



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/25

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - 10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GDS

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

Franklin Clement Véliz (*)
CEPEL

Sergio Luis Varricchio
CEPEL

Cristiano de Oliveira Costa
CEPEL

Octávio Augusto da Cunha
POWER SOLUTION ENGENHARIA ELÉTRICA

Renato Campos Amaral
ENERWATT ENGENHARIA

RESUMO

As metodologias indicadas por referências técnicas internacionais e utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) [1], para a determinação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas relativas à conexão de novas instalações ao Sistema Interligado Nacional (SIN), não consideram o “isolamento harmônico” (formalmente definido no item 2.0) destes sistemas devido a sérias dificuldades práticas. Note que o “isolamento harmônico” é de vital importância para o cálculo dos equivalentes de Thévenin (ou Norton) destes sistemas, que juntos com a aplicação do Teorema da Superposição, são necessários para a obtenção das responsabilidades sobre as distorções. Então, como as metodologias apontadas pelo ONS usam estas mesmas propriedades de circuitos lineares desconsiderando o “isolamento harmônico”, podem gerar erros expressivos na identificação das responsabilidades sobre as distorções, que na prática são atribuídas às novas instalações, demandando custosos filtros. Portanto, é imprescindível o desenvolvimento de uma metodologia que determine a verdadeira contribuição das novas instalações sobre estas distorções, viabilizando, assim, medidas de mitigação de harmônicos mais justas. Desta maneira, este trabalho propõe uma nova metodologia, baseada no uso de filtros ativos na média tensão e de medidores (de tensão e corrente), que permite obter estes equivalentes considerando o “isolamento harmônico” entre os sistemas envolvidos (nova instalação e SIN), possibilitando, deste modo, a obtenção correta das responsabilidades sobre as distorções no PAC.

Para avaliar a metodologia proposta, foram realizadas simulações no PSCAD de um caso exemplo dado por um complexo eólico real conectado ao SIN, onde se verificou sua efetividade e enorme potencial de aplicação em sistemas reais quando comparada com as metodologias vigentes e com o cenário ideal (todos os parâmetros do caso exemplo são conhecidos).

PALAVRAS-CHAVE

Distorções harmônicas, responsabilidades, isolamento harmônico, equivalentes de Thévenin (Norton), filtros ativos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente o ONS, através de seus Procedimentos de Rede (PR), indica realizar medições de tensão e corrente no ponto do acoplamento comum (PAC) entre a nova instalação e o SIN de modo a determinar as distorções harmônicas de tensão devidas a esta instalação. Como estas medições são realizadas em períodos específicos, não contemplam a obtenção das distorções de tensão, devidas à nova instalação, que podem acontecer ao longo da sua vida útil (algumas décadas). Conseqüentemente, para contemplá-las, também é indicada a realização de medições de correntes nos terminais das cargas com comportamento não linear da nova instalação, que são necessárias para calcular a máxima corrente de Norton desta instalação. Repare que esta corrente de Norton será utilizada para simular o impacto harmônico no PAC devido aos seus possíveis cenários futuros, segundo o Método do Lugar Geométrico (MLG) [1].

* CEPEL - Av. Horácio Macedo 354, Cidade Universitária - CEP: 21941-911 - Rio de Janeiro, RJ.
Tel: +55-21-2598-6214, Fax: +55-21-2598-6451, email: franklincv@cepel.br

Desta maneira, são dois os tipos de distorções de tensão, devidas à nova instalação, avaliadas pelo ONS (avalia apenas distorções de tensão). O primeiro tipo aborda as distorções em períodos curtos específicos, denominadas neste trabalho de “distorções medidas”. O segundo tipo considera as distorções através de simulações num período maior (3 anos segundo os PR) que supostamente atende ao ciclo de vida útil da nova instalação, denominadas neste trabalho de “distorções simuladas”.

Para a obtenção destas distorções, o ONS adota as metodologias vigentes indicadas pelas referências técnicas internacionais [2] e [3], respectivamente. Repare que estas metodologias vigentes utilizam o teorema da Superposição e os equivalentes de Thévenin (ou Norton) desconsiderando o vital “isolamento harmônico” (item 2.0), o que pode resultar em erros significativos, indefinindo qualquer que seja a identificação da responsabilidade da nova instalação. Observa-se que no caso das “distorções simuladas”, a indefinição na obtenção das correntes de Norton da nova instalação, impacta diretamente no dispendioso projeto dos filtros.

Frente a estas incertezas e imprecisões nos cálculos das distorções, torna-se essencial o desenvolvimento de uma metodologia viável na prática que determine a verdadeira contribuição das novas instalações sobre as distorções, viabilizando, assim, medidas de mitigação de harmônicos mais justas. Desta maneira, este trabalho propõe uma nova metodologia baseada no uso de filtros ativos na média tensão e de medidores (de tensão e corrente), que considera o “isolamento harmônico” de grande parte da rede da nova instalação perante o resto do sistema, possibilitando sua representação pelo seu equivalente de Norton e a representação do SIN no PAC pela sua tensão de Thévenin, permitindo, assim, a obtenção adequada das responsabilidades sobre as distorções no PAC.

2.0- ISOLAMENTO HARMÔNICO

Esta seção do artigo pretende definir formalmente o que significa o termo “isolamento harmônico”.

Na Figura 1 está mostrada esquematicamente, para o harmônico de interesse h , uma rede interna (nova instalação) conectada à rede externa (SIN) através de uma barra (PAC). Note que o isolamento elétrico destas redes ocorre quando $i_{PAC}(h) = 0$, o que equivale à desconexão física das redes para este harmônico (Figura 2).

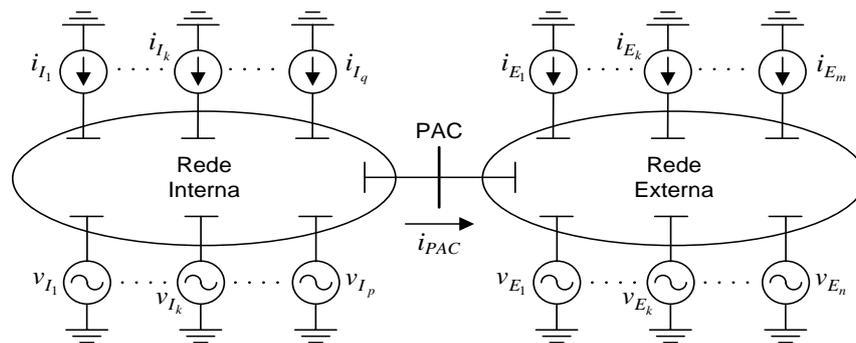


Figura 1: Rede interna (nova instalação) acoplada à rede externa (SIN)

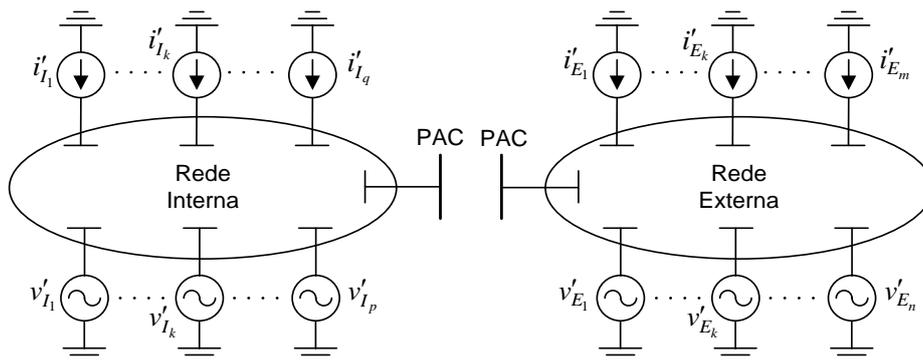


Figura 2: Rede interna (nova instalação) isolada da rede externa (SIN) para o harmônico h

O “isolamento harmônico”, definido neste trabalho, é um tipo de isolamento elétrico, para um harmônico específico, no qual os valores das fontes harmônicas de ambas as redes, após o isolamento, permanecem com seus valores originais (imediatamente antes do isolamento). Repare que esta definição seria válida nos sistemas reais, pois as características operativas destes sistemas não se modificariam na frequência fundamental, conseqüentemente tampouco se modificariam as tensões e correntes harmônicas oriundas desta frequência fundamental.

Matematicamente, tem-se:

$$v'_{I_k}(h) = v_{I_k}(h), \quad k = 1, p \quad (1)$$

$$i'_{I_k}(h) = i_{I_k}(h), \quad k = 1, q \quad (2)$$

$$v'_{E_k}(h) = v_{E_k}(h), \quad k = 1, n \quad (3)$$

$$i'_{E_k}(h) = i_{E_k}(h), \quad k = 1, m \quad (4)$$

Como o “isolamento harmônico” mantém as fontes harmônicas dos sistemas envolvidos com os valores que tinham imediatamente antes do isolamento, possibilita o cálculo correto dos respectivos equivalentes de Thévenin ou de Norton.

3.0- METODOLOGIA IDEAL PARA O CÁLCULO DAS RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES NO PAC

Para calcular as responsabilidades sobre as distorções no PAC, deve-se aplicar o teorema da Superposição nos equivalentes de Thévenin acoplados dos respectivos sistemas envolvidos, determinados considerando o “isolamento harmônico”, conforme mostrado na Figura 3. Observa-se que estes equivalentes possibilitam o desligamento por vez de cada fonte ativa (V_{ext} e V_{int}) e, conseqüentemente, a determinação das responsabilidades sobre as distorções no PAC, conforme exposto na Figura 4 e Figura 5.

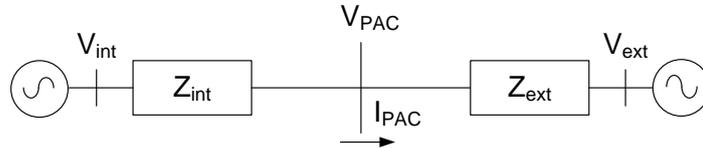


Figura 3: Circuitos equivalentes de Thévenin da nova instalação (V_{int} e Z_{int}) e do SIN (V_{ext} e Z_{ext}) acoplados

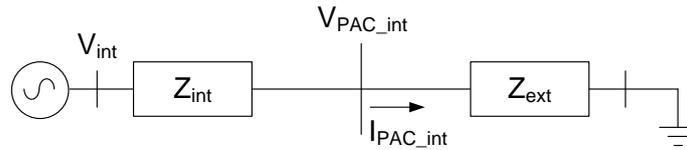


Figura 4: Aplicação do Teorema da Superposição para a obtenção das responsabilidades da nova instalação

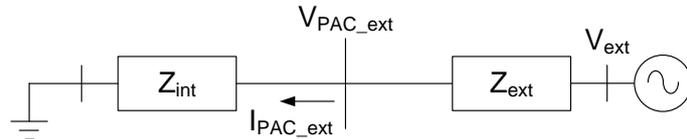


Figura 5: Aplicação do Teorema da Superposição para a obtenção das responsabilidades do SIN

Cumpra que a soma das respectivas componentes fasoriais de tensão e corrente, obtidas na superposição, deve ser igual ao respectivo fasor do circuito composto pelos equivalentes de Thévenin acoplados (Figura 3), isto é :

$$V_{PAC} = V_{PAC_int} + V_{PAC_ext} \quad (5)$$

$$I_{PAC} = I_{PAC_int} - I_{PAC_ext} \quad (6)$$

É importante destacar que o circuito representado pelo equivalente de Thévenin é o dual do circuito representado pelo equivalente de Norton. Portanto, ambos os equivalentes produzem as mesmas distorções no PAC.

4.0- METODOLOGIAS VIGENTES PARA O CÁLCULO DAS RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES NO PAC

A eficácia da metodologia ideal para a obtenção das responsabilidades sobre as distorções harmônicas no PAC, fez com que as metodologias das normas internacionais [2] e [3], utilizadas pelo ONS, tentem imitá-la. Portanto, estas metodologias vigentes também objetivam calcular os equivalentes de Thévenin e/ou de Norton de modo a aplicar o princípio de superposição para determinar as responsabilidades. A seguir serão explicadas as metodologias vigentes considerando os complexos eólicos como as novas instalações. Então, para o caso das “distorções medidas”, o ONS indica utilizar a equação dada em [2]:

$$V_{MED\ h}^{\alpha} = V_{POS\ h}^{\alpha} - V_{PRE\ h}^{\alpha} \quad (7)$$

Onde:

$V_{MED\ h}$ é a distorção de tensão no PAC do harmônico h devida à nova instalação;

V_{posh} é a distorção de tensão no PAC do harmônico h medida após a inserção da nova instalação;

V_{preh} é a distorção de tensão no PAC do harmônico h medida antes da inserção da nova instalação;

$\alpha = 1$, $\alpha = 1,4$ e $\alpha = 2$ são os valores do fator de ponderação para $h < 5$, para $4 < h < 11$ e para $h > 10$, respectivamente.

Comparando (5) e (7), nota-se que a tensão $V_{MED\ h}$ pretende reproduzir o mesmo resultado da tensão V_{PAC_int} da Figura 4. Ou seja, as tensões V_{posh} e V_{preh} de (7) correspondem às tensões V_{PAC} e V_{PAC_ext} de (5), mostradas na Figura 3 e Figura 5, respectivamente. Repare que as medições das tensões (V_{posh} e V_{preh}) são realizadas em épocas diferentes. Portanto, a defasagem angular entre as mesmas é desconhecida. Por isso a equação (7) utiliza o fator de ponderação probabilístico α para considerar esta defasagem.

Uma vez que a tensão V_{posh} equivale à tensão V_{PAC} do modelo ideal, bastaria que a tensão V_{preh} fosse próxima da tensão V_{PAC_ext} para que a tensão $V_{MED\ h}$ também fosse próxima da tensão V_{PAC_int} e assim a responsabilidade da nova instalação sobre a distorção de tensão no PAC estaria corretamente determinada. Mas na prática, seria muito difícil que V_{preh} fosse próxima da tensão V_{PAC_ext} pelos seguintes motivos:

- Enquanto V_{PAC_ext} e V_{PAC} são obtidas em paralelo ao mesmo tempo (Figura 3 e Figura 5), se constata que seria pouco provável que o módulo e o ângulo de V_{preh} se mantivessem invariáveis quando V_{posh} é avaliado.
- Como a tensão V_{preh} é a tensão de Thévenin do SIN (V_{ext} mostrada na Figura 3 e na Figura 5), supondo o item anterior atendido, a proximidade entre V_{preh} e V_{PAC_ext} ocorreria quando a impedância do SIN (Z_{ext}) fosse significativamente menor do que a impedância da nova instalação (Z_{int}), em conformidade com o circuito da Figura 5. Mas verificar esta proximidade na prática seria complicado, pois a obtenção do valor da impedância harmônica do SIN é muito difícil de ser conseguido.

Portanto, os resultados desta metodologia vigente são incertos e imprecisos, podendo impactar significativamente no valor da responsabilidade calculado para a nova instalação.

Para o caso das “distorções simuladas” o ONS utiliza o MLG descrito em [3]. Esta metodologia tenta emular os resultados produzidos pelo circuito da Figura 4 para a pior situação, sendo que a rede da nova instalação deve ser representada pelo seu equivalente de Norton (dual do equivalente de Thévenin). Desta maneira, o MLG objetiva utilizar o equivalente de Norton mais conservador da nova instalação que, conectado ao lugar geométrico (LG) de admitâncias do SIN, produza a máxima distorção harmônica de tensão no PAC.

Uma vez que a rede da nova instalação se mantém praticamente constante durante toda a sua vida útil e que a sua impedância pode ser obtida com precisão satisfatória a partir dos valores dos parâmetros dos equipamentos (linhas de transmissão, transformadores, etc), utilizados para a sua construção, bastaria obter a sua máxima corrente de Norton para poder aplicar o MLG, pois as possíveis impedâncias teóricas futuras do SIN vistas do PAC são fornecidas pelo ONS. Então, no caso de complexos eólicos, segundo [6], deve-se medir as correntes harmônicas de interesse na saída dos terminais de um aerogerador selecionado (feitas no lado de baixa tensão dos respectivos transformadores) para cada parque do complexo eólico avaliado, sendo que estas correntes medidas serão também utilizadas para todos os aerogeradores do respectivo parque, o que implica em também utilizar o mesmo fator de ponderação probabilístico α , de modo a considerar a defasagem angular entre as correntes.

Visto que a impedância da nova instalação é conhecida, conforme já explicado, se deve modelar esta instalação substituindo os transformadores e seus correspondentes aerogeradores (com seus filtros internos), pelas respectivas correntes medidas. Então, a corrente de curto circuito simulada no PAC será a corrente de Norton da nova instalação. Portanto, as máximas correntes medidas nos aerogeradores produzirão a máxima corrente de Norton. Pode-se observar que o cálculo desta corrente de Norton, que por definição deveria ser com a rede da nova instalação isolada do SIN, apresenta as seguintes inconsistências técnicas:

- As correntes medidas sofrem a influência da impedância do SIN.
- As correntes medidas sofrem a influência das correntes oriundas do SIN (correntes de background).

Portanto, para as ‘distorções simuladas’, os resultados também são incertos e imprecisos, podendo impactar significativamente no projeto dos custosos filtros acusados pelo MLG.

5.0- METODOLOGIA PROPOSTA PARA O CÁLCULO DAS RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTRORÇÕES NO PAC

Para poder explicar a metodologia proposta, é fundamental entender o funcionamento dos filtros ativos alocados na média tensão, conforme explicado em detalhe em [4] e [5] e descrito sucintamente a seguir.

Uma nova instalação típica acoplada ao SIN operando no regime permanente (RP) numa frequência (harmônica) específica, pode ser representado pelo equivalente fasorial mostrado na Figura 6, sendo V_C a tensão da barra coletora de média tensão onde o filtro (I_F) foi instalado, I_N a corrente equivalente vista desta barra coletora (corrente de Norton), Z_N a impedância equivalente vista da mesma barra (impedância de Norton), Z_{TR} a impedância do transformador acoplador, V_S a tensão do barramento de alta do transformador da subestação da instalação, Y_{LT} e Z_{LT} a metade da admitância capacitiva e a impedância série da linha de transmissão (LT) principal desta instalação, respectivamente, V_{PAC} a tensão do PAC, TC o transformador de corrente que viabiliza o controle de malha fechada do filtro. Finalmente, Z_{SIN} e V_{SIN} denotam a impedância e a tensão do equivalente de Thévenin do SIN visto do PAC, respectivamente.

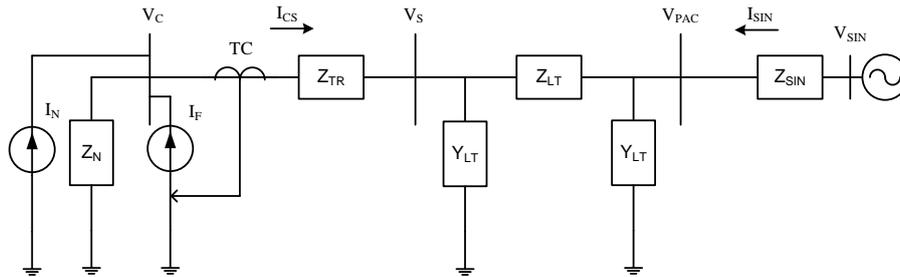


Figura 6: Circuito equivalente com um filtro ativo e com fontes harmônicas na nova instalação e no SIN

A partir deste sistema, é demonstrado detalhadamente em [4] e comprovado no PSCAD em [5] que o filtro ativo atende à equação mostrada em (8):

$$I_F = I_{F1} + I_{F2} = -I_N + \frac{V_S}{Z_N} \quad \text{onde } V_S = V_C \quad (8)$$

sendo I_{F1} e I_{F2} as parcelas da corrente injetadas pelo filtro para compensar as correntes provenientes da nova instalação e do SIN, respectivamente.

A partir desta equação se observa que o filtro ativo isola (considera o “isolamento harmônico”) o ramal coletor de média tensão do resto do sistema ($V_S = V_C \Rightarrow I_{CS} = 0$), e possibilita determinar a corrente de Norton deste ramal (I_N), pois a impedância do ramal coletor Z_N pode ser determinada com precisão satisfatória na etapa de construção da nova instalação e a corrente injetada pelo filtro I_F , juntamente com a tensão $V_S (=V_C)$, podem ser medidas com a mesma referencia angular. Então, para a obtenção das responsabilidades sobre as distorções no PAC, é necessário calcular os equivalentes de Thévenin (ou Norton) vistos desta barra a partir destas grandezas obtidas pelo uso de filtros ativos na média tensão.

No caso das “distorções simuladas”, o equivalente de Norton da nova instalação pode ser obtido sem dificuldades, pois para o cálculo da impedância de Norton basta utilizar seu valor determinado na etapa de construção. Para o cálculo da corrente de Norton, deve-se inserir a fonte de corrente do ramal I_N no circuito da nova instalação de modo a simular o curto circuito no PAC. Note que este circuito equivalente de Norton é o dual do circuito do equivalente de Thévenin (V_{int} e Z_{int}) da metodologia ideal. Desta maneira, bastaria determinar a maior corrente de Norton, obtida a partir da máxima corrente I_N (selecionada do amplo conjunto de medições de I_F e V_S utilizadas juntas com a impedância Z_N na equação (8)), para aplicar o MLG e consequentemente calcular adequadamente as “distorções simuladas”.

Para o caso das “distorções medidas”, a metodologia proposta deveria determinar o equivalente de Thévenin do SIN no PAC para ser análoga a metodologia ideal, pois já foi demonstrado como obter o equivalente de Norton da nova instalação, que corresponde ao dual do circuito equivalente de Thévenin da mesma. Mas na prática, é complicado determinar a impedância harmônica do SIN, pois a mesma sofre a influência de suas próprias fontes harmônicas e varia constantemente ao longo do tempo, inviabilizando sua adequada obtenção. Então, a metodologia proposta se limita a utilizar apenas a tensão de Thévenin do SIN no PAC, conforme explicado a seguir.

A partir do sistema mostrado na Figura 6, o filtro ativo possibilita obter a tensão de Thévenin na barra de alta do transformador V_S , mas a barra de interesse é o PAC. Então, para superar este inconveniente, devemos analisar os sistemas reais. Na prática, a grande maioria das instalações se acoplam ao SIN através de um transformador ou uma LT de pequeno comprimento. Portanto, os caminhos para a terra são de alta impedância, resultando em que os valores de V_S e V_{PAC} sejam muito próximos (note que não há corrente no transformador acoplador devido à

atuação do filtro). Desta maneira, a tensão de Thévenin do SIN no PAC pode ser considerada como sendo igual a tensão V_s . Então, para determinar as responsabilidades, a metodologia proposta permite obter com precisão satisfatória o equivalente de Thévenin da nova instalação e a tensão de Thévenin do SIN, que correspondem respectivamente à tensão V_{int} , a impedância Z_{int} e a tensão V_{ext} da metodologia ideal. Note que com estas grandezas somente é possível determinar as proporções de responsabilidades sobre as distorções de corrente no PAC, pois a partir dos circuitos da Figura 4 e da Figura 5 se obtém a equação (9):

$$\frac{I_{PAC_int}}{I_{PAC_ext}} = \frac{V_{int}}{V_{ext}} \quad (9)$$

que, utilizada em (6), permite obter as proporções de responsabilidade, conforme mostrado na equação (10):

$$I_{PAC_int} = \frac{V_{int}}{(V_{int} - V_{ext})} \times I_{PAC} \quad \text{e} \quad I_{PAC_ext} = \frac{V_{ext}}{(V_{int} - V_{ext})} \times I_{PAC} \quad (10)$$

Observa-se que mesmo desconhecendo a impedância de Thévenin do SIN, pode-se acoplar os respectivos equivalentes de Thévenin, conforme mostrado no circuito da Figura 3. Conseqüentemente, este sistema composto por estes equivalentes acoplados é análogo ao sistema original (sem o filtro ativo) formado pela nova instalação acoplada ao SIN. Portanto, a corrente I_{PAC} pode ser medida no sistema original logo após a remoção do filtro ativo. Substituindo seu valor em (10), determinam-se as correntes I_{PAC_int} e I_{PAC_ext} obtendo-se, desta forma, as responsabilidades sobre as distorções de corrente no PAC. Note que a determinação destes valores de corrente (I_{PAC_int} e I_{PAC_ext}) somente foi possível porque é trivial que o “isolamento harmônico” também é válido para esta situação contrária (do isolamento para o acoplamento).

Uma vez obtidos os valores destas correntes (I_{PAC_int} e I_{PAC_ext}) e considerando que o valor de Z_{int} pode ser calculado com razoável precisão, os valores das outras grandezas relevantes (V_{PAC_int} , V_{PAC_ext} e Z_{ext}) também podem ser calculadas a partir do circuito da Figura 5 e da equação (5). Portanto, foi demonstrada a eficácia da metodologia proposta para o cálculo das responsabilidades dos sistemas da nova instalação e do SIN sobre as distorções de tensão e corrente no PAC.

Destaca-se que a metodologia proposta produz resultados próximos aos da metodologia descrita em [7] (que utiliza filtros passivos no PAC), pois trata-se de metodologias duais. No entanto, a metodologia proposta é muito mais prática, uma vez que a flexibilidade dos filtros ativos permite avaliar as responsabilidades para todos os harmônicos de interesse em momentos diferentes, ao contrário da apresentada em [7], onde é necessário um filtro passivo para cada harmônico de interesse. Além disso, como os filtros ativos são equipamentos que lidam com correntes, via de regra, a potência requerida é reduzida em relação a dos filtros passivos e, conseqüentemente, seus custos. Repare que o principal inconveniente da metodologia proposta, apesar de ter sido contornado neste trabalho satisfatoriamente, é a atuação dos filtros ativos na média tensão no lugar de atuar no PAC.

6.0- RESULTADOS

O caso exemplo escolhido para comparar o desempenho das metodologias descritas neste trabalho, trata sobre um complexo eólico (CE) real de 50 MW (25 aerogeradores de 2 MW cada) conectado ao SIN, cujos parâmetros estão indicados na Figura 7. O motivo de utilizar este caso como exemplo, foi porque as medições das tensões harmônicas no PAC, realizadas com ambos os sistemas operando, acusaram um elevado conteúdo de 5º harmônico (acima do limite de 2% do ONS). Portanto, os resultados deste trabalho lidam apenas com o 5 h .

De modo a tornar compatíveis as comparações entre as metodologias, mantendo-se aproximadamente o mesmo desempenho real destes sistemas envolvidos nas simulações, foram reduzidos os valores das correntes máximas medidas nos terminais dos aerogeradores (magnitudes de correntes muito parecidas denotadas na Figura 7 como TC1, TC2, TC3, ..., TC17, etc.) em 35%, pois assim se evitou o uso de diferentes ângulos para as correntes (consideradas com ângulos nulos) e se evitou o uso do fator de ponderação α , característico da metodologia vigente, para as “distorções simuladas”. Note que para retratar (aproximadamente) o comportamento real deste sistema, os resultados das simulações devem ser próximos aos das medições mostradas na Figura 8, e a aplicação das metodologias vigentes e proposta não devem utilizar a impedância do SIN, embora seja necessária para as simulações. Então, também para este propósito, a impedância do SIN (Figura 7), obtida do Caso Base 2015 LEVE disponibilizada pelo ONS, foi ajustada. A comprovação da coerência entre as medições e as simulações pode ser verificada comparando-se a Figura 8 com a Figura 9.

Ressalta-se que devido à dimensão deste CE, as correntes nas saídas dos inversores dos aerogeradores foram modeladas por fontes de corrente (correntes de $0,034155 \times 10^{-3}$ pu com fase nula, calculadas para retratar as correntes dos TCs), conforme mostrado na Figura 7. Esta modelagem é precisa quando os sistemas envolvidos estão operando em regime permanente (RP). Porém, é imprecisa quando o ponto de operação de RP se modifica, o que significa que outros valores para as fontes de corrente deverão ter que ser utilizados. Desta maneira, os valores destas fontes utilizados nas simulações foram modificados corretamente, conforme explicado a seguir, para atender os respectivos pontos de operação de RP verificados nas análises.

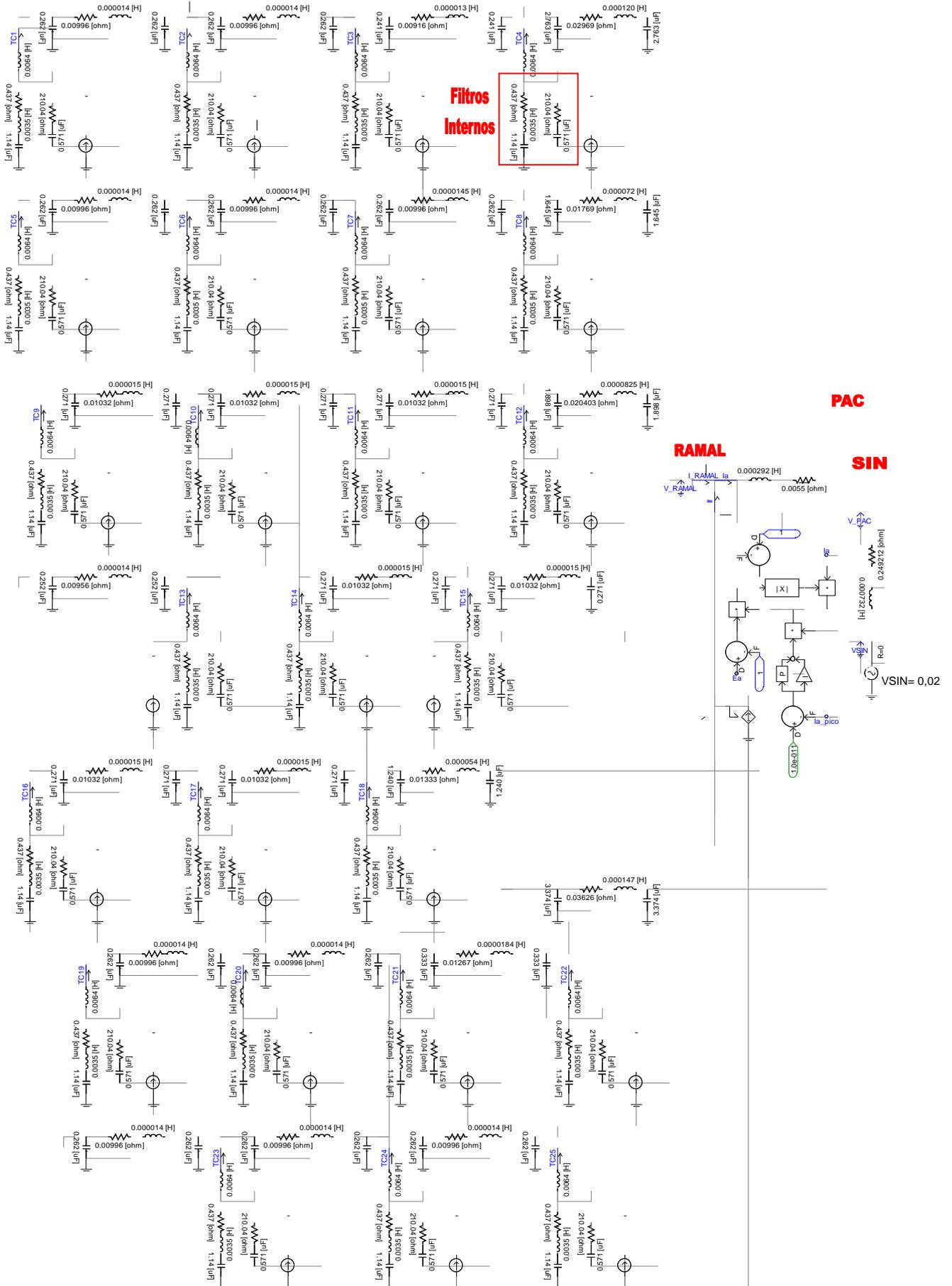


Figura 7: Circuito modelado no PSCAD (5h) composto pelo complexo eólico exemplo acoplado ao SIN

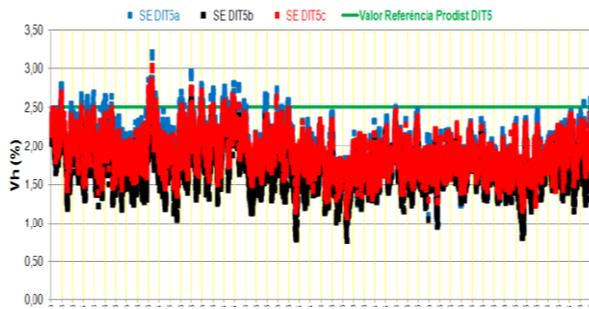


Figura 8: Medições reais da tensão de 5h no PAC realizadas em 51 dias consecutivos (Gráfico: Dias X V5h(%))

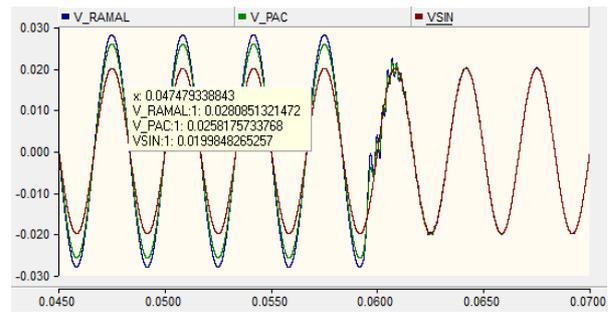


Figura 9: Curvas que comprovam a similaridade entre medição e simulação antes da operação do filtro ativo em $t=0,058$ s (Gráfico: $t(s)$ X V5h(pu))

Para atender ao “isolamento harmônico” (característico das metodologias ideal e proposta - Figura 10), sabendo que os conversores dos aerogeradores do CE são conversores fontes de tensão (VSC – full converter), foi determinado por tentativa e erro o valor da fonte de tensão que modela uma das máquinas (o resto em aberto) de modo que gere os mesmos resultados produzidos, neste mesmo sistema, pela respectiva fonte de corrente (o resto de fontes estão desligadas). Assim, quando o ponto de operação de RP mudou, conhecemos a nova corrente na saída do inversor do aerogerador (corrente na fonte de tensão). Então, esta nova corrente foi replicada no resto dos inversores, pois o comportamento (módulo) dos mesmos é muito similar, conforme nos CEs reais. Note que esta similaridade foi comprovada por meio de simulações feitas para outras máquinas. Desta maneira, é importante esclarecer que a partir do instante do acionamento do filtro ativo ($t=0,058$ s), mostrado da Figura 9 a até Figura 12, os valores das fontes de corrente foram modificados ($\text{mod} = 0,036455 \times 10^{-3}$ e $\text{ang} = 0$) para atender o novo ponto de operação forçado pelo “isolamento harmônico” entre o ramal coletor do CE e o resto do sistema.

De modo a verificar a eficácia da metodologia proposta, também foi calculada a corrente de Norton no ramal coletor pela metodologia ideal, conforme mostrado na Figura 11.

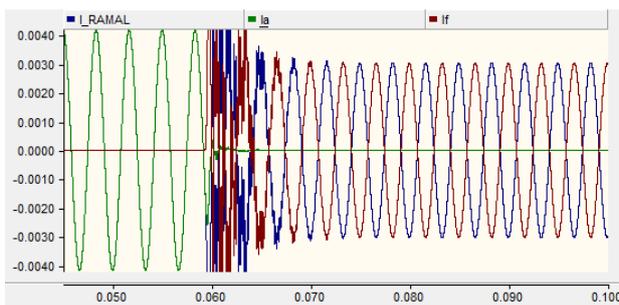


Figura 10: Comprovação do “isolamento harmônico” ($I_a=0$) produzido pelo filtro ativo (Gráfico: $t(s)$ X I(pu))

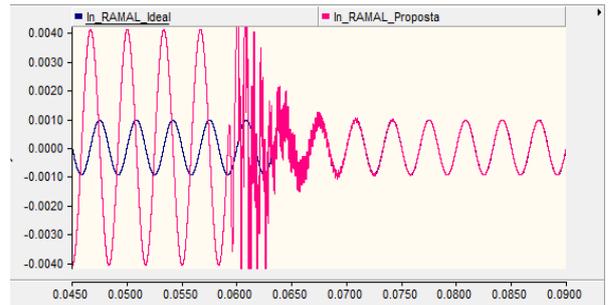


Figura 11: Comparação das correntes de Norton no ramal coletor (Gráfico: $t(s)$ X I_n Ramal (pu))

Para determinar a corrente de Norton no PAC pela metodologia vigente, necessária para a obtenção das “distorções simuladas”, as correntes nos terminais de cada sistema de geração do CE (correntes dos TCs mostradas na Figura 7) foram substituídas pelas fontes de corrente de valor $9,9 \times 10^{-5}$ pu com ângulo 0, em conformidade com as correntes lidas por estes TCs (Figura 12) e com o procedimento descrito no item 4.0. Também foram realizados os respectivos procedimentos das metodologias ideal e proposta para calcular esta corrente de Norton, cujas comparações estão mostradas na Figura 13, onde se verifica que a metodologia vigente produz uma corrente muito superior (2,5 vezes) às geradas pelas metodologias ideal e proposta (visualmente coincidentes), impactando significativamente no projeto do filtro.

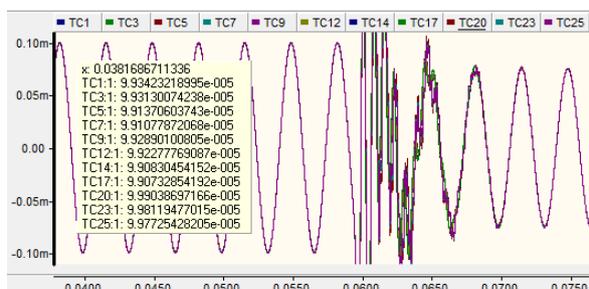


Figura 12: Correntes lidas nos TCs dos terminais dos aerogeradores (Gráfico: $t(s)$ X $I_{TCs}(pu)$)

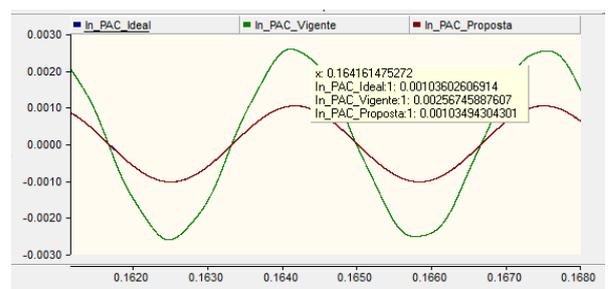


Figura 13: Comparação entre as correntes de Norton no PAC (Gráfico: $t(s)$ X $I_n(pu)$)

Além destas correntes de Norton no PAC, a aplicação destas metodologias neste sistema exemplo, permitiu a obtenção e/ou utilização das grandezas de interesse mostradas na Tabela 1, as quais foram utilizadas para a determinação das responsabilidades sobre as distorções no PAC mostradas na Tabela 2.

Tabela 1: Subsídios para o cálculo das responsabilidades especificadas pelas metodologias analisadas

Grandeza	Metod. Ideal (pu)	Metod. Proposta (pu)	Metod. Vigentes (pu)
Z_{ext}	mod = 1,401853 ang = 79,760	supõe-se desconhecida	supõe-se desconhecida
V_{ext}	0,02	0,02	0,02
Z_{int}	mod = 6,318440 ang = -87,165	mod = 6,318440 ang = -87,165	mod = 6,318440 ang = -87,165
I_{int} (I_{norton_PAC})	mod = 0,001036 ang = -0,183	mod = 0,001035 ang = -0,183	mod = 0,002565 ang = -0,321
$V_{int} = Z_{int} \times I_{int}$	mod = 0,006547 ang = -86,982	mod = 0,006536 ang = -87,348	Não é utilizada
V_{PAC} (sistemas conectados)	Não é utilizada	mod = 0,025843 ang = 0	mod = 0,025843 ang = 0
I_{PAC} (sistemas conectados)	Não é utilizada	mod = 0,004167 ang = -79,277	Não é utilizada

Tabela 2: Valores das responsabilidades sobre as distorções no PAC (projeções nos vetores V_{PAC} e I_{PAC})

Grandeza	"Distorções Medidas" (pu)					
	Metod. Ideal	Resp.	Metod. Proposta	Resp.	Metod. Vigentes	Resp.
V_{PAC_int}	mod = 0,001846 ang = 75,906	1,74%	mod = 0,002184 ang = 75,284	2,15%	mod = 0,010975	42,47%
V_{PAC_ext}	mod = 0,025456 ang = -4,033	98,26%	mod = 0,025376 ang = -4,775	97,85%	Não é utilizada	57,53%
I_{PAC_int}	mod = 0,001317 ang = -3,841	7,95%	mod = 0,001312 ang = -4,958	8,51%	Não é utilizada	-
I_{PAC_ext}	mod = 0,004042 ang = 82,341	92,05%	mod = 0,004016 ang = 82,390	91,49%	Não é utilizada	-
Grandeza	"Distorções Simuladas" para o pior cenário do SIN (MLG) $Z_{ext} = 1,1404 + 6,1709i$					
	Metod. Ideal		Metod. Proposta		Metod. Vigentes	
V_{PAC_int}	2,81 % filtro passivo de 0,45 Mvar		2,81 % filtro passivo de 0,45 Mvar		6,97 % filtro passivo de 0,90 Mvar	

A partir destas tabelas, se verifica uma expressiva diferença entre os resultados produzidos pelas metodologias vigentes e os produzidos pelas metodologias ideal e proposta, que são muito próximos. Repare que esta diferença se manifesta em medidas injustas como a retirada de operação de 12 dos 25 aerogeradores, enquanto o filtro de 0,90 Mvar (custo aproximado de 400 mil reais) não foi instalado, conforme indicado em [1]. Para as metodologias ideal e proposta podem operar todos os aerogeradores até a instalação do filtro de 0,45 Mvar, cujo custo é aproximadamente 200 mil reais (50% mais barato).

7.0- CONCLUSÃO

Neste trabalho foram comparados os desempenhos, através de simulações, das metodologias ideal, vigentes e proposta que objetivam determinar as responsabilidades sobre as distorções no PAC. Para este propósito, estas metodologias foram aplicadas a um sistema real exemplo, composto por um complexo eólico conectado ao SIN, onde se verificou que os resultados produzidos pelas metodologias vigentes são bastante diferentes (distorções muito acima) dos produzidos pela metodologia ideal, implicando no sobredimensionamento do filtro, enquanto que os resultados da metodologia proposta são muito próximos aos da ideal, indicando ser potencialmente apta para seu uso em sistemas reais.

8.0- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS NT 009/2016 – REV.01 "Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos novos acessos à Rede Básica para parques eólicos, solares e consumidores livres", Abril de 2016.
- [2] CIGRÉ 468 "Review of Disturbance Emission Assessment Techniques, Working Group C4.109", Junho de 2011.
- [3] IEC PAS 62001 "Guide to the specification and design evaluation of a.c. filters for HVDC systems", Julho de 2004.
- [4] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio, Cristiano de Oliveira Costa, Octávio Augusto da Cunha e Renato Campos Amaral "Metodologia para Redução de Tensões Harmônicas em Redes Elétricas Utilizando Filtros Ativos na Média Tensão", XXIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz de Iguaçu – PR, de 18 a 22 de Outubro de 2015.
- [5] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio, Cristiano de Oliveira Costa, Octávio Augusto da Cunha e Renato Campos Amaral "comprovação filtros ativos PSCAD", XXIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – PR, a ser publicado em 22 a 25 de Outubro de 2017.
- [6] IEC 61400-21, "Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines", 2008.
- [7] Andréia Crico dos Santos, José Carlos de Oliveira e Ivan Nunes Santos "Análise de Desempenho das Principais Metodologias Para o Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas", XXIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz de Iguaçu – PR, de 18 a 22 de Outubro de 2015.