exposito, A., Conjeo, A. S. & Cañizares, C., 2011. Sistemas de Energia Elétrica – Análise e Operação. São Paulo: LTC
- [2] Operador Nacional do Sistema, “Boletim Mensal de Geração Eólica”, Fevereiro/2017
- [3] Operador Nacional do Sistema, “Boletim Mensal de Geração Eólica”, Fevereiro/2014
- [4] Operador Nacional do Sistema, Procedimentos de Rede, Submódulo 2.8, “Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica”, dezembro/2016.
- [5] Operador Nacional do Sistema, Procedimentos de Rede, Submódulo 3.6, Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão”, dezembro/2016.
- [6] Alex Reis, “Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização das Distorções Harmônicas”, Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Doutor em Ciências, 2015.
- [7] Operador Nacional do Sistema, Instrução RE 2.1 057/2008– Rev.4, “Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica”, 2015.
- [8] Comissão Eletrotécnica Internacional, Norma 61400-21, “Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines”, 2008.
- [9] Operador Nacional do Sistema, Procedimentos de Rede, Submódulo 2.3, “Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica”, dezembro/2016.
- [10] Operador Nacional do Sistema, Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3, “Diretrizes e critérios para estudos elétricos”, dezembro/2016.
- [11] Comissão Eletrotécnica Internacional, Norma 61000-4-7, “Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto”, 2002.