



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

CB/GDS/26

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - X**

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

**AS DIFICULDADES ENFRENTADAS NO PROJETO DE FILTROS FRENTE ÀS  
BAIXAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS PROVOCADAS PELOS PARQUES EÓLICOS**

**Miguel P. De Carli (\*)  
ELETROSUL  
Breno T. Meyer  
ELETROSUL**

**Ricardo Antunes  
ELETROSUL  
Ricardo S. Salengue  
ELETROSUL**

**Orlando J. Rothstein  
ELETROSUL  
Rafael T. Carvalho  
ELETROSUL**

**RESUMO**

Este Informe Técnico (IT) apresenta as dificuldades enfrentadas para a definição de soluções de compensação reativa e filtragem harmônica para a redução das distorções de tensão provocadas pelos parques eólicos. Para isso, o IT apresenta brevemente a metodologia e o processo de avaliação do desempenho harmônicos dos parques eólicos e as dificuldades enfrentadas para a definição de soluções factíveis e de menor impacto operacional. Por fim, é apresentado um estudo de caso onde se demonstra, através de medições e análises das distorções em diversas condições sistêmicas, que o problema de elevação das distorções pelos parques eólicos aparentemente não existe ou é secundário em relação às distorções pré-existentes.

**PALAVRAS-CHAVE**

Harmônicos, Qualidade de Energia, Aerogeradores, Filtros, Distorção de Tensão.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A participação da energia eólica na matriz energética brasileira tem crescido de forma expressiva desde o lançamento do Proinfa. De acordo com ABEEólica, o Brasil já possui mais de 400 parques instalados totalizando aproximadamente 11 GW e, segundo o PDE 2024, a previsão é que a capacidade instalada eólica no país alcance 24 GW até 2024.

A inserção de aerogeradores no sistema, assim como outras fontes não lineares, pode causar impactos na qualidade de energia elétrica, principalmente relacionados à distorção harmônica de tensão. Em função disto, o ONS exige que os acessantes realizem diversos estudos para verificar a influência de seu empreendimento no sistema. Em um destes estudos, o acessante deve comprovar, seguindo metodologia exigida pelo ONS, que a distorção harmônica de tensão gerada pelo seu parque no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) atende aos limites estabelecidos nos Procedimentos de Rede (PR).

A aplicação desta metodologia, conforme exigências do ONS, tem obrigado mais de 50 % dos empreendimentos eólicos do Brasil, a instalarem filtros para se adequarem aos limites de distorção (1). Este percentual, segundo fabricantes de aerogeradores, é altíssimo e não verificado em outros sistemas, onde em poucos casos as eólicas *onshore* precisam de filtragem harmônica. Ocorre ainda, que, na maioria dos casos, a necessidade de filtros verificada em estudos não é confirmada nas medições, quando se comparam as distorções pré e pós entrada em operação dos parques, conforme relatam diversos associados da ABEEólica.

Não bastasse a necessidade de instalação de um equipamento, que poderia ser considerado desnecessário, a Eletrosul tem verificado que seu projeto, implantação e operação podem ser altamente complexos. Tal complexidade advém dos seguintes fatos: prazos para a realização dos diversos estudos necessários,

(\*) Rua Dep. Antônio Edu Vieira, n° 999 - Pantanal – DES – CEP 88040-901 - Florianópolis – SC – Brasil  
(+55 48) 3231-7166 – Email: mcarli@eletrosul.gov.br

especificação, projeto e implantação considerando as incertezas de informação, de forma a permitir a entrada do parque em operação já com os filtros; necessidade de coordenação de estudo de desempenho harmônico, requisitos e limitações de potência reativa, avaliação das dimensões físicas dos equipamentos; limitações de área para instalação em subestações existentes e custos envolvidos.

Neste sentido, o IT apresentará algumas das dificuldades enfrentadas pela Eletrosul em projetos de filtros, bem como eventuais problemas operativos que podem ocorrer. Em função das baixas distorções provocadas, serão apresentadas medições contínuas das distorções observadas no PAC de um complexo eólico em um período de aproximadamente 2 anos. Tais medições serão avaliadas através de análises gráficas e estatísticas das ordens harmônicas de interesse em conjunto com a potência despachada pelos parques, incluindo cenários de rede degradada e em desligamentos do parque. Os resultados dos estudos serão confrontados com tais medições, evidenciando o elevado grau de conservadorismo dos critérios de estudos impostos pelo ONS.

Por fim, vale destacar que o assunto deste IT tem sido tema de amplo debate em grupo de trabalho composto pelos associados da ABEEólica e ONS, bem como no grupo técnico GT C4.03 BR do Cigré-Brasil, no entanto, até o momento, a experiência internacional e evidências técnicas não tem sido suficientes para demover o ONS de sua postura conservadora, haja vista a revisão aprovada dos PR (2).

## 2.0 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HARMÔNICO DOS PARQUES EÓLICOS

Os estudos para avaliação do desempenho harmônico de parques eólicos devem ser realizados conforme definições do ONS em (2) e (3), documentos que substituíram (4). Nestes estudos, o acessante deve demonstrar que as distorções de tensão provocadas pelo seu empreendimento no PAC respeitam os limites de distorção harmônica definidos no Submódulo 2.8 dos PR, caso contrário, filtros devem ser instalados a fim de reduzir as distorções até os valores permitidos. Para avaliação dos impactos provocados por um agente nas distorções de tensão, devem ser utilizados os limites individuais de tensão harmônica, da 2ª a 50ª ordem, bem como o indicador DTHTS95%.

### 2.1 Estudo de desempenho harmônico - metodologia do lugar geométrico

A metodologia requerida pelo ONS para a realização de estudos de distorção de tensão é baseada no procedimento clássico de projeto de filtros para sistemas HVDC, conforme IEC 62001 (5). Para o caso dos parques eólicos, o circuito apresentado na Figura 1a considera uma fonte de corrente harmônica de Norton constante  $I_h$ , que representa a injeção harmônica dos aerogeradores, em paralelo com a impedância da rede interna do parque  $Z_{Ih}$  e com a impedância da rede externa  $Z_{Eh}$  representada por um Lugar Geométrico (LG). A Figura 1b apresenta um exemplo de LG no plano das admitâncias e a soma dos vetores  $Y_{Ih}$  e  $Y_{Eh}$ .

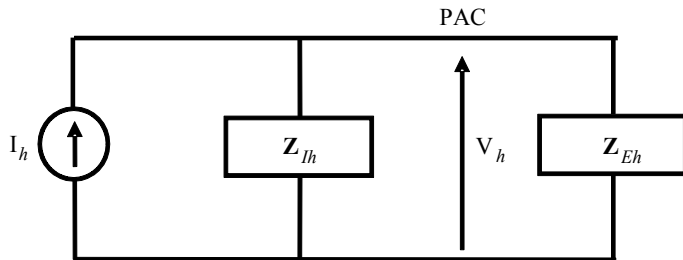


Figura 1a – Equivalente de Norton utilizado para o cálculo das distorções de tensão no PAC

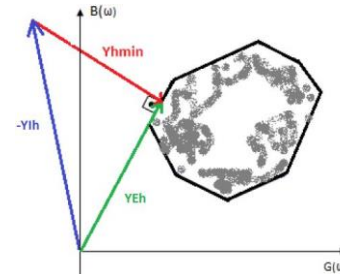


Figura 1b – Polígono de n Lados representativo de  $Y_{Eh}$

A máxima distorção de tensão  $V_h$ , de cada ordem harmônica, é obtida minimizando o módulo da soma vetorial das admitâncias  $Y_{Ih}$  e  $Y_{Eh}$  na Equação 1. Os níveis de distorção assim obtidos são comparados com os limites individuais, concluindo-se sobre o desempenho harmônico do acessante.

$$V_h = \frac{I_h}{|Y_{Ih} + Y_{Eh}|} = \frac{I_h}{|Y_{hmin}|} \quad (1)$$

Até a divulgação de (2) e (3) o ONS permitia que os LG fossem representados por diversas formas geométricas que envolvessem os pontos de impedância calculados para cada harmônica e os LG sempre deveriam incluir as impedâncias calculadas para os harmônicos adjacentes à ordem em estudo, ou seja,  $h \pm 1h$ . Recentemente, nas novas normativas, nos estudos para as eólicas devem ser utilizados apenas LG do tipo Setor Anular ou Polígonos de n Lados para cada ordem harmônica, considerando na formação do LG as impedâncias correspondentes às ordens harmônicas  $h-0,5$ ,  $h$  e  $h+0,5$  com passo de  $\pm 0,1$  de  $h$  ou  $\pm 6$  Hz.

Cabe ressaltar que esta metodologia não representa um consenso internacional para a análise da influência dos parques eólicos nas distorções de tensão, haja vista uma pesquisa, realizada no âmbito do GT ONS/ABEEólica (6), que revelou que na análise de 10 códigos de rede de diferentes países, somente o Brasil e o Canadá requerem o uso desta metodologia em seus procedimentos. Ademais, a recente exigência de inclusão de impedâncias de inter-

harmônicas de 6 em 6 Hz em cada LG é um procedimento inédito e não tem registro em referências técnicas. Na visão dos autores, estes são os principais motivos da grande necessidade de filtros para as eólicas brasileiras.

## 2.2 Medições de tensões e correntes harmônicas

Além das simulações, é solicitado que o novo acessante efetue medições de distorções harmônicas de tensão no PAC antes e após a entrada em operação dos empreendimentos de forma a verificar sua influência no nível de distorção. É também necessária uma etapa de medição das correntes harmônicas nos terminais dos aerogeradores seguindo os procedimentos da norma NBR IEC 61400-21 (7) para confrontação com as fornecidas pelos fabricantes para eventualmente reavaliação dos estudos e/ou reprojeção dos filtros.

## 2.3 Possíveis restrições ao despacho dos parques eólicos

Neste processo de avaliação do desempenho harmônico os parques podem ficar expostos a sofrer restrições operativas. Nas normativas anteriores, se o estudo apontasse a necessidade de filtros, mas sua instalação não ocorresse até a entrada em operação, o acessante poderia solicitar ao ONS entrar em operação sem os filtros instalados, mas condicionando-se a desligar um determinado número de máquinas previamente definido em estudo, no caso de as distorções de tensão medidas no PAC superarem os limites globais inferiores. Recentemente esta regra foi revista por proposição da ABEEólica e diz, resumidamente, que o desligamento de parques que necessitam da instalação de filtros é feito pela comparação da diferença das medições pré e pós parque com os limites individuais de distorção.

Cabe ressaltar que, embora medições e simulações tenham caráter complementar, o ONS prioriza os resultados dos estudos para a avaliação do desempenho dos parques e a decisão sobre a necessidade de filtros.

## 3.0 - PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROJETO E OPERAÇÃO DOS FILTROS

Nesta seção, serão apresentados problemas e dificuldades relacionados à definição da solução de filtragem harmônica para parques eólicos, cujo estudo pode ser dividido basicamente em duas etapas: a avaliação do desempenho e a definição das capacidades nominais. A avaliação do desempenho consiste em calcular as distorções de tensão resultantes da aplicação de uma determinada configuração de filtros. Após o cálculo do desempenho, são definidas as capacidades nominais dos filtros com base nas máximas correntes e tensões impostas em seus elementos. Este processo normalmente é iterativo e complexo devido às diversas questões que devem ser observadas no projeto, conforme seguem:

- o ONS exige que o parque entre em operação com filtros projetados com base em um estudo realizado com um extrato certificado fornecido pelo fabricante do aerogerador. Os prazos envolvidos e as incertezas de informações na implantação do parque impedem que isto seja feito respeitando as boas práticas da engenharia. Depois da entrada em operação o estudo deve ser reavaliado com correntes medidas no parque e se necessário deve-se instalar mais filtros, ou constatar que o montante de filtros instalado é desnecessário;
- a solução de filtragem deve atender os limites de distorção, requisitos de potência reativa em potência nominal ( $FP=0,95$  indutivo e capacitivo) e nula em condições de *cut-in* ( $FP=1$ ), o que pode demandar a necessidade de instalação de capacitores e reatores adicionais; deve respeitar limites de variação de tensão no ponto de acoplamento durante o chaveamento dos equipamentos, o que pode requerer que os filtros sejam conectados em diversos bays, requisitos de perdas agregadas pela solução;
- a potência reativa total da solução de filtragem e compensação de reativos tem sido da ordem de 20 a 30 % da potência ativa instalada no parque, o que na maioria das vezes obriga a modularização dos filtros. Em alguns casos, devido à potência elevada da ilha de filtros ela não pode ser conectada no lado de baixa do transformador elevador de um parque, pois juntamente com a potência ativa pode provocar a sobrecarga do transformador;
- posteriormente à definição dos parâmetros dos filtros, devem ser definidas as suas capacidades nominais de regime contínuo dos elementos que compõem cada filtro, preferencialmente utilizando as distorções pré-existentes no PAC do parque, as quais para alguns casos podem ser elevadíssimas. Eventualmente este estudo pode exigir uma reavaliação da solução de filtragem e até mesmo o sobredimensionamento dos equipamentos em função das distorções presentes na rede;
- algumas soluções, principalmente, com filtros sintonizados em tensões mais elevadas como em 230 kV podem resultar em baixas potências por filtro, o que resulta em reatores com dimensões incomuns, quase proibitivas técnica e economicamente, especialmente para baixas ordens. Por outro lado, o efeito das dissintonias e variações de frequência podem exigir elevadas potências para que os filtros sintonizados tenham desempenho adequado;
- os estudos de transitórios eletromagnéticos são realizados após os anteriores e podem demandar alguns meses de execução, mas são fundamentais para a definição das capacidades transitórias e avaliação do impacto dos filtros nos equipamentos existentes e definidos por projeto executivo na fase de implantação dos parques. Adicionalmente, equipamentos como disjuntores e para-raios podem requerer características especiais em função das características radiais dos parques e do acréscimo de potência reativa dos filtros. A inserção de filtros também eleva o risco de autoexcitação de determinados modelos de aerogeradores e sua correta previsão e mitigação nos estudos depende de modelos adequados não disponibilizados pela grande maioria dos fabricantes.

- dificuldades de previsão de área e número de vãos de conexão de equipamentos nos estudos iniciais;
- problemas operativos, como a elevação e dificuldades de controle da tensão, necessidade de adoção de esquemas especiais e geração de possíveis ressonâncias com consequente elevação das distorções em barras próximas ao ponto onde o filtro é instalado.

Considerando o exposto acima, os custos envolvidos em um projeto de filtros são imprevisíveis e elevados, podendo comprometer a rentabilidade dos agentes de geração, elevar os preços praticados nos leilões e resultar em penalizações indevidas ao agente gerador.

#### 4.0 - ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste IT é realizado em um complexo eólico composto por 27 parques localizados no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, os quais entraram em operação gradativamente, conforme segue: os de Geribatu de 30/01/15 à 24/02/15, os de Chuí de 22/04/15 à 20/06/15, Chuí 9 de 22/08/15 à 21/10/15 e os de Hermenegildo de 15/10/15 à 15/01/16. A conexão destes parques ao sistema elétrico é realizada via dois transformadores 525/230 kV na SE 525 kV Santa Vitória do Palmar 2 (SPA2), conforme mostrado na Figura 2.

Nos parques eólicos de Geribatu e Chuí, conectados ao PAC através do TF 3 da SE SPA2, estão instalados 211 aerogeradores do tipo DFIG, sendo 201 aerogeradores com potência nominal de 2,0 MW de um fabricante e outros 10 aerogeradores com potência nominal de 1,79 MW de outro fornecedor. Já nos parques de Hermenegildo existem 91 aerogeradores do tipo DFIG com potência nominal de 1,79 MW, os quais se conectam ao PAC através do TF 4 da SE. Desta forma o complexo eólico tem uma potência instalada de 582,8 MW.

Os estudos de avaliação das distorções e projeto de filtros apresentados neste estudo de caso são relativos à conexão dos parques de Geribatu e Chuí, no entanto, as medições realizadas após a entrada em operação de Hermenegildo incluem também a influência deste complexo.

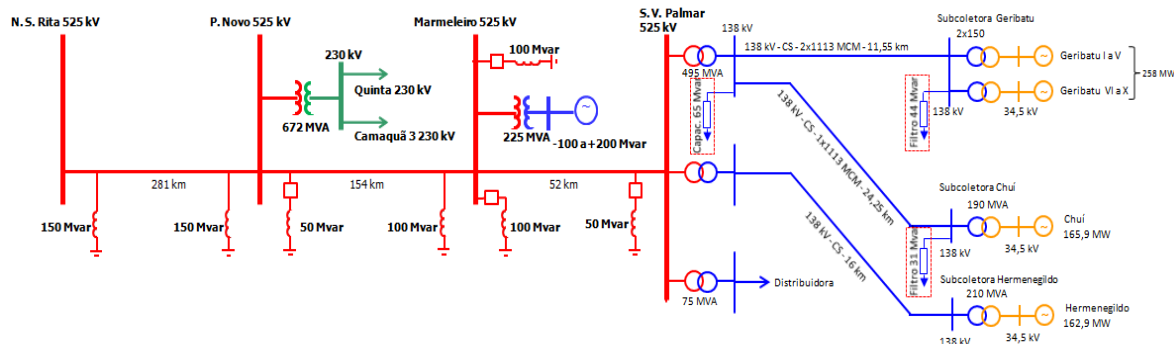


Figura 2 – Esquemático simplificado do complexo eólico e rede externa

#### 4.1 Estudos de avaliação das distorções

Na época da solicitação de acesso dos parques eólicos de Geribatu e Chuí a Eletrosul elaborou um primeiro estudo de avaliação das distorções provocadas pelos parques seguindo critérios que entendia serem mais adequados para a representação da impedância harmônica da rede (LG sem a obrigatoriedade de inclusão das ordens adjacentes) e para a agregação das correntes harmônicas provenientes de todos os aerogeradores, os quais tinham com referências os documentos (5) e (8). Neste estudo constatou-se que os parques poderiam operar em sua totalidade sem violar os limites de distorção previstos nos PR, exceto por uma violação marginal que poderia ocorrer para a 7ª ordem harmônica, como mostrado na Tabela 1 em Metodologia Otimizada.

O ONS não aceitou os critérios da Eletrosul e solicitou que o estudo fosse reavaliado utilizando a metodologia definida em (4), com as regras vigentes à época. Desta forma, a Eletrosul realizou medições das correntes harmônicas em, pelo menos, um aerogerador de cada parque eólico, atualizou as informações das redes interna e externa e reavaliou as distorções provocadas pelos parques de Geribatu e Chuí, resultando nas distorções mostradas na Tabela 1 em Metodologia ONS ( $h \pm 1h$ ). Para reduzir as distorções calculadas aos níveis permitidos nos PR foi necessário a Eletrosul desenvolver uma solução de filtragem, como descrito na seção seguinte.

Apenas a título informativo e para comparação com as medições posteriores, utilizando o novo critério de definição dos LG (2) e (3) utilizando polígonos de  $n$  lados os resultados das distorções seriam muito semelhantes aos obtidos no estudo anterior que definiu a necessidade de filtros, como mostrado na Tabela 1 em Polígonos  $n$  lados.

Tabela 1 - Distorções harmônicas obtidas em estudos

Metodologia	Vh (%)						
	2	3	4	5	6	7	DTHT
Otimizada	0,30	0,44	0,00	0,35	0,00	0,68	0,87
ONS ( $h \pm 1h$ )	0,66	1,34	0,72	0,70	0,08	0,90	1,82
Polígonos $n$ lados	0,42	1,79	0,53	0,38	0,08	0,86	2,14

#### 4.2 Solução de filtragem harmônica e compensação de reativos

Para atender os requisitos de potência reativa e variação de tensão listados na Seção 3, a solução de filtragem deveria ter no mínimo 127 Mvar e no máximo 150 Mvar (ou precisaria também de reatores) e ser modularizada em “ilhas” de no máximo 75 Mvar. Com isto, a solução inicialmente vislumbrada, de instalação de todos os equipamentos no setor de 138 kV da SE SPA2, não se viabilizaria devido à dificuldades de arranjo eletromecânico e pela necessidade da instalação de no mínimo dois novos bays.

Assim, iniciou-se a busca de uma solução com equipamentos distribuídos nos setores de 138 kV das SE Geribatu, Chuí e SPA2. Para as SE Geribatu e Chuí, as máximas potências reativas que podem ser chaveadas de forma a não provocar variações de tensão superiores a 5 %, são respectivamente, 44 e 31 Mvar. Após diversas iterações, na busca de uma configuração de filtros que atendessem os requisitos estabelecidos definiu-se como solução a instalação de um banco de capacitores de 65 Mvar no setor de 138 kV da SE SPA2 e de filtros com a configuração Tipo C nos setores de 138 kV das SE Geribatu e Chuí. O filtro de Chuí ficou com potência de 31 Mvar, fator de qualidade 2 e sintonizado em 155 Hz e o filtro de Geribatu ficou com 44 Mvar, sintonizado em 120 Hz e fator de qualidade 1,5. Posteriormente à definição da solução de filtragem, definiu-se que a compensação do efeito capacitivo da rede interna do complexo eólico quando em geração nula, aproximadamente 27 Mvar, seria atendida pela habilitação de funcionalidade própria dos aerogeradores para geração/absorção de reativos (136 x 200 kvar).

#### 4.3 Análise de medições

Nesta seção são apresentadas análises das distorções medidas no PAC do complexo eólico em diversas condições sistêmicas com o intuito de avaliar se o empreendimento contribui efetivamente para a elevação das distorções. Algumas das análises são baseadas em técnicas propostas na Brochura Técnica 468 do Cigré. É importante ressaltar que até o momento da realização das medições apresentadas nem os filtros nem o banco de capacitores haviam sido instalados.

##### 4.3.1 Comparação das medições pré e pós parque

As medições antes da entrada em operação dos parques foram realizadas do dia 14 de dezembro de 2014 até o dia 05 de janeiro de 2016 no PAC do complexo eólico. É importante ressaltar que neste período a LT 525 kV Povo Novo – Nova Santa Rita ainda não havia entrado em operação e o TF 1 da SE SPA2, dedicado à distribuidora, entrou em operação durante as medições, no dia 19 de dezembro. Visualmente não é possível identificar algum efeito significativo da entrada em operação do transformador nas medições apresentadas na Figura 3.

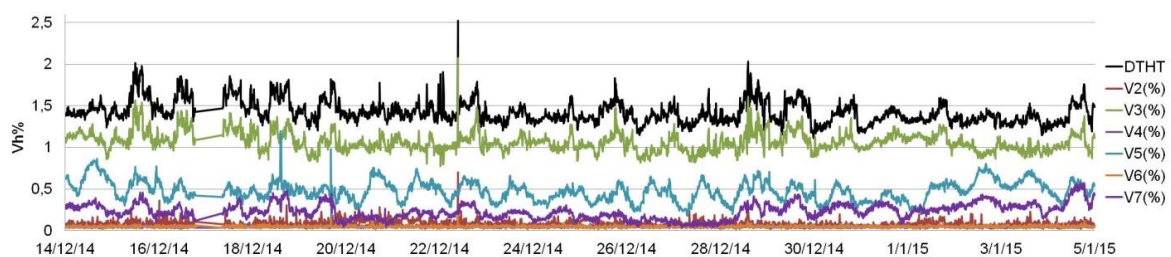


Figura 3 – Medições das distorções antes da entrada em operação dos parques

As medições de tensão harmônica no PAC após a entrada em operação do complexo eólico vêm sendo realizadas de forma contínua desde o início da entrada dos parques em operação em 29 de janeiro de 2015. Para as análises estatísticas das medições e para os gráficos foram utilizadas informações desde a data de entrada em operação até 3 de dezembro de 2016. As Figuras 4a e 4b apresentam, conforme definido no submódulo 2.8 dos PR, o percentil 95 (P95%) das medições das distorções integralizadas em períodos de 10 minutos obtidos para cada dia no período citado acima. Na Figura 4a é possível observar que as distorções de 2ª, 4ª e 6ª ordens medidas durante quase dois anos de monitoramento estão bem abaixo do limite global inferior e também abaixo do limite individual. A Figura 4b também demonstra que as distorções de 3ª, 5ª e 7ª ordens respeitam o limite global inferior durante o período de monitoramento. Além disto, é possível observar uma elevação abrupta da 7ª ordem no início do gráfico e uma tendência de redução da distorção de 3ª ordem ao longo do período. É importante lembrar que as medições pós-parque são compostas pelas distorções provenientes da rede e dos parques eólicos.

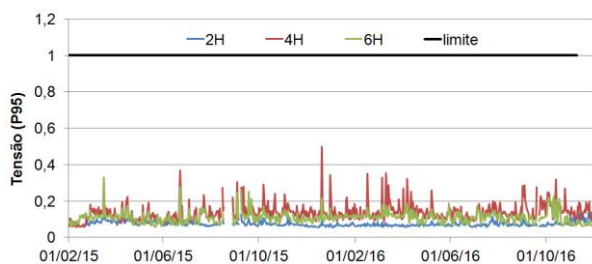


Figura 4a – P95% das distorções de 2ª, 4ª e 6ª ordem

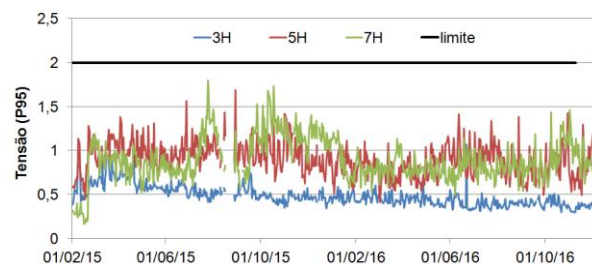


Figura 4b - P95% das distorções de 3ª, 5ª e 7ª ordem



A Tabela 2 apresenta uma comparação dos valores médios das medições integralizadas a cada 10 minutos e dos máximos percentis 95 diários das medições pré e pós parque. A partir da análise dos valores pré e pós instalação dos parques é possível observar que os valores médios das distorções de 2ª, 4ª e 6ª ordens sofrem variações inexpressivas, com redução do valor da distorção de 2ª ordem. Os valores médios e P95 das distorções de 3ª ordem medidas após a instalação dos parques se reduzem, com destaque para a expressiva redução do valor médio. A comparação pura e simples dos percentis 95 das distorções obtidas nos dois períodos não é adequada, uma vez que o período pós representa um intervalo de tempo muito maior e por isso muito mais suscetível ao registro de valores transitórios ou espúrios; e também devido à modificação da rede externa pela entrada em operação da LT 525 kV Povo Novo – Nova Santa Rita. De qualquer forma, após a entrada dos parques em operação, o DTHT sofre uma variação muito pequena e o 2º e o 3º harmônico tem pequenas reduções. Os percentis 95 das distorções de 5ª e 7ª ordens sofrem as maiores elevações e os valores médios destas ordens sofrem variação inferior ao limite individual.

Tabela 4 - Valores médios e percentil 95 das medições pós-parque – Vh (%)

Indicador	Período	2	3	4	5	6	7	DTHT
Média	Pré	0,084	1,067	0,051	0,478	0,049	0,232	1,422
	Pós	0,046	0,270	0,072	0,663	0,058	0,529	-
P95	Pré	0,197	1,448	0,084	0,828	0,085	0,545	1,909
	Pós	0,175	1,138	0,498	1,689	0,329	1,794	2,182

De forma a permitir um melhor entendimento a respeito das elevações ocorridas com as distorções de 5ª e 7ª ordem realizou-se uma análise mais detalhada com os valores das medições integralizadas a cada 10 minutos durante um período mais curto, onde a potência instalada estava sendo ampliada. Para isto as Figuras 5a e 5b mostram as tensões harmônicas de 5ª e 7ª ordem medidas nas três fases e a potência despachada pelo complexo eólico. É possível observar que as duas ordens sofrem uma elevação das distorções a partir do dia 22 de fevereiro quando a LT 525 kV Povo Novo – Nova Santa Rita entra em operação. Para a 7ª ordem o efeito é mais claro e provavelmente é motivado pela modificação da impedância do sistema e principalmente pela “aproximação” das cargas não lineares da região metropolitana de Porto Alegre do PAC do complexo eólico. Além disto, para as duas ordens é possível observar que existe uma tendência de redução das distorções a medida que a potência despachada e instalada se eleva. É possível observar também uma redução da distorção de 7ª ordem entre os dias 23 e 24 de fevereiro quando a linha LT 525 kV Povo Novo – Nova Santa Rita foi desligada devido a um defeito em um dos seus reatores. Além disto, após a energização da linha, a amplitude das variações das distorções se eleva.

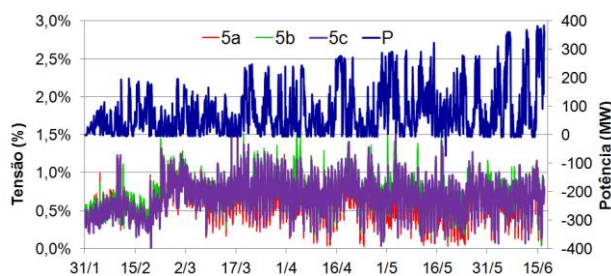


Figura 5a – Distorções de 5ª ordem vs potência

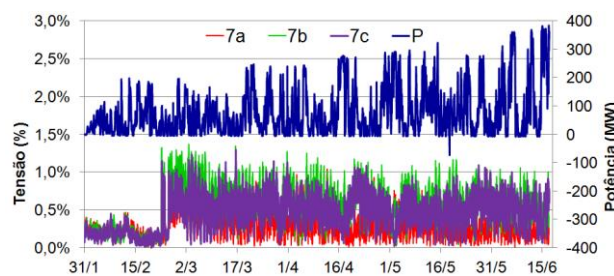


Figura 5b – Distorções de 7ª ordem vs potência

Devido à elevação observada nas distorções de 5ª e 7ª ordens e a suspeita de que ela seja principalmente motivada pelo efeito de aproximação das cargas não lineares do PAC do complexo, a Figura 6 mostra as distorções de 5ª ordem em um período mais curto onde é possível verificar que elas seguem um perfil periódico, característico da carga, indicando que a sua elevação em relação aos valores medidos antes da entrada da linha são predominantemente geradas pela rede. Reforçam a afirmativa de que as distorções são originadas pela rede o fato de os dias 28 e 29 de março serem sábado e domingo, dias em que se observa mudança no padrão das distorções. Além disto, nos dias úteis, se observa o início da elevação das distorções entre as 6h 30min e 7h 30min e picos de distorção próximos às 12h 30min e 17h 30min.

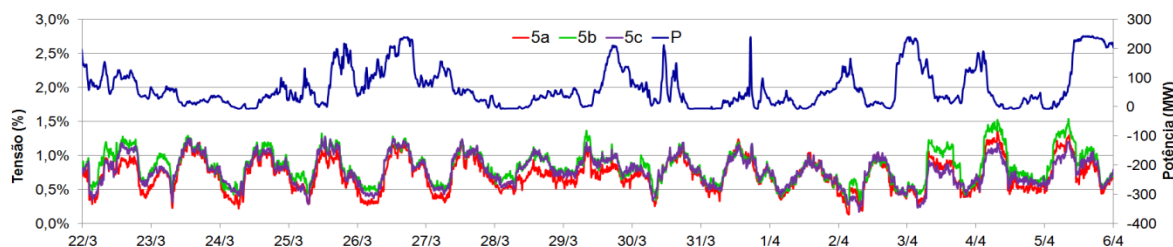


Figura 6 – Detalhe das distorções de 5ª ordem vs potência

#### 4.3.2 Medições em eventos sistêmicos e desligamentos do complexo eólico

Para reforçar as argumentações de que os parques eólicos não contribuem significativamente para a elevação das distorções do sistema e que os estudos podem apresentar resultados muito superiores aos valores medidos,

mesmo em condições de rede degradada, nesta seção são apresentados resultados das medições das distorções durante desligamentos dos parques eólicos e durante contingências no sistema, para linhas e transformadores até a terceira vizinhança do PAC. Para isto, foram selecionados para apresentação os desligamentos com tempo superior a 10 minutos dentro do período compreendido entre 29/01/15 e 20/12/16, exceto o desligamento da linha LT 525 kV Povo Novo – Nova Santa Rita ocorrido entre os dias 23 e 24 de fevereiro já tratado na Seção 4.3.1. Assim, as figuras a seguir apresentam a potência despachada por Chui e Geribatu e as distorções das mesmas ordens que apresentaram violações no estudo de projeto dos filtros.

A Figura 7 mostra a potência despachada pelos parques e as distorções medidas durante um período de monitoração em que ocorreram desligamentos programados com desconexão total dos parques do sistema em três dias seguidos - 17, 18 e 19 de setembro de 2015. Inicialmente, não se observa variação significativa nos momentos anterior e posterior às conexões do parque, exceto por variações transitórias observadas no final do 3º desligamento. As distorções de 2ª e 4ª harmônica praticamente não sofrem variação com a situação operativa do parque e tem valores da ordem de 10 % do limite. A 3ª harmônica se eleva durante os desligamento do parque e visualmente não é possível verificar alguma correlação clara entre a 5ª ordem e a operação do parque. Aparentemente ocorre uma redução das distorções de 7ª ordem quando a rede dos parques se conecta ao sistema no fim dos desligamentos e eles voltam a despachar. Vale observar que a maior distorção de 7ª ordem ocorreu durante o segundo desligamento e não ocorre redução das demais ordens durante a desconexão dos parques.

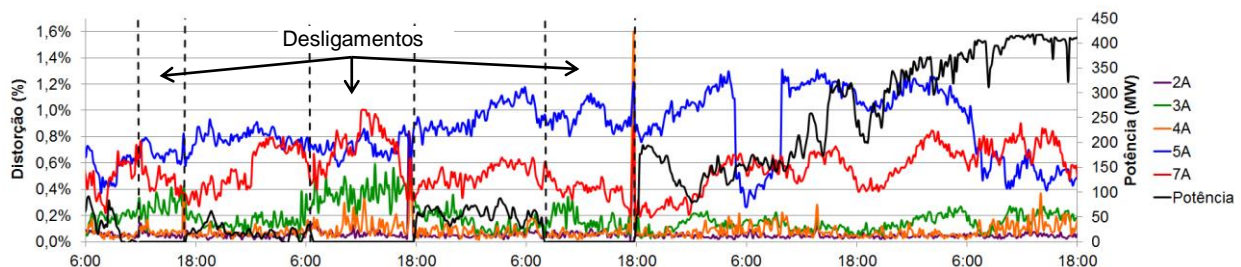


Figura 7 - Distorções e potência despachada durante desligamentos do complexo eólico

Na Figura 8 são apresentadas as mesmas variáveis monitoradas durante um desligamento programado do complexo ocorrido no dia 22 de junho de 2016. Para este desligamento são válidas praticamente todas as observações realizadas para o caso anterior. Destaca-se os valores diminutos do 2º e 4º harmônico, a ausência de variações abruptas nas distorções, exceto pelos transitórios na reconexão dos parques, e a elevação do 3º harmônico durante a desconexão dos parques, fato que se inicia com a redução da potência despachada antes do desligamento.

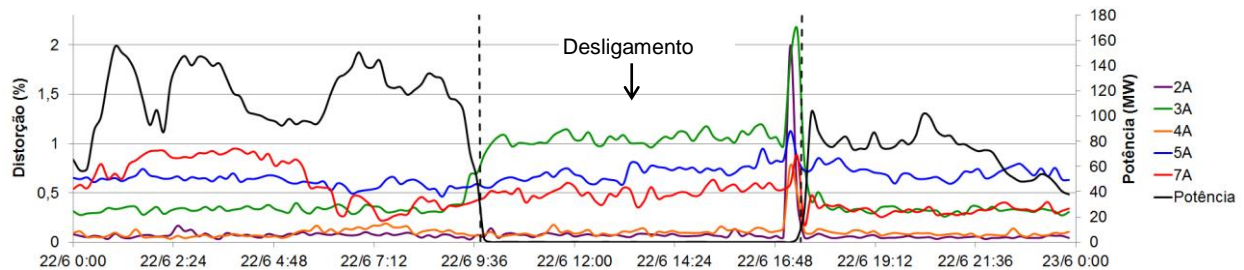


Figura 8 - Distorções e potência despachada durante desligamento do complexo eólico

As Figuras 9a e 9b mostram dois desligamentos da LT 525 kV Povo Novo – Nova Santa Rita ocorridos respectivamente nos dias 24/10/16 das 08:34 às 11:40 e 15/11/16 das 07:58 às 10:16. Para os dois desligamentos os valores das distorções de 2ª, 3ª e 4ª ordem são muito baixos e pode-se dizer que não sofrem alteração motivada pelos desligamentos. O 5º harmônico não sofre variações significativas no desligamento ou energização da linha, exceto por uma variação da ordem de 0,25 % no segundo desligamento. A indisponibilidade da linha provoca reduções drásticas da distorção de 7ª ordem e elevação das distorções quando retorna à operação.

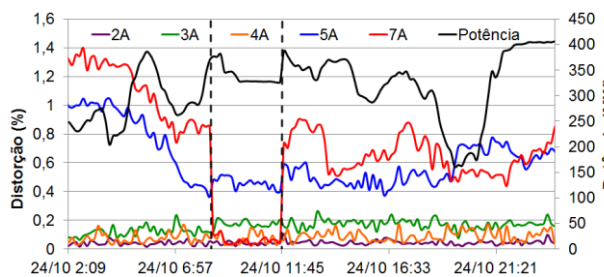


Figura 9a – Desligamento 1 da LT PNO-NSR

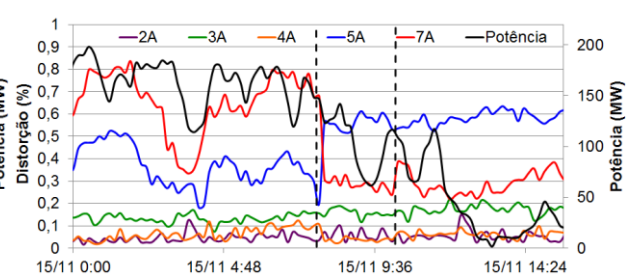


Figura 9b - Desligamento 2 da LT PNO-NSR

A Figuras 10a e 10b mostram respectivamente desligamentos da LT 230 kV Povo Novo – Quinta ocorrido no dia 15/07/15 das 08:46 às 14:03 e do único TF 525/230 kV de Povo Novo ocorrido no dia 09/08/15 das 07:38 às 22:00. De forma geral, para os dois desligamentos, não se observam variações significativas das distorções nos momentos posteriores ao desligamento ou energização dos equipamentos, exceto pela redução de aproximadamente 0,6 % da distorção de 5ª ordem imediatamente após o desligamento do trafo. As distorções de 2ª e 4ª ordem tem valores ínfimos durante todo o período e a distorção de 3ª ordem tem valores máximos da ordem de 20 % do limite global inferior. Não é possível afirmar que exista correlação entre as distorções de 5ª e 7ª ordens e estas duas contingências.

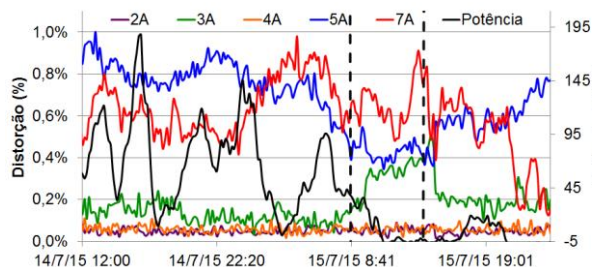


Figura 10a – Desligamento LT PNO - QUI

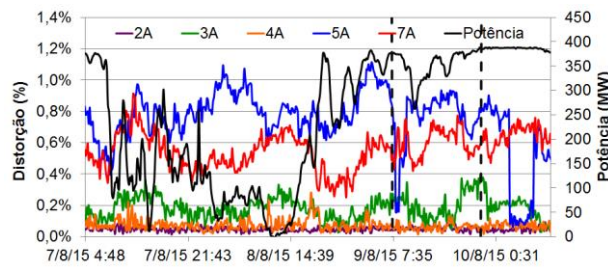


Figura 10b – Desligamento TF PNO

É importante mencionar que dentro do período analisado nesta seção, os desligamentos de linhas e transformadores totalizaram 9843 minutos ou 0,99 % do tempo, o que é muito inferior ao tempo que se permite desprezar as maiores distorções medidas e também induz a questionamentos como: é adequado dar o mesmo “peso” para as contingências e condições de regime normal nos estudos?

## 5.0 - CONCLUSÃO

A experiência operativa em parques eólicos no sul do país demonstra que as distorções harmônicas medidas no PAC de parques eólicos apresentam valores bastante divergentes dos resultados obtidos na metodologia definida pelo ONS para estudos de desempenho harmônico. Evidenciando nos casos apresentados que, para certas ordens harmônicas, a solução de filtragem definida pelos estudos é absolutamente desnecessária, vistas as distorções medidas em operação normal e contingências; e a pequena influência que o complexo eólico tem nas distorções.

O IT demonstra, com o estudo de caso, a extrema importância de se aprimorar os procedimentos de análise das distorções de tensão provocadas por parques eólicos e da necessidade da instalação de filtros, os quais, deveriam ser baseados principalmente na análise de medições. Tais aprimoramentos são necessários em função da expansão e importância da fonte eólica na matriz energética brasileira, dos custos possivelmente desnecessários e imprevisíveis envolvidos, da complexidade dos projetos e de prováveis problemas operativos futuros.

Por fim, o artigo conclui que a metodologia exigida pelo ONS nos estudos deveria ser revista, visto que apresentou ser inadequada para se realizar diagnósticos precisos e realistas das distorções provocadas por parques eólicos. Observa-se também que a determinação da instalação de filtragem harmônica, como em toda solução técnica ideal, deve ser ponderada de acordo com os seus benefícios e suas consequências para o sistema, para o empreendedor e para a sociedade.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS, “Harmonic Distortion Measurements in Brazilian Wind Farms - Integration of Wind Power Plants into the Brazilian Transmission System”, Julho/2016.
- (2) ONS, Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede - Rev. 2016.12, “Diretrizes e critérios para estudos elétricos” Dezembro de 2016.
- (3) ONS, NT 009/2016 – Rev.1, “Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares e Consumidores Livres”, Abril/2016.
- (4) ONS, RE 2.1 057/2008 rev.3 – “Instruções para Realizações de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica”.
- (5) IEC, IEC/TR 62001: Guide to the specification and design evaluation of AC filters for high-voltage direct current (HVDC) systems. Frankfurt, 2009.
- (6) GT ONS-ABEEólica: Método de Cálculo, Medição e Processo de Aprovação da Conformidade de Parques Eólicos Acessantes à Rede Básica face a Distorção Harmônica – Experiência Internacional, 3ª reunião do GT ONS/ABEEólica. Rio de Janeiro, 2014.
- (7) NBR IEC 61400-21: Turbinas Eólicas - Parte 21: Medição e avaliação das características da qualidade de energia de aerogeradores conectados à rede. Rio de Janeiro: 2010.
- (8) IEC 61000-3-6, 2nd. Ed. “Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-6: Assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installations to MV, HV and EHV Power Systems”, 2008.



## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Miguel Pires De Carli** nasceu em Porto Alegre, RS, em 22 de Novembro de 1978. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2007. Ingressou na Eletrosul em 2001 e já trabalhou nos Departamentos de Operação do Sistema e de Planejamento do Sistema. Especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 2012. Atualmente trabalha no Departamento de Engenharia do Sistema. É membro do Cigré com atuação no CE B4 de Elos de Corrente Contínua e Eletrônica de Potência e no C4 de Desempenho de Sistemas Elétricos. Suas principais áreas de atuação são qualidade de energia elétrica e estudos de transitórios eletromagnéticos.

**Ricardo Antunes**, graduado em 1999 em Engenharia Elétrica na especialidade de Sistemas de Potência, com Mestrado concluído em 2002 na área de Modelagem Eletromagnética, ambos pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Trabalha desde 2002 na Eletrobrás Eletrosul, onde iniciou sua carreira no Departamento de Operação, no Setor de Estudos Elétricos de Sistemas de Potência. Desde 2013 está vinculado ao Departamento de Engenharia do Sistema, onde coordena Estudos de Engenharia voltados à Especificação de Equipamentos de HVAC/DC, Estudos de Projeto Básico ANEEL, Alternativas de Referências (R2) e Estudos Especiais. Atualmente é membro do CE-C4 – Desempenho de Sistemas Elétricos.



**Orlando José Rothstein**, graduado em 2002 em Engenharia Elétrica e Especialista em Sistemas de Energia Elétrica em 2004 pela Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. Iniciou sua carreira em 2002 na Eletrobrás Eletrosul, atuando no Setor de Estudos Elétricos de Sistemas de Potência do Departamento de Operação do Sistema. A partir de 2015 passou a atuar junto ao Departamento de Engenharia do Sistema, na execução de Estudos de Engenharia para Especificação de Equipamentos de HVAC/DC, Estudos de Projeto Básico ANEEL, Alternativas de Referências (R2) e Estudos Especiais. Atualmente é membro do CE-B4 – Elos de Corrente Contínua e Eletrônica de Potência.

**Rafael Takasaki Carvalho**, graduado em Engenharia Elétrica pela UFSC em 2000 e Mestre em Engenharia Elétrica pela UFSC em 2003. Especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela UFSC em 2007. Experiência de 15 anos atuando no planejamento da expansão do sistema elétrico na Eletrosul onde por 9 anos ocupou a gerência do Departamento de Planejamento do Sistema. Já participou de diversos grupos de trabalho nos âmbitos do CCPE, EPE e Eletrobras em diversas áreas de planejamento da transmissão, da geração e do mercado de energia elétrica. Atualmente é o Coordenador da área de planejamento da expansão da Eletrosul e da Força Tarefa de Expansão da Abrate.