



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

### **VALIDAÇÃO EM UM COMPLEXO EÓLICO DA METODOLOGIA QUE UTILIZA FILTROS ATIVOS E MEDIDORES DE TENSÃO E CORRENTE PARA A DETERMINAÇÃO DAS RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO NO PAC**

**FRANKLIN CLEMENT VELIZ (1); SERGIO LUIS VARRICCHIO (1); CRISTIANO DE OLIVEIRA COSTA (1); MIGUEL PIRES DE CARLI (2); BRENO TORRES MEYER (2)**  
**CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL(1); CGT ELETROSUL (2)**

#### **RESUMO**

As metodologias utilizadas pelo ONS para determinar as distorções harmônicas no PAC podem produzir resultados inexatos que, frequentemente, penalizam os novos empreendimentos conectados ao SIN a instalarem dispendiosos filtros harmônicos. Objetivando determinar as responsabilidades sobre estas distorções, o CEPEL desenvolveu uma metodologia que usa filtros ativos. Sua alta exatidão já foi verificada em ensaios laboratoriais e simulações computacionais, cujos comportamentos diferem bastante ao de um sistema real, onde sua operação pode ser intermitente e os resultados de medição podem conter ruídos eletromagnéticos. Assim, a metodologia foi aplicada em campo nos terminais de dois aerogeradores. A alta exatidão apresentada valida seu uso em sistemas reais.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Distorções Harmônicas de Tensão, Ponto de Acoplamento Comum (PAC), Complexo Eólico, Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas, Filtros Ativos.

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

As distorções harmônicas no Sistema Interligado Nacional (SIN), provocadas por cargas não lineares que estão em contínua expansão (p. ex. sistemas HVDC, complexos eólicos e solares, usinas siderúrgicas, mineradoras, bem como as numerosas cargas residenciais, comerciais e industriais instaladas nos sistemas de baixa tensão), podem chegar a um ponto (violação de limites) em que seja necessário adotar medidas mitigadoras (p. ex. instalação de filtros). Desta maneira, é fundamental a identificação das responsabilidades sobre os valores das distorções harmônicas de tensão verificados no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre o SIN e um empreendimento que possua cargas não lineares, pois permitiria repartir, de forma justa, os custos relacionados com as medidas mitigadoras. Para superar este problema de identificação das responsabilidades de tensão, cuja solução é de grande interesse mundial, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desenvolveu uma metodologia de elevada exatidão e de simples aplicação utilizando filtros ativos e medidores de tensão e corrente. A alta exatidão da metodologia proposta já foi verificada em ensaios de laboratório [1] e em mais de uma centena de simulações computacionais [2] de casos selecionados para diversas situações, inclusive em cenários com significativa interação harmônica e/ou com elevados níveis de distorção.

Esta verificação da exatidão da metodologia proposta, apesar de importante, foi realizada em ambientes quase ideais (ensaios laboratoriais) e ideais (simulações computacionais), cujos comportamentos são muito diferentes dos sistemas reais. Por exemplo, em um complexo eólico, os aerogeradores são equipamentos não lineares altamente sofisticados, com geração de potência significativamente variante no tempo (operação intermitente), ao contrário dos equipamentos e cargas não lineares mais simples utilizados nos ensaios laboratoriais e modelados nas simulações computacionais. Além disto, os equipamentos de medição sofrem contínua interferência eletromagnética, que adiciona ruídos aos seus resultados que podem ser relevantes. Portanto, é imprescindível comprovar a exatidão da metodologia proposta quando aplicada em campo, validando de forma definitiva seu uso em sistemas reais.

Para este propósito, este informe técnico (IT) mostra os resultados dos testes de campo realizados num dos parques eólicos (30 MW – 15 aerogeradores de 2 MW cada) do Complexo Eólico (CE) Cerro Chato (163.2 MW), de propriedade da CGT Eletrosul, que se conecta ao SIN através da subestação Livramento 2 de 230 kV.

O parque eólico analisado (Cerro Chato III) possui filtros ativos que operam na saída (terminais de baixa tensão) de seus 15 aerogeradores, sendo que em dois deles foram realizados os testes.

Observa-se que, apesar destes testes de campo terem sido realizados na baixa tensão, suas conclusões permanecem válidas para a determinação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão no PAC

(alta tensão), pois, qualitativamente, os resultados dos testes de campo independem do nível de tensão. É importante destacar que os filtros ativos podem operar até a média tensão, já existindo no Brasil CEs com estes equipamentos operando neste nível de tensão com alto desempenho harmônico. Portanto, bastaria utilizar quadripolos de impedâncias (ou de admitâncias) para transferir os resultados da média para a alta tensão (PAC).

## 2.0 METODOLOGIA PROPOSTA

Para um melhor entendimento do IT, é apresentada uma breve descrição matemática da metodologia proposta, cujo desenvolvimento detalhado está mostrado em [1].

Na Figura 1 estão mostrados dois sistemas elétricos acoplados com diversas fontes de tensão e corrente de ordem harmônica  $h$  (harmônico de interesse). A tensão  $V_{PAC}$  e a corrente  $I_{PAC}$  no PAC também estão mostradas nesta figura. Note que o comportamento harmônico destes sistemas é influenciado pela interação harmônica que pode existir entre eles. As representações destes sistemas pelos seus equivalentes de Thévenin e de Norton estão mostradas na Figura 2 e Figura 3, respectivamente. Nestas figuras,  $V_{Th1}$  e  $Z_{Th1}$  denotam a tensão e a impedância de Thévenin do Sistema 1, enquanto sua corrente de Norton é representada por  $I_{N1}$ . Analogamente,  $V_{Th2}$ ,  $Z_{Th2}$  e  $I_{N2}$  denotam estas mesmas grandezas para o Sistema 2.

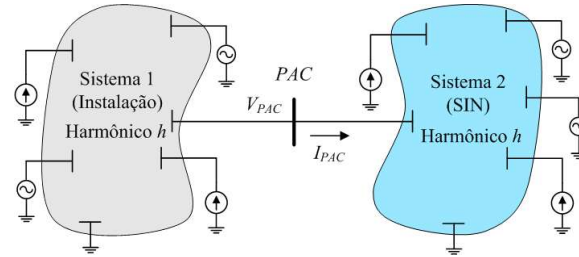


Figura 1: Sistemas acoplados

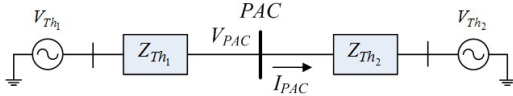


Figura 2: Equivalentes de Thévenin dos sistemas acoplados

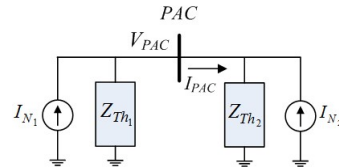


Figura 3: Equivalentes de Norton dos sistemas acoplados

Na Figura 4 está mostrado esquematicamente um filtro ativo conectado (em paralelo) ao PAC. Este filtro possui uma malha fechada que inclui um transformador de corrente ( $TC$ ), um somador ( $\Sigma$ ), um controle (*Controle*) e um equipamento de eletrônica de potência que atua como uma fonte de corrente ( $I_F$ ). Note que a atuação do filtro ativo isola eletricamente o Sistema 1, incluindo o filtro ativo (Sistema 1 + filtro ativo), do Sistema 2. Isto equivale à desconexão física destes sistemas para o harmônico de interesse  $h$ , conforme mostrado na Figura 5.

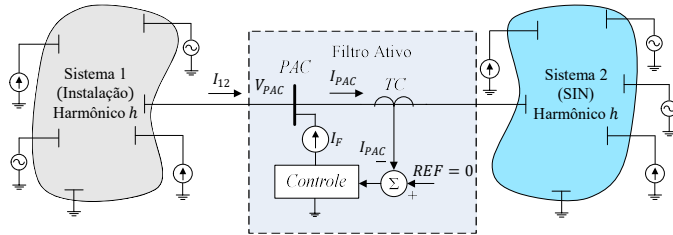


Figura 4: Filtro ativo conectado entre os sistemas 1 e 2 (PAC)

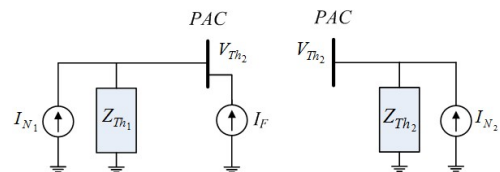


Figura 5: Sistemas 1 e 2 isolados pelo filtro ativo

As três condições necessárias para que a aplicação da metodologia proposta seja válida, descritas em [1], podem ser compactadas e substituídas por uma única hipótese: "No isolamento dos sistemas, seus equivalentes de Thévenin ou Norton permanecem invariáveis". Em outras palavras, supõe-se que a atuação do filtro não altera os equivalentes dos sistemas.

Note que o atendimento desta hipótese permite relacionar as equações dos circuitos das duas situações operativas indicadas (sistemas isolados - Figura 5 e sistemas acoplados – da Figura 1 a Figura 3).

A seguir são mostradas as equações da metodologia [1], onde as grandezas com o sobrescrito ( $p$ ) são calculadas em função de grandezas medidas (sem sobrescritos). No caso de  $Z_{Th1}$ , seu valor também pode ser calculado.

$$V_{PAC_1}^{(p)} = V_{PAC} + \frac{I_{PAC}}{I_F} V_{Th2} \quad (1)$$

$$V_{PAC_2}^{(p)} = -\frac{I_{PAC}}{I_F} V_{Th2} \quad (2)$$

$$I_{PAC_1}^{(p)} = \left(1 - \frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1} I_F}\right) I_{PAC} \quad (3)$$

$$I_{PAC_2}^{(p)} = -\frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1} I_F} I_{PAC} \quad (4)$$

$$V_{PAC}^{(p)} = V_{Th_2} - Z_{Th_1} (I_F + I_{PAC}) \quad (5)$$

$$I_{PAC}^{(p)} = \frac{(V_{Th_2} - V_{PAC})}{Z_{Th_1}} - I_F \quad (6)$$

$$Z_{Th_1}^{(p)} = \frac{V_{Th_2} - V_{PAC}}{I_F + I_{PAC}} \quad (7)$$

$$I_{N_1}^{(p)} = -I_F + \frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1}} \quad (8)$$

Conforme descrito em [1], os valores obtidos de (5) e (6) deverão ser comparados, respectivamente, com os valores de  $V_{PAC}$  e  $I_{PAC}$  medidos imediatamente após a remoção do filtro ativo. Desta forma, os índices de validação  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$  são dados por:

$$\Delta V_{PAC} = \left| \frac{V_{PAC} - V_{PAC}^{(p)}}{V_{PAC}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

$$\Delta I_{PAC} = \left| \frac{I_{PAC} - I_{PAC}^{(p)}}{I_{PAC}} \right| \times 100\% \quad (10)$$

Deve-se observar que a utilização de (3), (4), (5), (6), (8), (9) e (10) exige que a impedância  $Z_{Th_1}$  seja predominantemente passiva, ou seja, que os sistemas envolvidos estejam sujeitos a uma baixa interação harmônica. Neste caso, é possível a medição ou o cálculo de  $Z_{Th_1}$  com exatidão apropriada. Como será mostrado no item (7), algumas vezes é possível substituir  $Z_{Th_1}$  por  $Z_{Th_1}^{(p)}$ . Nestas situações, não importa o nível de interação harmônica produzido pelos sistemas. Note que a substituição de  $Z_{Th_1}$  por  $Z_{Th_1}^{(p)}$  em (5) não é possível, pois, neste caso, se teria  $V_{PAC}^{(p)} = V_{PAC}$  e, conseqüentemente,  $\Delta V_{PAC} = 0$ , mesmo que o valor de  $Z_{Th_1}^{(p)}$  estivesse significativamente errado.

Uma vez que as grandezas avaliadas pela metodologia proposta são fasores, se adotou para seus erros um cálculo que considera seus módulos e ângulos. Desta forma, os erros adotados neste IT, para todos os fasores avaliados, é dado pelo módulo da diferença entre os fasores dividida pelo fasor considerado como referência (valor medido), conforme exemplificado em (9) e (10).

### 3.0 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM UM COMPLEXO EÓLICO

Em 29 de novembro de 2017, foram realizadas várias medições de tensão e corrente nos terminais (baixa tensão) de dois aerogeradores (# 6 e # 7) do CE Cerro Chato da CGT Eletrosul (163.2 MW) que possuem filtros ativos. Este CE, que se conecta ao SIN na subestação Livramento 2 de 230 kV, possui 81 aerogeradores dos quais 39 têm filtros ativos. É importante indicar que os aerogeradores # 6 e # 7 foram selecionados de um dos parques do CE (parque Cerro Chato III, composto por 15 aerogeradores de 2 MW cada), onde todos seus aerogeradores têm filtros ativos. Portanto, os harmônicos nos terminais destes aerogeradores são oriundos apenas deles e do SIN, pois os filtros ativos dos outros aerogeradores do parque eliminam (praticamente) suas contribuições harmônicas. Note que os harmônicos produzidos pelos outros parques do CE tampouco influenciam, uma vez que são bloqueados pela alta impedância do transformador coletor (34,5 kV - 230 kV) do parque Cerro Chato III. Conseqüentemente, neste caso particular, as responsabilidades em cada terminal devem ser atribuídas ao seu aerogerador e ao SIN.

De modo a ser compatível com a notação das equações da metodologia proposta (item 2.0), o terminal de baixa tensão do transformador de cada aerogerador analisado será denotado como PAC no proceder do documento, conforme mostrado na Figura 6, onde o aerogerador é denominado de 'Sistema 1' e o resto do CE conectado ao SIN, visto deste terminal, é denominado de 'Sistema 2'. Os dados destes sistemas estão mostrados na TABELA 1.

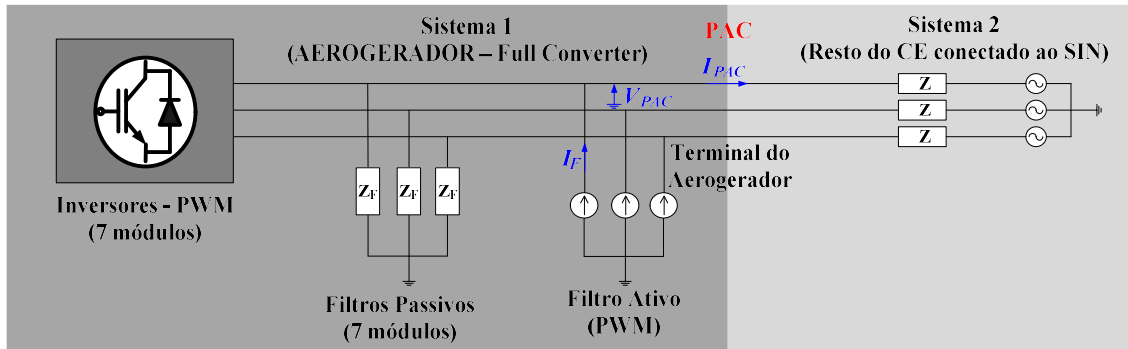


Figura 6: Circuito do Aerogerador #6 (ou #7) conectado ao resto do CE acoplado ao SIN

Para executar a metodologia proposta, além das medições das tensões e correntes nas três fases do PAC de cada aerogerador (# 6 ou # 7), também foram necessárias as medições das correntes nas três fases do respectivo filtro ativo. Estas tensões e correntes medidas correspondem às variáveis  $V_{PAC}$ ,  $I_{PAC}$  e  $I_F$  mostradas na Figura 6. Observa-se que a tensão  $V_{PAC}$  quando o filtro ativo opera é igual a  $V_{Th_2}$  (mesmo ponto elétrico).

TABELA 1: DADOS DOS COMPONENTES DOS CIRCUITOS TESTADOS

Circuito	Equipamento		Descrição
Sistema 1	Aerogerador (# 6 ou # 7) ENERCON E-82 E2 (Full Converter)	Inversores (7 módulos)	Tensão nominal - 400 V Corrente nominal - 2887 A Potência nominal - 2 MW
		Filtros passivos (7 módulos)	Circuitos $R$ , $L$ e $C$ (dados confidenciais)
	Filtro Ativo ABB PQF		Tensão nominal - 480 V Corrente nominal - 100 A
Sistema 2	Resto do Sistema		CE Cerro Chato (visto do terminal de baixa tensão do transformador do aerogerador # 6 ou # 7) conectado ao SIN

As medições destas grandezas de interesse demandaram a utilização de dois qualímetros da Fluke modelo 435 S2 para cada aerogerador. Estes equipamentos digitais, cuja resolução para harmônicos é de 0.1 V para tensões e 0.1 A para correntes, registraram as medições a cada 0.25 s. Uma característica fundamental deste equipamento é a obtenção das componentes harmônicas de módulo e ângulo das tensões e correntes medidas.

#### 4.0 CONSIDERAÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS ENVOLVIDOS

Para os testes de campo nos terminais dos aerogeradores selecionados, se supôs uma baixa interação harmônica. Consequentemente,  $Z_{Th_1}$  seria predominantemente passiva, o que permitiria utilizar os parâmetros  $RLC$  dos filtros, informados pelo fabricante, na obtenção da impedância do Sistema 1 ( $Z_{Th_1}$ ). Em princípio, esta suposição de baixa interação harmônica nestes terminais é válida, pois, além das pequenas distorções de tensão verificadas no SIN e em suas proximidades (frequentemente o  $DHT$  no SIN está abaixo do limite Global Inferior de 3 %), as correntes harmônicas dos aerogeradores, também informadas pelo fabricante (correntes certificadas), são muito baixas ( $DHC < 2\%$  em relação ao valor da corrente nominal do aerogerador). Se os índices  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$  forem pequenos, a alta exatidão da metodologia proposta será confirmada e, consequentemente, também serão confirmadas a hipótese (condição necessária) para que sua aplicação seja válida e a passividade de  $Z_{Th_1}$ .

#### 5.0 HARMÔNICOS APTOS PARA A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A elevada exatidão da metodologia pode ser verificada em situações em que os resultados das medições de tensões e correntes harmônicas sejam confiáveis, ou seja, nos casos em que os valores destas medições sejam muito maiores que os ruídos e que as resoluções dos equipamentos de medição (quanto mais próximos dos valores de resolução maiores serão os erros). Nestes testes, os valores das medições de 5º harmônico (5h) foram os únicos onde os ruídos e as resoluções influenciaram muito pouco (valores medidos um pouco acima de 1% das respectivas tensão e corrente de operação – 60 Hz), ou seja, foi o único harmônico que pôde ser verificada a exatidão da metodologia proposta com precisão (quando os fasores de tensão e corrente harmônicas, obtidos em sucessivas medições, estão muito próximos). Já para os outros harmônicos de relevância no SIN (p. ex. 3º e 7º harmônicos), tanto a precisão quanto a exatidão da metodologia foram comprometidas, pois os valores medidos estavam na mesma ordem de grandeza dos ruídos e resoluções dos equipamentos (valores medidos significativamente abaixo de 1% das respectivas tensão e corrente de operação – 60 Hz).

#### 6.0 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA O 5º HARMÔNICO

Como o objetivo deste IT é demonstrar a elevada exatidão da metodologia em campo, nas situações de real interesse (casos em que os harmônicos apresentam amplitudes significativas), serão mostrados unicamente os resultados do 5h.

Os resultados dos testes nos aerogeradores # 6 e # 7, para todos os harmônicos avaliados (do 2º ao 7º), foram qualitativamente parecidos. Portanto, não faz muita diferença escolher o Aerogerador # 6 ou # 7 para analisar qualquer harmônico. Desta maneira, se escolheu aleatoriamente o Aerogerador # 6 para avaliar o 5h.

Nos ensaios do Aerogerador # 6, foram realizados sete chaveamentos do filtro ativo no período de tempo de 2314 s (ou 39 minutos, aproximadamente), conforme mostrado na Figura 7, Figura 8 e Figura 9.

Na Figura 9, os instantes em que o filtro ativo atuou podem ser mais facilmente identificados a partir da Figura 7, onde eles são mostrados mais claramente.

Se observa na Figura 7 que, nos instantes prévios à atuação do filtro, existem pequenas correntes que oscilam em torno de 2 A (correntes de energização do filtro). Estas correntes, injetadas pelo filtro, modificam o comportamento dos sistemas (ou dos equivalentes de Thévenin ou de Norton), conforme pode ser verificado nas correntes no PAC nos respectivos instantes de energização (Figura 8). Portanto, devido a esta modificação, seria incorreto aplicar a metodologia imediatamente antes e no início atuação do filtro. Então, deve-se aplicá-la somente no final e imediatamente após a atuação do filtro, pois, nestes instantes, os equivalentes permanecem invariáveis.

Com o objetivo de exibir a máxima eficácia da metodologia proposta, foram analisados os instantes próximos às remoções do filtro ativo na fase C (Figura 10), pois as correntes e tensões são maiores nesta fase (Figura 7, Figura

8 e Figura 9). Portanto, os ruídos e as respectivas resoluções dos medidores são menos influentes nesta fase. Dentre os possíveis casos para a aplicação da metodologia, se escolheu aleatoriamente (todos os casos são parecidos) o intervalo de tempo em torno de 1024.5 s, onde ocorreu o chaveamento do filtro (Figura 11 e Figura 12).

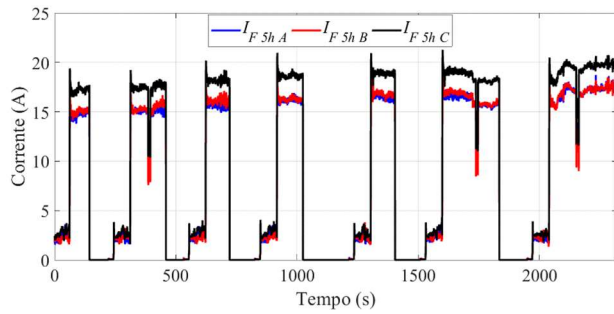


Figura 7: Correntes de 5h no filtro ativo ( $I_F$ ) do Aerogerador # 6

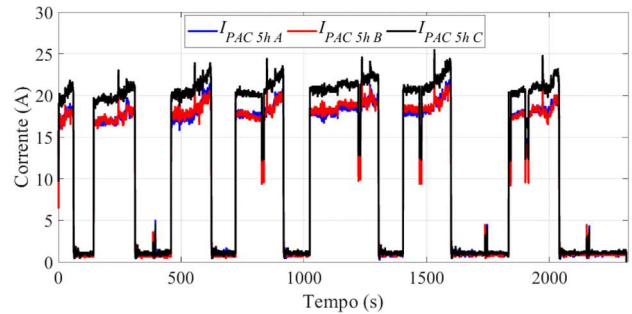


Figura 8: Correntes de 5h no PAC ( $I_{PAC}$ ) do Aerogerador # 6

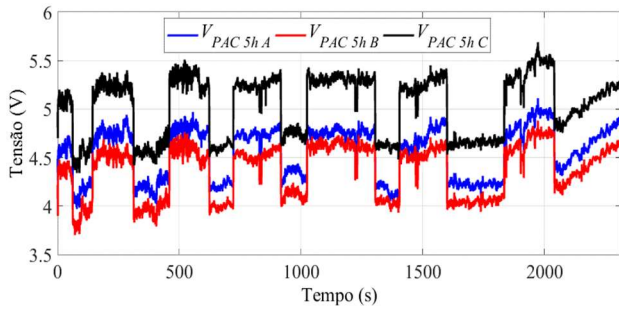


Figura 9: Tensões de 5h no PAC ( $V_{PAC}$ ) do Aerogerador # 6

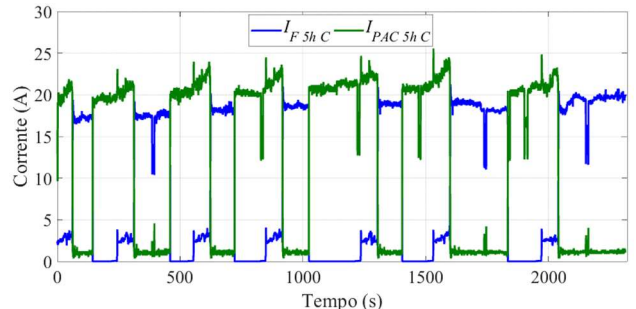


Figura 10: Correntes  $I_F$  e  $I_{PAC}$  de 5h da fase C do Aerogerador # 6

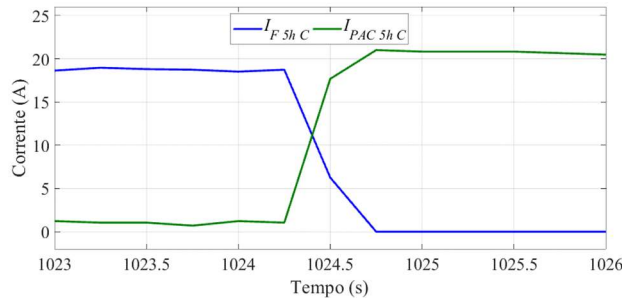


Figura 11: Correntes  $I_F$  e  $I_{PAC}$  de 5h do Aerogerador # 6 nos instantes escolhidos para aplicação da metodologia (em torno de 1024.5 s)

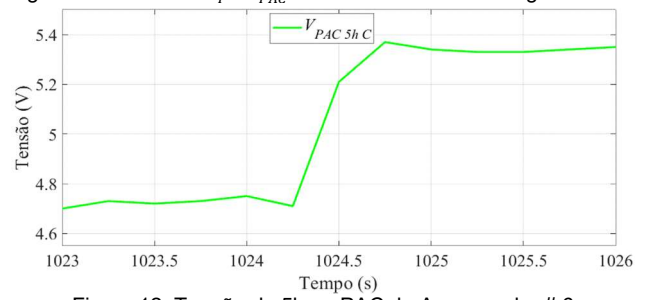


Figura 12: Tensão de 5h no PAC do Aerogerador # 6 imediatamente antes ( $V_{PAC} = V_{Th_2}$ ) e imediatamente após a remoção do filtro em torno de 1024.5 s

Na Figura 11 se observa uma alta relação entre as correntes  $I_F$  e  $I_{PAC}$  quando o filtro ativo atuou (mais de 15 vezes), significando que os sistemas 1 e 2 estavam próximos do pretendido “isolamento harmônico”.

## 7.0 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Desta maneira, foi avaliado o intervalo entorno da remoção do filtro em 1024.5 s (1 s antes e 1 s depois), que totaliza 2.5 s, pois o transitório da remoção durou 0.5 s, conforme mostrado na Figura 11 e Figura 12.

Como o qualímetro registrou as medições a cada 0.25 s, foram 5 medições para cada grandeza necessária. Ou seja, no intervalo de 1 s antes da remoção do filtro, foram 5 medições tanto para a tensão  $V_{Th_2}$  ( $= V_{PAC}$ ) quanto para a corrente  $I_F$ , e, no intervalo de 1 s depois da remoção, foram 5 medições para a tensão  $V_{PAC}$  e 5 medições para a corrente  $I_{PAC}$ . Os valores medidos de módulo e ângulo destes fasores são apresentados na TABELA 2. Nesta tabela, também é mostrada a relação entre  $I_F$  e  $I_{PAC}$ . Os diagramas polares destes fasores estão mostrados na Figura 13 e Figura 14.

As condições operativas na frequência fundamental (60 Hz) para a potência, tensão e corrente, nestes instantes analisados, são mostradas na TABELA 3. Nesta tabela, também são mostradas as distorções harmônicas individuais de 5h de tensão e corrente no PAC. Note que, similarmente às correntes certificadas, o percentual da corrente de 5h no PAC ( $DHC_i$ ) refere-se ao valor da corrente nominal (2887 A) do aerogerador. Observa-se que, como esperado, o  $DHC_i$  de 5h no PAC é praticamente nulo quando o filtro ativo está operando (Filtro ON) e, por esta razão, não é apresentado.

A partir da TABELA 2, da Figura 13 e Figura 14, se verifica que os fasores de  $V_{PAC}$ ,  $V_{Th_2}$ ,  $I_{PAC}$  e  $I_F$  praticamente não variaram nos respectivos instantes em que foram registrados. Consequentemente, os equivalentes (de Thévenin ou

Norton) dos instantes imediatamente antes da remoção do filtro (Figura 5) variaram muito pouco, bem como os equivalentes dos instantes imediatamente após a remoção (Figura 3). Portanto, resta saber se os equivalentes destas duas situações operativas são os mesmos, atendendo a hipótese adotada pela metodologia. Para este propósito, basta verificar se os índices de validação propostos ( $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ ) são pequenos.

Para determinar estes índices foi necessário utilizar a impedância do Sistema 1, que corresponde à impedância dos filtros passivos dos inversores do Aerogerador # 6. Note que na TABELA 3 é mostrada apenas a potência da fase C, ou seja, o Aerogerador # 6 estava gerando mais de 350 kVA nos instantes avaliados. Nesta condição, todos os filtros internos estão operando e, portanto, foi utilizada a impedância resultante de 5h para esta configuração, cujo valor é de  $Z_{Th_1} = (0.0089 - j 0.3338) \Omega$  ou  $Z_{Th_1} = (0.3339 \angle -88.47^\circ) \Omega$ , obtido a partir dos dados de placa dos parâmetros RLC dos filtros dos inversores (mantidos confidenciais a pedido do fabricante do aerogerador).

TABELA 2: MEDIÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE DE 5h NO AEROGERADOR # 6

Tempo (s)	Antes da remoção do filtro (Filtro ON)					Tempo (s)	Depois da remoção do filtro (Filtro OFF)			
	$V_{Th_2} (= V_{PAC})$		$I_F$		$I_F/I_{PAC}$		$V_{PAC}$		$I_{PAC}$	
	Mód. (V)	Âng. (°)	Mód. (A)	Âng. (°)			Mód. (V)	Âng. (°)	Mód. (A)	Âng.(°)
1024.25	4.71	139.30	18.73	-119.48	17.84	1024.75	5.37	139.00	21.00	57.44
1024.0	4.75	139.26	18.51	-120.20	15.11	1025.0	5.34	139.14	20.25	57.74
1023.75	4.73	139.20	18.73	-120.50	26.76	1025.25	5.33	139.14	20.83	57.48
1023.5	4.72	139.30	18.80	-120.32	17.90	1025.50	5.33	139.28	20.83	57.24
1023.25	4.73	139.66	18.96	-119.44	18.06	1025.75	5.34	138.94	20.65	57.12
Valor médio	4.73	139.34	18.75	-119.99	-	Valor médio	5.34	139.10	20.71	57.40

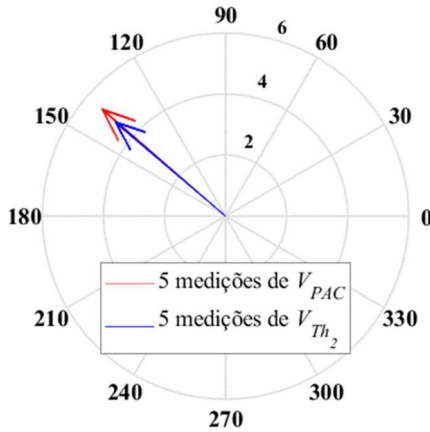


Figura 13: Fasores medidos de  $V_{PAC}$  e de  $V_{Th_2} (= V_{PAC})$

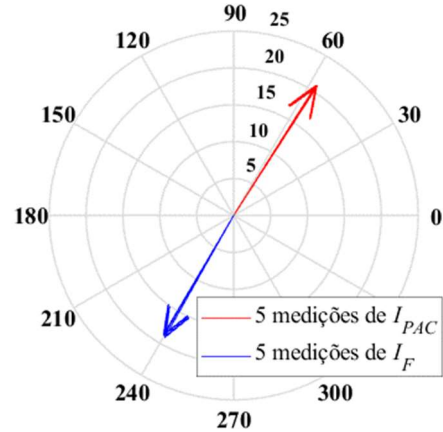


Figura 14: Fasores medidos de  $I_{PAC}$  e de  $I_F$

TABELA 3: MEDIÇÕES DE POTÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE 60 Hz NO PAC DO AEROGERADOR # 6

Antes da remoção do filtro (Filtro ON)						Depois da remoção do filtro (Filtro OFF)						
Tempo (s)	P (kW)	Q (Mvar)	$V_{PAC}$ (V)	$DHT_i(5h)$	$I_{PAC}$ (A)	Tempo (s)	P (kW)	Q (Mvar)	$V_{PAC}$ (V)	$DHT_i(5h)$	$I_{PAC}$ (A)	$DHC_i(5h)$
1024.25	191.2	17.9	233.1	2.02	823.90	1024.75	191.2	16.5	233.1	2.30	823.20	0.73
1024.00	189.3	17.8	233.1	2.04	815.50	1025.00	191.1	16.5	233.1	2.29	822.85	0.70
1023.75	187.8	17.7	233.1	2.03	809.20	1025.25	189.9	16.4	233.1	2.29	817.60	0.72
1023.50	188.7	17.9	233.1	2.02	813.05	1025.50	189.1	16.3	233.1	2.29	814.10	0.72
1023.25	188.5	17.7	233.1	2.03	812.35	1025.75	187.4	16.3	233.2	2.29	806.40	0.72

Desta maneira, os valores médios da TABELA 2 e o valor da impedância  $Z_{Th_1}$  foram substituídos em (5) e (6) para a determinação de  $V_{PAC}^{(p)}$  e  $I_{PAC}^{(p)}$  e, em sequência, foram calculados os índices  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ , dados em (9) e (10), respectivamente. Os resultados obtidos comprovam o sucesso da aplicação da metodologia proposta, conforme mostrado na TABELA 4.

TABELA 4: VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

$V_{PAC_1}^{(p)}$ (V)	$V_{PAC}$ (V)	$\Delta V_{PAC}$ (%)	$I_{PAC_1}^{(p)}$ (A)	$I_{PAC}$ (A)	$\Delta I_{PAC}$ (%)
$5.43 \angle 137.54^\circ$	$5.34 \angle 139.10^\circ$	3.2	$20.53 \angle 58.75^\circ$	$20.71 \angle 57.40^\circ$	2.5

Os baixos valores destes dois índices ( $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ ), mostrados nesta tabela, significam que a hipótese necessária para validar a aplicação da metodologia é verdadeira (isolamento dos sistemas mantendo invariáveis seus



equivalentes) e que a exatidão dos valores de  $Z_{Th1}$  (fornecida pelo fabricante) e das medições de  $V_{PAC}$ ,  $V_{Th2}$ ,  $I_{PAC}$  e  $I_F$ , que compõem (5) e (6), é elevada (obviamente, a suposição da baixa interação harmônica também foi atendida).

Os diagramas com os fasores de  $V_{PAC}^{(p)}$  e  $I_{PAC}^{(p)}$ , superpostos aos respectivos fasores médios das medições de  $V_{PAC}$  e  $I_{PAC}$ , mostrados na Figura 15 e Figura 16, ratificam visualmente a eficácia da aplicação da metodologia. Observa-se que, como a magnitude de  $Z_{Th1}$  é muito pequena, o que dificulta sua visualização, optou-se por mostrar o seu inverso (admitância de Norton do Sistema 1,  $Y_{N1}$ ) na Figura 16.

A veracidade da hipótese adotada comprovou que o desenvolvimento matemático da metodologia está correto.

Na prática, as equações das correntes, dadas em (3), (4) e (8), dependerão de  $Z_{Th1}^{(p)}$  (devido às dificuldades em se obter  $Z_{Th1}$  por medição ou cálculo). Consequentemente, estas correntes poderão ter um erro relevante por causa da amplificação dos erros das componentes fasoriais no cálculo de  $Z_{Th1}^{(p)}$ , dada em (7). Para explicar este enunciado, considere que a medição de  $V_{Th2}$  é muito próxima da medição de  $V_{PAC}$ . Neste caso, a exatidão no cálculo de  $Z_{Th1}^{(p)}$  poderá ser afetada, pois os pequenos erros nos fasores  $V_{Th2}$  e  $V_{PAC}$  são amplificados na composição do diminuto fasor resultante do numerador ( $V_{Th2} - V_{PAC}$ ). Para o denominador, se a medição de  $I_F$  for muito próxima da medição de  $I_{PAC}$  defasada de  $180^\circ$  ( $I_F \approx -I_{PAC}$ ), novamente a exatidão no cálculo de  $Z_{Th1}^{(p)}$  poderá ser afetada, pois os pequenos erros nos fasores  $I_F$  e  $I_{PAC}$  são amplificados na composição do diminuto fasor resultante ( $I_F + I_{PAC}$ ). Ou seja, para estes casos, o valor de  $Z_{Th1}^{(p)}$  não é confiável.

Este tipo de erro foi verificado nos ensaios de laboratório [1] e nestes testes de campo (conforme será visto). Por este motivo, se utilizou  $Z_{Th1}$  fornecida pelo fabricante (de elevada exatidão, conforme os resultados de  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ ) para o cálculo das correntes dadas em (3), (4) e (8). Por outro lado, a exatidão das tensões propostas, dadas em (1) e (2), é alta, pois independem das impedâncias dos sistemas envolvidos.

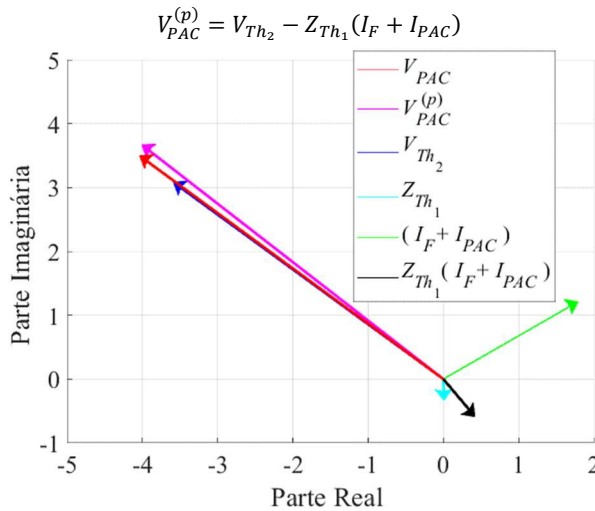


Figura 15: Fasores de  $V_{PAC}$  e  $V_{PAC}^{(p)}$  com suas componentes

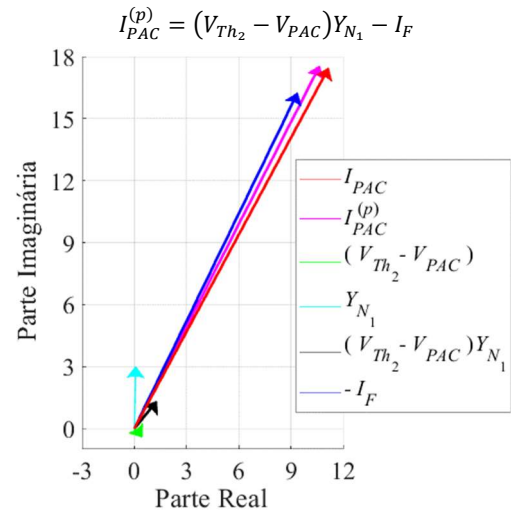


Figura 16: Fasores de  $I_{PAC}$  e  $I_{PAC}^{(p)}$  com suas componentes

Uma outra análise, que também comprovou que a aplicação da metodologia proposta em campo foi exitosa, foi a comparação entre as correntes de Norton do Sistema 1, determinadas nos instantes imediatamente antes (filtro ON) e imediatamente após (filtro OFF) a remoção do filtro. Para a situação filtro ON, se utilizou  $I_{N1}^{(p)}$  dada em (8) (repetida em (11)) e, para a situação filtro OFF, se utilizou a equação consagrada na literatura dada em [3] (também teoricamente correta), mostrada em (12). Estas correntes e suas componentes estão mostradas na Figura 17.

$$I_{N1\_filtro\_ON} = -I_F + \frac{V_{Th2}}{Z_{Th1}} \quad (11)$$

$$I_{N1\_filtro\_OFF} = I_{PAC} + \frac{V_{PAC}}{Z_{Th1}} \quad (12)$$

Substituindo  $Z_{Th1}$  (dada pelo fabricante) e os valores médios das medições (TABELA 2) em (11) e (12), obtém-se:

$$I_{N1\_filtro\_ON} = (5.74 \angle 91.40^\circ) \text{ A} \quad (13)$$

$$I_{N1\_filtro\_OFF} = (5.65 \angle 86.26^\circ) \text{ A} \quad (14)$$

sendo o erro ( $\Delta I_{N1}$ ) entre estes valores igual a 9.2 %, considerando o fasor  $I_{N1\_filtro\_OFF}$  como referência.

Note que o erro  $\Delta I_{N1}$  é superior aos índices (erros)  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ . Isto se justifica porque as componentes fasoriais que produziram estas correntes de Norton são muito maiores que elas (Figura 17). Ou seja, os pequenos erros destas componentes de elevadas magnitudes (confirmados pelos baixos valores de  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ ) se amplificaram na formação das pequenas correntes de Norton, dadas em (11) e (12). No entanto, mesmo amplificado, este erro entre

as correntes de Norton do Sistema 1 é relativamente baixo, significando que os equivalentes (Thévenin ou Norton) dos sistemas avaliados são os mesmos nestas duas situações de operação totalmente diferentes (filtro ON: sistemas desacoplados - Figura 5 e filtro OFF: sistemas acoplados - Figura 3), confirmando, novamente, o atendimento da hipótese adotada pela metodologia. Também, este erro indica que houve uma baixa interação harmônica nos sistemas envolvidos, pois, nas equações (11) e (12), foi utilizado o valor da impedância passiva  $Z_{Th_1}$  fornecido pelo fabricante.

Uma vez validada a aplicação da metodologia em campo, se utilizaram os valores médios da TABELA 2 em (7) para determinar o valor da impedância  $Z_{Th_1}^{(p)}$ , mostrado em (15). Este valor foi comparado com o de alta exatidão fornecido pelo fabricante, repetido em (16). Estas impedâncias estão mostradas na Figura 18.

$$Z_{Th_1}^{(p)} = (0.2831 \angle -76.83^\circ) \Omega \quad (15) \quad Z_{Th_1} = (0.3339 \angle -88.47^\circ) \Omega \quad (16)$$

O alto erro entre elas ( $\Delta Z_{Th_1} = 24.1\%$ ), considerando como referência a impedância fornecida pelo fabricante, inviabilizou a utilização de  $Z_{Th_1}^{(p)}$  nas equações de correntes (3), (4) e (8). Conforme já citado, o elevado erro de  $Z_{Th_1}^{(p)}$  se deve à amplificação dos erros de suas componentes fasoriais de magnitudes muito próximas (mostradas na Figura 13 e Figura 14), tornando seu valor pouco confiável.

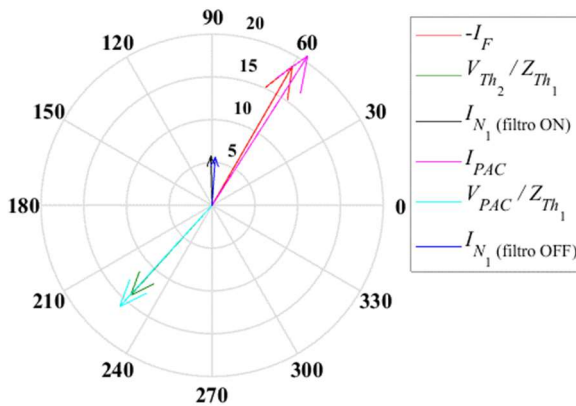


Figura 17: Correntes de Norton do Sistema 1 e suas componentes

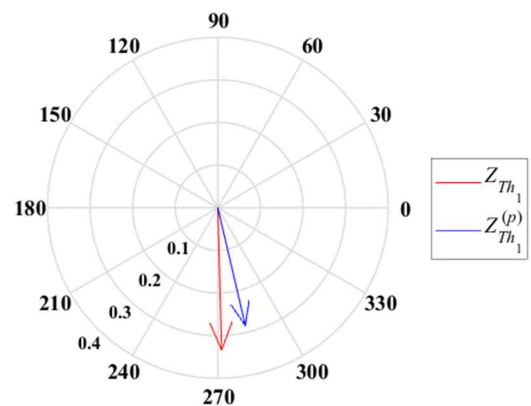


Figura 18: Impedâncias de 5h do Sistema 1

Por fim, as responsabilidades de tensão e corrente, denotadas por  $\bar{V}_{PAC_1}$ ,  $\bar{V}_{PAC_2}$ ,  $\bar{I}_{PAC_1}$  e  $\bar{I}_{PAC_2}$ , são as projeções dos fasores propostos  $V_{PAC_1}^{(p)}$ ,  $V_{PAC_2}^{(p)}$ ,  $I_{PAC_1}^{(p)}$  e  $I_{PAC_2}^{(p)}$  (dados em (1), (2), (3) e (4)) sobre os respectivos fasores resultantes ( $V_{PAC}$  e  $I_{PAC}$ ), podendo ser facilmente calculadas conforme mostrado em [1]. Portanto, para determinar os fasores propostos e suas respectivas projeções (responsabilidades), mostrados na TABELA 5, foram utilizados os valores médios da TABELA 2 e o valor de  $Z_{Th_1}$  fornecido pelo fabricante (apenas para as correntes).

TABELA 5: VALORES DAS RESPONSABILIDADES PRODUZIDAS PELA METODOLOGIA PROPOSTA

Fasor	$V_{PAC_1}^{(p)}$ (V)	$V_{PAC_2}^{(p)}$ (V)	$V_{PAC}$ (V)	$I_{PAC_1}^{(p)}$ (A)	$I_{PAC_2}^{(p)}$ (A)	$I_{PAC}$ (A)
	$0.25 \angle -159.96^\circ$	$5.22 \angle 136.73^\circ$	$5.34 \angle 139.10^\circ$	$6.35 \angle 88.79^\circ$	$15.65 \angle -134.80^\circ$	$20.71 \angle 57.40^\circ$
Responsabilidade	$\bar{V}_{PAC_1}$ (V)	$\bar{V}_{PAC_2}$ (V)		$\bar{I}_{PAC_1}$ (A)	$\bar{I}_{PAC_2}$ (A)	
	0.12 (2 %)	5.22 (98 %)		5.42 (26 %)	-15.29 (74 %)	

A robustez da metodologia pode ser vista na Figura 19 e Figura 20, onde são mostrados vinte e cinco valores dos fasores  $V_{PAC}^{(p)}$ ,  $V_{PAC_1}^{(p)}$ ,  $V_{PAC_2}^{(p)}$ ,  $I_{PAC}^{(p)}$ ,  $I_{PAC_1}^{(p)}$  e  $I_{PAC_2}^{(p)}$ , resultantes da substituição nas equações numeradas de (1) a (6) das possíveis combinações das medições de  $V_{Th_2}$  e  $I_F$  com as de  $V_{PAC}$  e  $I_{PAC}$  (TABELA 2). Além disto, os valores médios de  $V_{PAC_1}^{(p)}$ ,  $V_{PAC_2}^{(p)}$ ,  $I_{PAC_1}^{(p)}$  e  $I_{PAC_2}^{(p)}$  e das cinco medições de  $V_{PAC}$  e  $I_{PAC}$  também são apresentados.



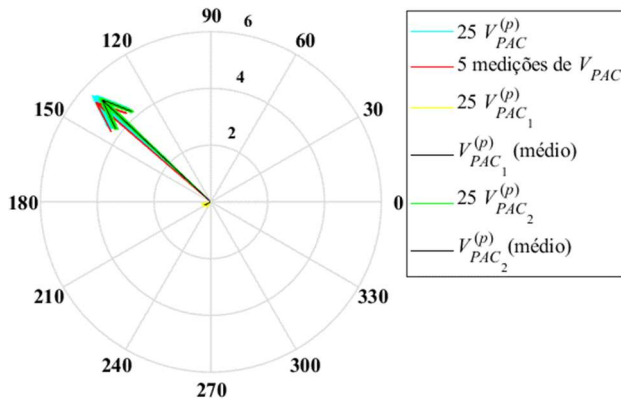


Figura 19: Tensões no PAC

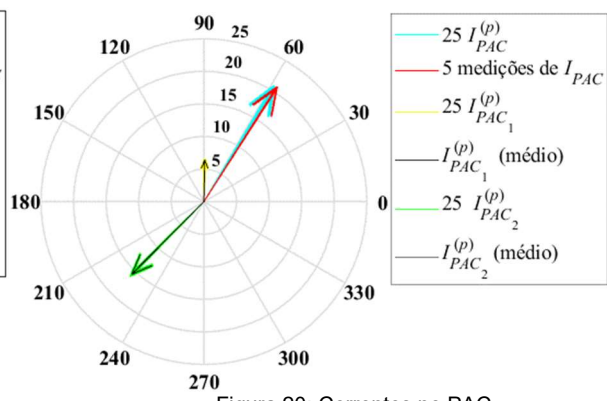


Figura 20: Correntes no PAC

Conforme já citado, as responsabilidades determinadas são oriundas apenas do aerogerador avaliado e do SIN.

Desta maneira, os baixos erros dos índices  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$  significam que a exatidão das responsabilidades calculadas pela metodologia é elevada. Estes índices indicam que o SIN é praticamente o responsável (98%) pela distorção de tensão de 5h no terminal do Aerogerador #6. Ressalta-se que este resultado é coerente com os obtidos com o uso de outras metodologias aplicadas por equipes da CGT Eletrosul e do CEPEL [4], [5].

Em relação às correntes no terminal do Aerogerador #6, as provenientes do SIN são bem maiores que as oriundas deste aerogerador (TABELA 5). Na prática, se utiliza erroneamente  $I_{PAC}$  (no lugar de  $I_{PAC1}^{(p)}$ ) para determinar as correntes de Norton da rede do empreendimento, que são utilizadas no estudo de Desempenho Harmônico para calcular as distorções de tensão no PAC [6]. Note que se este valor de  $I_{PAC}$  tivesse sido utilizado neste estudo, seu erro de 326 % em relação a  $I_{PAC1}^{(p)}$ , impactaria muito nos resultados, uma vez que as distorções de tensão no PAC também sofreriam esta mesma magnitude de erro. Portanto, as metodologias utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) podem produzir resultados expressivamente diferentes dos corretos.

## 8.0 CONCLUSÃO

Como nos ensaios de laboratório e nas simulações computacionais, neste IT também se comprovou a alta eficácia da aplicação da metodologia proposta em campo, validando sua utilização em sistemas reais. A metodologia foi aplicada diversas vezes nos terminais (baixa tensão) de 2 aerogeradores do CE Cerro Chato da CGT Eletrosul. Estes aerogeradores são equipamentos não lineares altamente sofisticados, com geração de potência variante no tempo, ao contrário dos equipamentos e cargas não lineares mais simples utilizados nos ensaios laboratoriais e modelados nas simulações computacionais. Além disto, os equipamentos de medição sofrem contínua interferência eletromagnética, que adiciona ruídos aos seus resultados que podem ser relevantes.

Como foi comprovado em campo que a hipótese adotada pela metodologia é verdadeira (isolamentos dos sistemas mantendo invariáveis seus equivalentes de Norton ou Thévenin), através dos índices de validação propostos ( $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ ) e da comparação entre as correntes de Norton do Sistema 1, significa que as equações teóricas propostas estão corretas e que a hipótese adotada não necessita ser validada sempre que a metodologia for aplicada, pois, conforme os resultados de dezenas de simulações computacionais, esta hipótese não será atendida apenas nos casos em que a atuação do filtro ativo modifica a tensão de frequência fundamental (60 Hz) no PAC (casos de expressivas distorções harmônicas muito raros de acontecer na prática). Ou seja, basta aplicar a metodologia para determinar com exatidão as responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão (independem das impedâncias dos sistemas avaliados). Considerando que no cálculo das correntes propostas se utilizou o valor de  $Z_{Th1}$  fornecido pelo fabricante (de alta exatidão, conforme comprovam os baixos valores dos índices  $\Delta V_{PAC}$  e  $\Delta I_{PAC}$ ), seus resultados também foram de elevada exatidão. Note que, na prática, é difícil determinar  $Z_{Th1}$ . Por isso, em geral, se deve utilizar  $Z_{Th1}^{(p)}$ , cujo valor pode estar sujeito à amplificação de erros. Portanto, os valores das correntes propostas podem não ser corretos.

Uma vez que as medições para o 5h foram confiáveis (muito maiores que os ruídos e que as resoluções dos equipamentos de medição), foi possível verificar a alta exatidão da metodologia para este harmônico. Em relação às tensões, a responsabilidade foi praticamente do SIN, coerente com outras metodologias aplicadas neste CE. Já para as correntes, as provenientes do SIN foram bem maiores que as produzidas pelos aerogeradores. Estes resultados também comprovaram que as metodologias utilizadas pelo ONS, para realização dos estudos de Desempenho Harmônico, podem produzir resultados incorretos (altamente conservadores). Desta forma, pode-se estar atribuindo aos empreendimentos elevados custos devidos à instalação de filtros harmônicos desnecessários.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Franklin Clement Veliz, Sergio Luis Varricchio, Cristiano de Oliveira Costa, Italo Foradini da Nova e Luiz Eduardo Dias Santos "Validação por Meio de Medições da Metodologia que Utiliza Filtros Ativos e Medidores de Tensão e Corrente para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas no PAC", XXV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte – MG, de 10 a 13 de novembro de 2019.
- [2] IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination", 2019.
- [3] Wilsun Xu and Yilu Liu, "A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling", IEEE Transaction on Power Delivery., Vol. 15, no. 2, April 2000.
- [4] Miguel Pires De Carli, Ricardo Antunes "Proposição do Método da Superposição com Múltiplas Fontes e Impedâncias para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas de Tensão", XXV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte – MG, de 10 a 13 de novembro de 2019.
- [5] CEPEL – DTD965/2018, "Campanha de medição de distorção Harmônica na Subestação de Livramento 2 e no Complexo Eólico de Cerro Chato", 05 de junho de 2018.
- [6] ONS NT 009/2016 – REV.03 "Instruções para 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 ", 2020.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



Franklin Clement Veliz possui graduação (2001) e mestrado (2005) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2002, onde atua como pesquisador na equipe de desenvolvimento do Programa HarmZs, para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas. Suas áreas de interesse são qualidade de energia e transitórios eletromagnéticos.