



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

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

**FRANKLIN CLEMENT VÉLIZ(1); SERGIO LUIS VARRICCHIO(1); CRISTIANO DE OLIVEIRA COSTA(1);
ITALO FORADINI DA NOVA(1); LUIZ EDUARDO DIAS SANTOS(1);
CEPEL(1);**

RESUMO

As metodologias utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para a determinação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas relativas à conexão de novas instalações ao Sistema Interligado Nacional (SIN), não consideram o isolamento destes sistemas para os harmônicos de interesse devido a sérias dificuldades práticas. Note que este isolamento é de vital importância para a obtenção correta das responsabilidades. Então, as metodologias utilizadas atualmente podem gerar erros expressivos na identificação das mesmas, que na prática são atribuídas às novas instalações, demandando custosas medidas de mitigação.

Portanto, é imprescindível validar experimentalmente a metodologia desenvolvida pelo CEPEL que determina a verdadeira contribuição das novas instalações sobre estas distorções, viabilizando, assim, medidas de mitigação de harmônicos mais justas. Desta maneira, este trabalho mostra o teste realizado com sucesso em laboratório, onde se verificou que as condições necessárias para a correta aplicação da metodologia proposta (entre elas o isolamento dos sistemas envolvidos) são suficientes para determinar as responsabilidades (de tensão e corrente harmônicas) com elevada precisão, tornando-a potencialmente apta para sua aplicação em sistemas reais.

PALAVRAS-CHAVE

Responsabilidades sobre distorções harmônicas, Ponto de Acoplamento Comum (PAC), filtros ativos, isolamento harmônico, Ponto de Operação Harmônico (POH).

1.0 – INTRODUÇÃO

Atualmente o ONS, através de seus Procedimentos de Rede (PR) [1], indica realizar medições contínuas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre uma nova instalação e o SIN, de modo a determinar as distorções harmônicas de tensão devidas a esta instalação. Como no começo da operação da instalação dificilmente estas medições contínuas acusam as máximas (piores) distorções de tensão que podem acontecer ao longo de sua vida útil (várias décadas), o ONS também indica a realização de simulações que dependem das correntes harmônicas medidas na saída dos aerogeradores (no caso de complexos eólicos [2]) para o cálculo das correntes de Norton desta instalação, necessárias para a obtenção das distorções harmônicas de tensão no PAC. Ou seja, o ONS estabelece para a nova instalação dois tipos de responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão no PAC (ambos com seus respectivos limites). O primeiro tipo trata sobre a responsabilidade avaliada no "curto prazo" (medições contínuas) e o segundo sobre a responsabilidade avaliada no "longo prazo" (simulações), onde, se o limite for violado, dispendiosos filtros precisarão ser instalados. No caso em que o limite da responsabilidade no "curto prazo" for violado, considerando que os filtros indicados nas simulações não tenham sido instalados, os PR determinam que devam ser retirados de operação um número pré-estabelecido de aerogeradores determinado em simulações específicas.

Uma vez que as metodologias adotadas pelos PR do ONS (indicadas por referências técnicas internacionais), não consideram o isolamento elétrico dos sistemas envolvidos (nova instalação e SIN) para os harmônicos de interesse, os seus resultados podem ser significativamente imprecisos, pois estas metodologias utilizam conceitos fundamentados neste isolamento (necessário para a correta obtenção das responsabilidades) como, por exemplo, o equivalente de Norton. Estes resultados incertos, que podem ser conservadores para alguns harmônicos, indicam de forma injusta filtros sobre-dimensionados, para o caso da responsabilidade de "longo prazo", e um número excessivo de aerogeradores a serem retirados de operação para o caso da responsabilidade de "curto prazo".

A inexistência de um método viável na prática, que determine com precisão no PAC os valores das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, motivou o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) a

desenvolver uma metodologia, baseada no uso de filtros ativos e de medidores de tensão e corrente, que supra esta necessidade [3]. Para este propósito é necessário, conforme a metodologia proposta, para os harmônicos de interesse, o isolamento (aproximado) dos sistemas envolvidos (proporcionado pela operação do filtro ativo), a invariabilidade (aproximada) do ponto de operação harmônico (tensão e corrente no PAC) nos instantes imediatamente antes e imediatamente após a remoção do filtro ativo e o comportamento não invasivo deste equipamento. Isto é, sua atuação deve ser próxima à de uma fonte de corrente (modelo ideal).

Entre as vantagens da metodologia proposta tem-se a sua aplicação simultânea para todos os harmônicos de interesse, a não necessidade do conhecimento das impedâncias harmônicas dos sistemas envolvidos na determinação das responsabilidades de tensão e a possibilidade da estimação destas impedâncias com razoável precisão. Então, frente às incertezas nos valores das distorções harmônicas de tensão no PAC, produzidas pelas metodologias adotadas pelos PR do ONS, torna-se imprescindível a validação, através de medições, da metodologia desenvolvida pelo CEPEL, conforme será mostrado nos próximos itens.

Uma particularidade da metodologia proposta consiste em que seus resultados produzidos podem ser validados. Para esta validação, é preciso o conhecimento da impedância harmônica da nova instalação, a qual possibilita verificar o cumprimento das condições necessárias para sua correta aplicação (comportamento não invasivo do filtro ativo, isolamento harmônico e invariabilidade do ponto de operação harmônico). Note que a obtenção desta impedância pode ser complicada, sobretudo quando as impedâncias das fontes harmônicas (cargas com comportamento não linear) dos sistemas envolvidos influenciam na sua determinação.

É importante esclarecer que a operação dos filtros ativos deverá ser na média tensão. Então, para determinar as responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão e corrente no PAC (alta tensão), deverão ser utilizados quadripolos, os quais possibilitam transferir os resultados determinados na média para a alta tensão sem perdas (praticamente) de precisão.

2.0- METODOLOGIA PROPOSTA

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. 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.

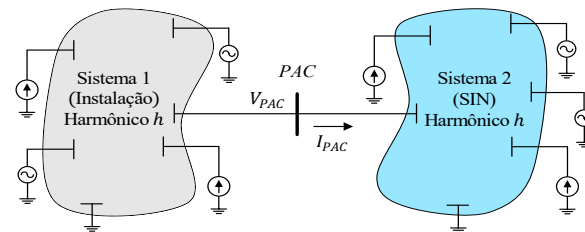


Figura 1: Sistemas acoplados

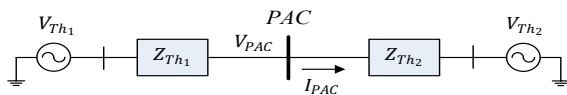


Figura 2: Equivalentes de Thévenin dos sistemas acoplados

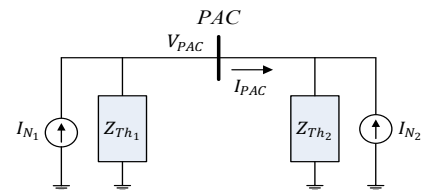


Figura 3: Equivalentes de Norton dos sistemas acoplados

Na Figura 4 está mostrado esquematicamente um filtro ativo conectado ao PAC. Este filtro possui uma malha fechada que inclui um transformador de corrente (TC), um somador (Σ), um controle ($Controle$) e um equipamento de eletrônica de potência que atua como uma fonte de corrente (I_F). Observa-se que a hipótese do filtro ativo se comportar (aproximadamente) como uma fonte de corrente controlada (modelo ideal) é a primeira condição necessária para a correta aplicação da metodologia proposta, pois estabelece seu comportamento não invasivo. Note que esta hipótese foi confirmada experimentalmente nos ensaios realizados, conforme mostrado no item 4.0.

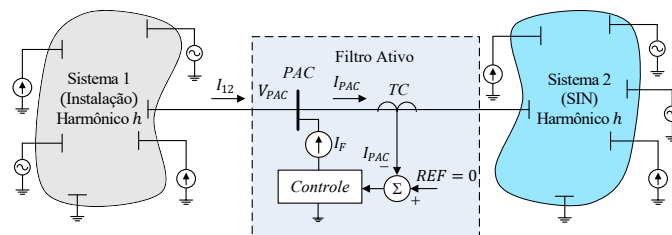


Figura 4: Filtro ativo conectado entre os sistemas 1 e 2 (PAC)

Aplicando a Lei de Correntes de Kirchoff no PAC, obtém-se:

$$I_{PAC} = I_{12} + I_F \quad (1)$$

Como a referência positiva do somador é feita igual a zero e a corrente através do TC (I_{PAC}) é somada negativamente, o controle do filtro atua para zerar a corrente I_{PAC} . Assim, tem-se:

$$I_{PAC} = 0 \quad (2)$$

Substituindo (2) e (1), obtém-se:

$$I_{12} + I_F = 0 \quad (3)$$

De acordo com (2) e (3), 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 mostrada na Figura 5. Este isolamento é a segunda das três condições necessárias para a correta aplicação da metodologia proposta, pois, nesta situação, pode-se determinar alguns dos componentes dos equivalentes de Thévenin (ou de Norton) dos sistemas 1 e 2, que são utilizados pela metodologia.

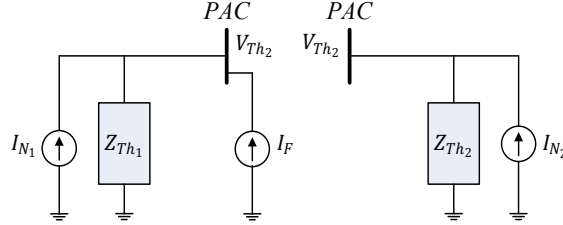


Figura 5: Sistemas 1 e 2 isolados devido à atuação do filtro ativo

Da Figura 5, tem-se:

$$I_F = -I_{N_1} + \frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1}} \quad (4) \quad \text{ou} \quad I_{N_1} = -I_F + \frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1}} \quad (5)$$

onde

$$V_{Th_1} = Z_{Th_1} I_{N_1} \quad (6) \quad \text{e} \quad V_{Th_2} = Z_{Th_2} I_{N_2} \quad (7)$$

Além das medições de I_F e V_{Th_2} , são necessárias as medições de V_{PAC} e I_{PAC} quando os sistemas estão acoplados, ou seja, após a remoção do filtro ativo. Deve-se observar que, para que haja coerência entre as medições destas quatro grandezas, é necessário que, para o harmônico de interesse h , as fontes equivalentes de corrente (I_{N_1} e I_{N_2}), bem como as impedâncias equivalentes (Z_{Th_1} e Z_{Th_2}), devem permanecer constantes imediatamente antes (medições de I_F e V_{Th_2}) e imediatamente após (medições de V_{PAC} e I_{PAC}) a remoção do filtro ativo. Esta é a terceira e última condição necessária para a correta aplicação da metodologia proposta, ou seja, a invariabilidade do ponto de operação harmônico (POH) no PAC nos instantes anteriores e posteriores à remoção do filtro ativo.

A determinação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas no PAC pode ser obtida aplicando-se o Teorema da Superposição ao circuito da Figura 2, conforme mostrado na Figura 6 e Figura 7.

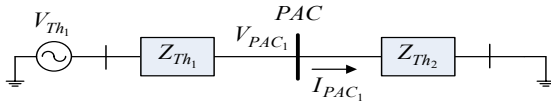


Figura 6: Aplicação do Teorema da Superposição para a obtenção das responsabilidades do Sistema 1

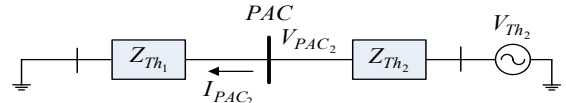


Figura 7: Aplicação do Teorema da Superposição para a obtenção das responsabilidades do Sistema 2

Este teorema estabelece que:

$$V_{PAC} = V_{PAC_1} + V_{PAC_2} \quad (8) \quad I_{PAC} = I_{PAC_1} - I_{PAC_2} \quad (9)$$

De acordo com o circuito da Figura 6, a corrente I_{PAC_1} e a tensão V_{PAC_1} do Sistema 1 (para o harmônico de interesse h), são dadas por:

$$I_{PAC_1} = \frac{V_{Th_1}}{Z_{Th_1} + Z_{Th_2}} \quad (10) \quad V_{PAC_1} = Z_{Th_2} I_{PAC_1} \quad (11)$$

Analogamente, para o circuito da Figura 7, tem-se:

$$I_{PAC_2} = \frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1} + Z_{Th_2}} \quad (12) \quad V_{PAC_2} = Z_{Th_1} I_{PAC_2} \quad (13)$$

De (10) e (12), obtém-se:

$$\frac{V_{Th_1}}{V_{Th_2}} = \frac{I_{PAC_1}}{I_{PAC_2}} \quad (14)$$

Resolvendo (14) para I_{PAC_2} e substituindo em (9), resulta:

$$I_{PAC_1} = \left(\frac{V_{Th_1}}{V_{Th_1} - V_{Th_2}} \right) I_{PAC} \quad (15)$$

Substituindo (5) em (6) e o resultado em (15), obtém-se:

$$I_{PAC_1} = \left(1 - \frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1} I_F}\right) I_{PAC} \quad (16)$$

Substituindo (16) em (9), resulta:

$$I_{PAC_2} = -\frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1} I_F} I_{PAC} \quad (17)$$

Substituindo (17) em (13), obtém-se:

$$V_{PAC_2} = -\frac{I_{PAC}}{I_F} V_{Th_2} \quad (18)$$

Substituindo (18) em (8), tem-se:

$$V_{PAC_1} = V_{PAC} + \frac{I_{PAC}}{I_F} V_{Th_2} \quad (19)$$

Por definição, as responsabilidades sobre as distorções harmônicas de corrente (\bar{I}_{PAC_n}) e tensão (\bar{V}_{PAC_n}) do Sistema n ($n = 1, 2$) são os valores das projeções das componentes fasoriais I_{PAC_n} e V_{PAC_n} , dadas por (16) e (19) (para $n = 1$) ou (17) e (18) (para $n = 2$), respectivamente, sobre os fasores resultantes I_{PAC} e V_{PAC} :

$$\bar{I}_{PAC_n} = \frac{\Re(I_{PAC_n}) \Re(I_{PAC}) + \Im(I_{PAC_n}) \Im(I_{PAC})}{|I_{PAC}|} \quad (20) \quad \bar{V}_{PAC_n} = \frac{\Re(V_{PAC_n}) \Re(V_{PAC}) + \Im(V_{PAC_n}) \Im(V_{PAC})}{|V_{PAC}|} \quad (21)$$

onde os símbolos \Re e \Im denotam partes real e imaginária, respectivamente.

Observa-se que as tensões V_{PAC_2} e V_{PAC_1} , dadas em (18) e (19), respectivamente, e consequentemente as responsabilidades de tensão \bar{V}_{PAC_2} e \bar{V}_{PAC_1} , independem das impedâncias dos sistemas envolvidos Z_{Th_1} e Z_{Th_2} . Esta independência é uma vantagem da metodologia proposta em relação a outras existentes na literatura [4], pois estas impedâncias podem ser difíceis de serem obtidas. Por outro lado, se observa que as correntes I_{PAC_1} e I_{PAC_2} , dadas em (16) e (17), respectivamente, e consequentemente as responsabilidades de corrente \bar{I}_{PAC_1} e \bar{I}_{PAC_2} , dependem de Z_{Th_1} , que pode ser determinada pela metodologia proposta, conforme será mostrado no próximo item. Observa-se que esta metodologia também pode determinar Z_{Th_2} , mas seu cálculo não será mostrado neste informe técnico (IT).

Uma vez que as impedâncias *shunts* das fontes harmônicas (cargas com comportamento não linear) do Sistema 1 podem ser irrelevantes (muito altas) em muitos casos, a obtenção de Z_{Th_1} pode ser, a princípio, não tão complicada, pois a mesma seria composta apenas pelos seus componentes passivos. Para estas situações, seria possível validar os resultados produzidos pela metodologia proposta, bastando comparar as medições de V_{PAC} e I_{PAC} (determinadas imediatamente depois da remoção do filtro) com as correspondentes grandezas determinadas matematicamente pela metodologia. Portanto, supondo que a impedância do Sistema 1 é dada praticamente por seus componentes passivos, é possível validar os resultados produzidos pela metodologia proposta, conforme mostrado a seguir. Observa-se que esta restrição não se aplica ao Sistema 2.

3.0- VALIDAÇÃO MATEMÁTICA DOS RESULTADOS PRODUZIDOS PELA METODOLOGIA PROPOSTA

A partir do circuito da Figura 6, tem-se:

$$V_{Th_1} - V_{PAC_1} = Z_{Th_1} I_{PAC_1} \quad (22)$$

Dividindo (22) por (13) resulta:

$$\frac{V_{Th_1} - V_{PAC_1}}{V_{PAC_2}} = \frac{I_{PAC_1}}{I_{PAC_2}} \quad (23)$$

Substituindo (14) em (23), obtém-se:

$$\frac{V_{Th_1} - V_{PAC_1}}{V_{PAC_2}} = \frac{V_{Th_1}}{V_{Th_2}} \quad (24)$$

Colocando V_{PAC_1} em evidência, tem-se:

$$V_{PAC_1} = \left(1 - \frac{V_{PAC_2}}{V_{Th_2}}\right) V_{Th_1} \quad (25)$$

Substituindo (18) e (6) em (25) resulta:

$$V_{PAC_1} = \left(1 + \frac{I_{PAC}}{I_F}\right) Z_{Th_1} I_{N_1} \quad (26)$$

Substituindo (5) em (26) obtém-se:

$$V_{PAC_1} = \left(\frac{I_F + I_{PAC}}{I_F}\right) (V_{Th_2} - Z_{Th_1} I_F) \quad (27)$$

Somando (27) e (18) e considerando (8), obtém-se o valor de V_{PAC} produzido pela metodologia proposta:

$$V_{PAC} = \left(\frac{I_F + I_{PAC}}{I_F}\right) (V_{Th_2} - Z_{Th_1} I_F) - \frac{I_{PAC}}{I_F} V_{Th_2} \quad \therefore V_{PAC_proposta} = V_{Th_2} - Z_{Th_1} (I_F + I_{PAC}) \quad (28)$$

Este valor deverá ser comparado com o valor de V_{PAC} medido imediatamente após a remoção do filtro ativo (Figura 1), constituindo-se assim no primeiro índice de validação (ΔV_{PAC}) da metodologia proposta:

$$\Delta V_{PAC} = \left| \frac{V_{PAC_medição} - V_{PAC_proposta}}{V_{PAC_medição}} \right| \times 100\% \quad (29)$$

A partir de (28) pode-se determinar o valor da corrente I_{PAC} produzido pela metodologia, bastando colocá-lo em evidência e utilizar $V_{PAC_medição}$ no lugar de $V_{PAC_proposta}$:

$$I_{PAC_proposta} = \frac{(V_{Th2} - V_{PAC})}{Z_{Th1}} - I_F \quad (30)$$

De forma análoga que a tensão V_{PAC} , a corrente I_{PAC} calculada pela metodologia proposta deverá ser comparada com a corrente I_{PAC} medida imediatamente após a remoção do filtro ativo, gerando, deste modo, o segundo e último índice de validação (ΔI_{PAC}) da metodologia proposta:

$$\Delta I_{PAC} = \left| \frac{I_{PAC_medição} - I_{PAC_proposta}}{I_{PAC_medição}} \right| \times 100\% \quad (31)$$

É importante ressaltar que V_{PAC} e I_{PAC} são as únicas grandezas que podem ser determinadas tanto pela metodologia proposta quanto por medição. Deve-se observar que os erros nas demais grandezas determinadas pela metodologia proposta (I_{PAC1} , I_{PAC2} , V_{PAC2} , V_{PAC1} e I_{N1}) são, em geral, diferentes dos erros ΔI_{PAC} e ΔV_{PAC} . No entanto, conforme mostrado nos ensaios experimentais realizados, estes erros são perfeitamente aceitáveis.

Como as grandezas avaliadas pela metodologia proposta são fasores, se adotou para os erros destas grandezas uma equação que considerou seus módulos e ângulos. Desta forma, o tipo de erro adotado neste trabalho para todos os fasores avaliados é dado pelo módulo da diferença entre os fasores dividida pelo módulo do fasor considerado como referência (valor medido), conforme exemplificado em (29) e (31).

Uma vez que a determinação da impedância Z_{Th1} (por cálculo ou medição) pode ser uma tarefa difícil, a metodologia proposta também pode ser utilizada para sua determinação. Para este propósito, basta colocá-la em evidência em (28), utilizando $V_{PAC_medição}$ no lugar de $V_{PAC_proposta}$:

$$Z_{Th1_proposta} = \frac{V_{Th2} - V_{PAC}}{I_F + I_{PAC}} \quad (32)$$

Note que, se a medição de I_F for muito próxima da medição de I_{PAC} defasada de 180° ($I_F \approx -I_{PAC}$), a precisão no cálculo de $Z_{Th1_proposta}$ poderá ser afetada, pois os erros nos fasores I_F e I_{PAC} são amplificados na composição do diminuto fasor resultante ($I_F + I_{PAC}$). Esta condição de perda de precisão na determinação de Z_{Th1} será vista nos ensaios laboratoriais descritos a seguir.

4.0- RESULTADOS

A. Sistema Teste

A validação da metodologia proposta foi feita por meio de ensaios experimentais realizados num dos laboratórios do CEPEL. Estes ensaios consistiram em medições de tensão e corrente (na Fase A para o 5º harmônico) em um circuito elétrico especialmente projetado (Figura 8) para este objetivo, pois, neste ambiente controlado, puderam-se determinar com exatidão as grandezas de interesse que deveriam ser replicadas pela metodologia proposta. Assim, este circuito emulou a situação real de dois sistemas acoplados contendo cargas não lineares, com o filtro ativo devidamente conectado entre eles.

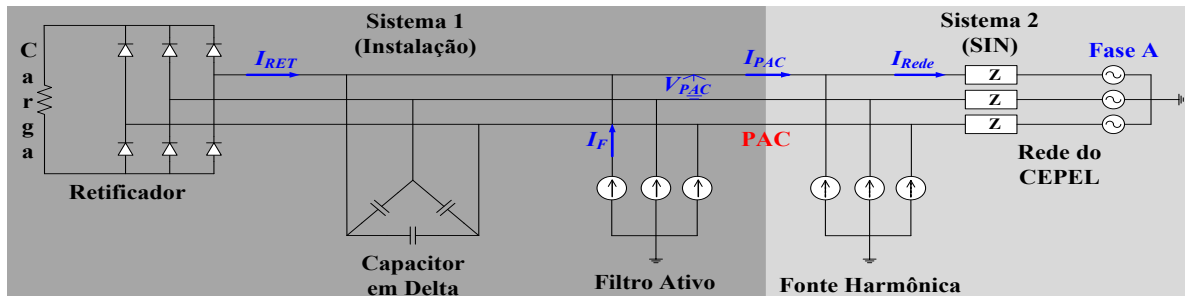


Figura 8: Circuito implementado para a avaliação da metodologia proposta

Então o Sistema 1, que representa à nova instalação, foi composto por um retificador (alimentando um banco de resistores) ligado em paralelo com um capacitor, e o Sistema 2, que representa o SIN, foi composto pela rede do CEPEL em paralelo com uma fonte de harmônicos, que objetivou reforçar (acrescentar) as correntes harmônicas provenientes desta rede. Note que o filtro ativo foi conectado no PAC (entre o capacitor e a fonte de harmônicos). Os dados dos componentes do circuito de ensaios estão mostrados na TABELA 1.

TABELA 1: COMPONENTES DO CIRCUITO DE ENSAIOS

Equipamento	Potência	Tensão	Corrente
Retificador (Seis pulsos)	Até 138 kW	Até 1600 V	50 A (máxima)
Resistores (20.5 Ω)	22.5 kW	680 V	33 A (Operação)
Capacitor (8.4 Ω)	30 kvar	480 V	36 A (Nominal)
Filtro ativo (malha fechada)	Até 250 kVA	380 V - 480 V	300 A (máxima)
Fonte harmônica	Até 83 kVA	220 V - 480 V	100 A (máxima)
Rede CEPEL (impedância baixa)	-	480 V (tensão de operação)	-

Exceto a tensão de corrente contínua (DC) nos resistores, todas as tensões mostradas nesta tabela são de linha. Note que também foram utilizados um qualímetro e transdutores de tensão e corrente. Todos de alta precisão.

Então, foram realizados os ensaios no circuito da Figura 8 no período de análise mostrado na Figura 9, onde os valores de tempo e correntes indicados são aproximados. Observa-se que neste período o DHT(5h) no PAC sempre se manteve próximo a 2.7 % (35 % acima do limite de 2 % indicado pelo ONS).

Desde o início do intervalo de análise ($t = 0$ s) até 50 s, apenas operou a rede do CEPEL. Portanto, a sua corrente de 5º harmônico de 1.5 A foi a que incidiu no PAC (I_{PAC}). Imediatamente depois, iniciou-se a operação da fonte de harmônicos, onde a corrente incidente no PAC (I_{PAC}) passou de 1.5 A para 4.5 A, conforme mostrado na Figura 9.

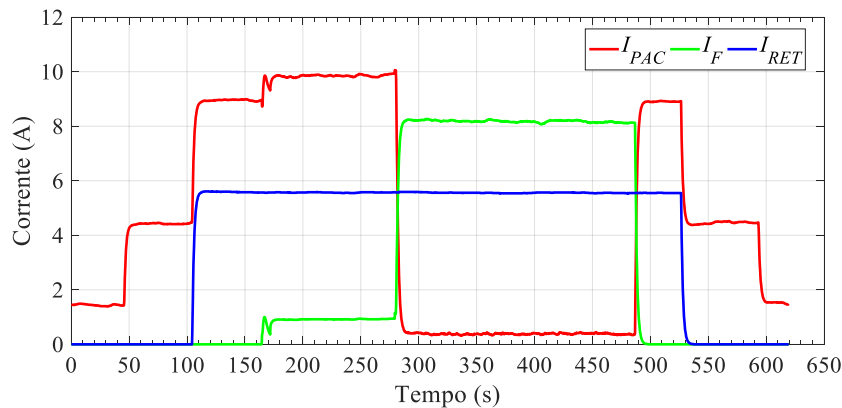


Figura 9: Módulos das correntes de 5º harmônico de interesse

A corrente no PAC ($I_{PAC} = 4.5$ A), devida ao Sistema 2, se manteve praticamente constante até o instante $t = 105$ s em que se acionou o retificador ($I_{RET} = 5.6$ A), fazendo com que I_{PAC} aumentasse consideravelmente, variando de 4.5 A para 9.0 A, indicando que as suas componentes, provenientes de ambos os sistemas, eram da mesma ordem de grandeza e estavam aproximadamente em fase, possibilitando assim a avaliação adequada da metodologia proposta.

Após alguns instantes ($t = 170$ s) o filtro ativo foi energizado. Observa-se que o filtro precisa ficar energizado (sem atuar) alguns segundos para programá-lo. Então, até $t = 280$ s, o filtro consumiu uma corrente de energização de 5º harmônico ($I_F = 1$ A), que implicou no pequeno aumento da I_{PAC} para 10 A neste intervalo, conforme Figura 9.

Com o objetivo de eliminar as correntes de 5º harmônico no PAC, monitoradas pelos TCs, o filtro ativo foi acionado após o instante $t = 280$ s, onde a sua corrente aumentou consideravelmente ($I_F = 8.1$ A) e a corrente I_{PAC} diminuiu de 10 A para 0.33 A. Esta expressiva redução da corrente de 5º harmônico no PAC, constata o atendimento da segunda condição necessária (isolamento aproximado ou quase isolamento) para a validação da metodologia proposta (este atendimento também será verificado pelos índices ΔV_{PAC} e ΔI_{PAC} no próximo item).

O quase isolamento durou até o instante em que o filtro ativo foi removido ($t = 490$ s), onde a corrente I_{PAC} voltou ao seu valor original sem a influência do mesmo ($I_{PAC} = 9$ A).

A remoção do retificador no instante $t = 530$ s, implicou na volta da corrente I_{PAC} ao valor de quando apenas o Sistema 2 atuava ($I_{PAC} = 4.5$ A). Finalmente em $t = 595$ s a fonte de harmônicos foi desligada e a corrente no PAC ($I_{PAC} = 1.5$ A) voltou a ser oriunda apenas da rede do CEPEL.

B. Avaliação Experimental da Aplicação da Metodologia Proposta

Para a correta aplicação da metodologia proposta, deve ser verificado o atendimento (aproximado) de suas condições necessárias (comportamento não invasivo do filtro ativo, isolamento e manutenção do POH). Para este propósito, devem-se calcular os índices (erros) de validação da metodologia (ΔV_{PAC} e ΔI_{PAC}). Se estes índices forem muito pequenos, significa que a metodologia proposta foi aplicada com sucesso. Então, mediram-se os valores das grandezas essenciais para a determinação destes índices (erros), isto é, Z_{Th_1} , $V_F (= V_{Th_2})$ e I_F (V_F e I_F medidos num instante imediatamente antes da remoção do filtro em $t = 490$ s) e V_{PAC} e I_{PAC} (medidos num instante imediatamente depois da remoção do filtro em $t = 490$ s), os quais são mostrados na TABELA 2. É importante observar que na determinação de Z_{Th_1} se supôs que a impedância *shunt* do retificador é praticamente infinita, ou seja, que esta impedância é composta apenas por componentes passivos, isto é, pelo banco de capacitores (Figura

8). Esta suposição, bem como a aplicação da metodologia proposta, estão corretas se os índices (erros) de validação da metodologia (ΔV_{PAC} e ΔI_{PAC}), que utilizam esta impedância, forem muito pequenos, conforme será mostrado a seguir.

TABELA 2: GRANDEZAS DE 5º HARMÔNICO MEDIDAS

Impedância	Módulo	Ângulo(°)	Real/Imaginário
Z_{Th_1}	1.683 Ω	-88.33	(0.0490 - j 1.6823) Ω
Antes da remoção (filtro ON)		Módulo	Ângulo(°)
I_F	8.13 A	-162.28	(-7.7443 - j 2.4745) A
V_F	6.82 V	146.46	(-5.6845 + j 3.7682) V
Depois da remoção (filtro OFF)		Módulo	Ângulo(°)
I_{PAC}	8.91 A	13.4	(8.6674 + j 2.0649) A
V_{PAC}	7.26 V	134.26	(-5.0669 + j 5.1995) V

Para o cálculo de ΔV_{PAC} , foram utilizados (28) e o respectivo valor de V_{PAC} medido (TABELA 2).

Substituindo os valores apropriados da TABELA 2 em (28), obtém-se:

$$V_{PAC_Proposta} = (-5.0407 + j 5.3413) V$$

No caso de ΔI_{PAC} , foram utilizados (30) e o valor de I_{PAC} obtido por medição, dado na TABELA 2.

Substituindo os respectivos valores da TABELA 2 em (30), obtém-se:

$$I_{PAC_Proposta} = (8.5837 + j 2.0829) A$$

Portanto, os respectivos erros ou índices (ΔV_{PAC} e ΔI_{PAC}), dados por (29) e (31), estão mostrados na TABELA 3.

TABELA 3: ÍNDICES (ERROS) DEFINIDOS PELA METODOLOGIA

Erro	Valor
ΔV_{PAC}	1.99%
ΔI_{PAC}	0.96%

Estes pequenos erros indicam que a aplicação da metodologia foi bem sucedida e que a impedância *shunt* do retificador é praticamente infinita, ou seja, a suposição de que a impedância do Sistema 1 é, na prática, dada apenas pela impedância do capacitor está correta. Note que o objetivo principal destes índices é sua utilização em sistemas reais, de modo a possibilitar a validação da aplicação da metodologia em campo. Como já citado, esta validade depende do comprimento das três condições: comportamento não invasivo do filtro ativo, isolamento harmônico e invariabilidade do POH.

Uma vez que a metodologia também pode determinar a impedância Z_{Th_1} , a mesma foi calculada utilizando (32):

$$Z_{Th_1_Proposta} = (0.0158 - j 1.5434) \Omega$$

Este valor é levemente diferente ($\Delta Z_{Th_1} = 8.48\%$) do medido (mostrado na TABELA 2), pois $I_F \approx -I_{PAC}$, conforme já citado no item 3.0. Os valores destas impedâncias estão mostrados na Figura 10.

Dado o êxito da aplicação da metodologia, foi possível comparar os valores de I_{N_1} determinados nos instantes "imediatamente antes" e "imediatamente depois" da retirada do filtro. Para isto utilizou-se, respectivamente, a equação (5) (repetida em (33)) e a equação consagrada na literatura dada em [4], mostrada em (34).

$$I_{N_1_filtro_ON} = -I_F + \frac{V_{Th_2}}{Z_{Th_1}} \quad (33)$$

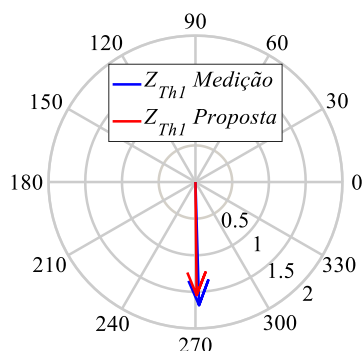
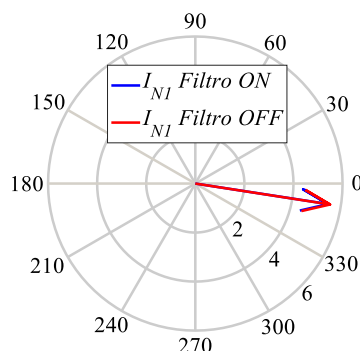
$$I_{N_1_filtro_OFF} = I_{PAC} + \frac{V_{PAC}}{Z_{Th_1}} \quad (34)$$

Substituindo os valores da TABELA 2 em (33) e (34), obtém-se, respectivamente:

$$I_{N_1_filtro_ON} = (5.4078 - j 0.8364) A \quad (35)$$

$$I_{N_1_filtro_OFF} = (5.4916 - j 0.8544) A \quad (36)$$

cujo respectivo erro (ΔI_{N_1}) é de 1.54 %, considerando o fasor $I_{N_1_filtro_OFF}$ como referência. Estes fasores estão mostrados na Figura 11.

Figura 10: Comparação entre os fasores de Z_{Th_1} Figura 11: Comparação entre os fasores de I_{N_1}

Observa-se que os valores de I_{N_1} foram obtidos em dois ambientes totalmente diferentes e independentes. Isto é, quando os sistemas envolvidos estavam isolados (filtro ON) e quando estavam acoplados (filtro OFF). Portanto, este reduzido erro também comprova a invariabilidade do ponto de operação harmônico.

Como o circuito de ensaios (Figura 8) foi especialmente projetado para determinar facilmente por meio de medição a corrente de Norton do Sistema 1 ($I_{N_1} = I_{RET}$), sem necessidade de realizar o curto circuito no PAC, seus valores medidos com alta precisão, nos instantes “imediatamente antes” e “imediatamente depois” da retirada do filtro, foram comparados com os valores dados em (35) e (36), respectivamente, conforme mostrado na TABELA 4.

TABELA 4: COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES DE NORTON (AMPERES)

I_{N_1} : Filtro ON			I_{N_1} : Filtro OFF		
Medição	Equação (35)	Erro	Medição	Equação (36)	Erro
$5.55\angle-8.48^\circ$	$5.47\angle-8.79^\circ$	1.50%	$5.55\angle-9.22^\circ$	$5.56\angle-8.84^\circ$	0.67%

Os resultados desta tabela constatarem novamente a eficácia das equações (33) e (34) na determinação de I_{N_1} .

C. Resultados Experimentais das Responsabilidades Produzidos pela Metodologia Proposta

Com a determinação precisa da corrente de Norton (I_{N_1}) da nova instalação (Sistema 1) pela metodologia proposta, é possível, por meio de simulações computacionais, estimar mais realisticamente as responsabilidades de longo prazo desta instalação. Falta, então, avaliar os resultados das responsabilidades de curto prazo produzidos por esta metodologia. Para este objetivo, o circuito de ensaios foi especialmente projetado para se conhecer experimentalmente estas responsabilidades. Assim, bastou aplicar o Teorema da Superposição, que consistiu em desligar o retificador do Sistema 1 (Figura 8) alguns instantes depois da remoção do filtro (em $t = 530$ s, conforme indicado na Figura 9). Para viabilizar a aplicação da superposição, foi suposto que a impedância Z_{Th_2} também é de origem passiva (como Z_{Th_1} que é a impedância do capacitor). Assim, as cargas com comportamento não linear dos sistemas envolvidos atuaram apenas como fontes de correntes. Portanto, os valores de Z_{Th_1} , Z_{Th_2} e das cargas com comportamento não linear do Sistema 2 não se alteraram devido a este desligamento. Esta suposição será verdadeira se os resultados devidos à superposição forem os mesmos (ou muito próximos) aos da metodologia proposta, conforme comprovado a seguir.

Então, foram medidos os valores de V_{PAC_2} e I_{PAC_2} (Figura 7), os quais foram utilizados junto com os valores das medições de V_{PAC} e I_{PAC} (dados na TABELA 2) nas equações (8) e (9), de modo a determinar V_{PAC_1} e I_{PAC_1} .

Assim, as componentes fasoriais (V_{PAC_2} , I_{PAC_2} , V_{PAC_1} e I_{PAC_1}) e, conseqüentemente, as responsabilidades de curto prazo, foram obtidas por medições a priori (antes da aplicação da metodologia), conforme mostrado na TABELA 5.

TABELA 5: RESPONSABILIDADES DETERMINADAS POR MEDIÇÕES

Grandezas obtidas por medições	Módulo/Ângulo	Real/Imaginário	Responsabilidade (projeção)
V_{PAC_2}	$7.34 \angle 142.30$ V	$(-5.8076 + j4.4886)$ V	7.27 V
I_{PAC_2}	$4.38 \angle -129.52$ A	$(-2.7872 - j3.3787)$ A	-3.49 A
V_{PAC_1}	$1.03 \angle 43.82$ V	$(0.7407 + j0.7109)$ V	-0.01 V
I_{PAC_1}	$6.03 \angle -12.60$ A	$(5.8802 - j1.3139)$ A	5.42 A

Para avaliar a eficácia da metodologia proposta, basta comparar os seus resultados, calculados a seguir, com os obtidos por estas medições a priori, mostrados na TABELA 5.

Substituindo os valores da TABELA 2 em (16), (17), (18) e (19), obtém-se:

$$I_{PAC_1_Proposta} = (5.8408 - j 1.3605) \text{ A}$$

$$I_{PAC_2_Proposta} = (-2.8267 - j 3.4254) \text{ A}$$

$$V_{PAC_2_Proposta} = (-5.9011 + j 4.5872) \text{ V}$$

$$V_{PAC_1_Proposta} = (0.8342 + j 0.6122) \text{ V}$$

Uma vez obtidas estas componentes fasoriais pela metodologia proposta, cujas projeções sobre as respectivas resultantes (V_{PAC} e I_{PAC}) determinam as responsabilidades de curto prazo, as mesmas foram comparadas com os respectivos valores obtidos por medições a priori, conforme mostrado na TABELA 6.

TABELA 6: COMPARAÇÃO ENTRE AS COMPONENTES FASORIAIS

Grandeza	A Priori (por medições)	Metodologia	Erro
I_{PAC_1} (A)	$6.03 \angle -12.60^\circ$	$6.0 \angle -13.11^\circ$	1.01%
I_{PAC_2} (A)	$4.38 \angle -129.52^\circ$	$4.44 \angle -129.53^\circ$	1.39%
V_{PAC_1} (V)	$1.03 \angle 43.82^\circ$	$1.03 \angle 36.28^\circ$	13.24%
V_{PAC_2} (V)	$7.34 \angle 142.30^\circ$	$7.47 \angle 142.14^\circ$	1.85%

Estes fasores de corrente e tensão, juntamente com as correspondentes resultantes, foram comparadas no domínio do tempo, conforme mostrado na Figura 12 e na Figura 13, respectivamente.

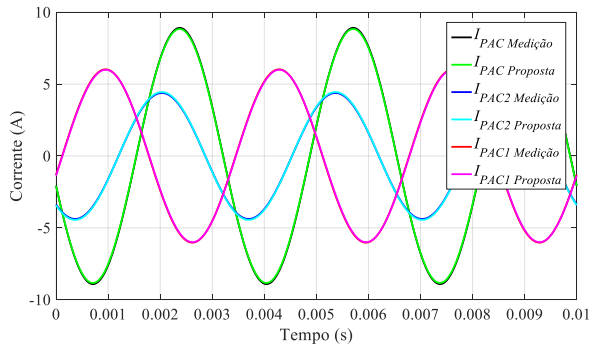


Figura 12: Comparação entre os fasores de corrente

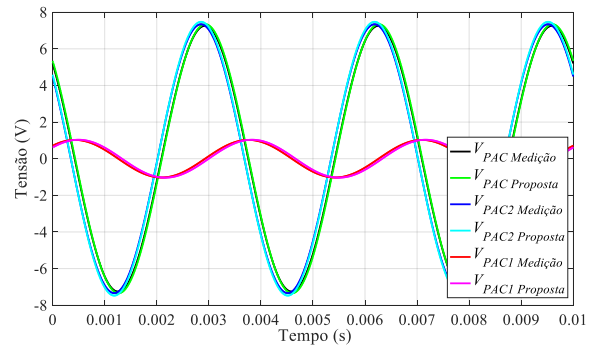


Figura 13: Comparação entre os fasores de tensão

A partir das comparações entre os resultados de origem puramente experimental (medições) com os produzidos pela metodologia, que associa resultados experimentais com cálculos matemáticos, verificou-se a alta precisão da mesma na determinação das responsabilidades de curto prazo, conforme descrito na TABELA 7.

TABELA 7: COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPONSABILIDADES DE CURTO PRAZO

Grandeza	\bar{I}_{PAC_1} (A)	\bar{I}_{PAC_2} (A)	\bar{V}_{PAC_1} (V)	\bar{V}_{PAC_2} (V)
A Priori – Medições (TABELA 5)	5.42	-3.49	-0.01	7.27
Metodologia ((16) a (19))	5.37	-3.54	-0.14	7.40

5.0- CONCLUSÃO

Este IT descreve uma metodologia, baseada no uso de filtros ativos, de medidores de tensão e corrente e de equações matemáticas, que pode determinar com precisão as responsabilidades dos sistemas envolvidos (nova instalação e SIN) sobre as distorções harmônicas de tensão e corrente no PAC no período em que são realizadas as respectivas medições de tensão e corrente (curto prazo). A metodologia proposta também pode tornar a estimativa de responsabilidade de longo prazo da nova instalação mais realista, uma vez que determina com precisão sua corrente de Norton, necessária para realizar as simulações computacionais.

Um circuito de ensaios foi especialmente projetado para testar a metodologia proposta. Neste ambiente controlado, puderam-se determinar com exatidão as grandezas de interesse que deveriam ser replicadas pela metodologia. Assim, os resultados destes ensaios revelaram sua alta precisão, tornando-a potencialmente apta para aplicações em sistemas reais. Portanto, futuramente, a metodologia proposta deverá ser validada, também, em testes de campo.

A metodologia proposta, cujo desenvolvimento considerou o comportamento não invasivo (ideal) do filtro ativo, foi testada com sucesso, através de simulações computacionais, nas mais diversas situações, inclusive nos casos em que as impedâncias das fontes harmônicas (cargas com comportamento não linear) dos sistemas envolvidos são relevantes. Note que, nestes casos, a validação de sua aplicação não pode ser feita por meio dos índices (ΔV_{PAC} e ΔI_{PAC}) propostos. No entanto, as simulações mostraram que para garantir o êxito da aplicação da metodologia proposta, basta identificar quando a impedância do filtro ativo se torna influente. Julga-se que isto ocorra quando o filtro está sendo alimentado por tensões altamente distorcidas. Mais estudos computacionais serão necessários para se determinar as condições de validação da metodologia para estas situações e serão divulgados em um novo IT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS NT 009/2016 – REV.02 “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”, Março de 2018.
- [2] IEC 61400-21, “Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines”, 2008.
- [3] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio, Cristiano de Oliveira Costa, Octávio Augusto da Cunha e Renato Campos Amaral “Metodologia Baseada em Medições e no uso de Filtros Ativos para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas Relativas à Conexão de Novas Instalações ao SIN”, XXIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – PR, de 22 a 25 de Outubro de 2017.
- [4] 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.

DADOS BIOGRÁFICOS



Franklin Clement Véliz: 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.