



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/03
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**HARMÔNICOS RESULTANTES DA CONEXÃO DE PARQUES EÓLICOS COM A REDE ELÉTRICA:
ANÁLISE CONJUNTA DE MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES ASSOCIADAS A UM ESTUDO DE CASO**

**Miguel Pires De Carli (*)
Breno Torres Meyer
ELETROSUL**

**Ricardo Penido D. Ross
Alex Jean de Castro Mello
CEPEL**

RESUMO

Este artigo discute os requisitos de distorção harmônica para a conexão de parques eólicos à rede elétrica. Para isso, são apresentadas resumidamente a regulamentação existente no Brasil do ponto de vista de harmônicos e uma referência técnica internacional que trata da correlação entre grandezas medidas como forma de se determinar fontes dominantes de harmônicas. Destaque é dado a um estudo de caso envolvendo a conexão de um complexo eólico da Eletrosul à rede básica. Onde, ao longo de alguns anos, foram realizadas diversas campanhas de medição de forma que o estudo possibilita que se chegue a diversas conclusões sobre características dos harmônicos na conexão de parques eólicos.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de energia, Aerogeradores, Harmônicas

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente há no Brasil 242 parques eólicos com capacidade instalada da ordem de 6 GW (1) e conforme a ABEEólica, até 2019, a capacidade instalada de energia eólica no país deve chegar a 16,3 GW. É importante enfatizar que na grande maioria dos parques, recém-instalados ou em construção, os aerogeradores são equipados com modernos conversores eletrônicos que controlam uma série de grandezas cuja função principal é a maximização da geração de energia em função do vento. Tais conversores e os controladores associados têm evoluído bastante ao longo do tempo empregando tecnologias sofisticadas, no entanto, um subproduto da conexão dos conversores com a rede elétrica é a geração ou absorção de correntes harmônicas entre os dois lados, isto é, correntes harmônicas oriundas da operação dos conversores para a rede elétrica interligada ou harmônicas pré-existentes na rede ("background harmonics") para os parques eólicos. É importante também ressaltar que em muitos casos as impedâncias internas dos parques eólicos possuem características capacitivas que podem propiciar ressonâncias com as características indutivas das impedâncias da rede.

A regulamentação atual impõe requisitos de desempenho que são avaliados através de simulações computacionais em etapa de planejamento e de medições após a entrada em operação. Os níveis de emissão de harmônicos dos parques eólicos e os limites associados são tópicos controversos. Atualmente há dois grupos de trabalho no Brasil estudando e debatendo estes tópicos: GT do CIGRE CE-C4 BR03 e GT ONS-ABEEólica. As discussões abrangem tanto às simulações que devem ser realizadas antes da conexão dos parques à rede como as medições que devem ser realizadas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e nos terminais dos aerogeradores.

A razão pela qual o assunto desperta tanto interesse é porque o Operador Nacional do Sistema (ONS) procura estabelecer um procedimento que se os níveis de emissão de harmônicos excederem os limites estabelecidos nos Procedimentos de Rede (PR) os parques têm de providenciar filtros de harmônicos adicionais. Por outro lado, os

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

donos dos parques eólicos reclamam que os níveis de emissão são elevados devido ao fato de que em algumas frequências harmônicas os parques eólicos estão captando correntes harmônicas pré-existentes na rede.

Este artigo dá prosseguimento a discussões sobre este tópico apresentadas em congressos anteriores (2), (3) e (4), sintetiza as principais questões e discussões ocorridas nos grupos de trabalho, explicita algumas abordagens existentes a nível mundial como a Brochura Técnica 468 (5) (Técnicas para Avaliação de Emissões) do Cigré.

O destaque principal do artigo é a apresentação de resultados práticos baseados em campanhas de medição na subestação de Livramento 2 230 kV que é o PAC relativamente ao Complexo Eólico de Cerro Chato de propriedade da ELETROSUL. Portanto, o foco do atual artigo é ilustrar as técnicas de análise harmônica baseadas na simulação e medição através de exemplos de campo.

2.0 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HARMÔNICO DOS PARQUES EÓLICOS

No Brasil, o ONS exige que um novo acessante realize diversos estudos para verificar o impacto de seu empreendimento no sistema. Em um destes estudos, o acessante deve comprovar que a distorção de tensão gerada pelo seu empreendimento no seu PAC atende aos limites estabelecidos nos PR. Este estudo deve ser executado conforme um relatório de instruções para a realização de estudos e medições de QEE (6), o qual estabelece o Método do Lugar Geométrico como a metodologia a ser utilizada para o cálculo das distorções.

2.1 Limites de Distorção Harmônica

Os limites de distorção harmônica de tensão que devem ser respeitados são definidos no Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS (7). 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%. Para a avaliação e gerenciamento das distorções totais, ou seja, geradas por todos os agentes, são utilizados os limites globais inferiores e superiores.

2.2 Método de Simulação das Distorções Harmônicas

O modelo requerido pelo ONS para a realização de estudos de distorção de tensão para a solicitação de acesso de novos empreendimentos à Rede Básica é baseado no procedimento clássico de cálculo de distorções e projeto de filtros para sistemas de transmissão em corrente contínua, conforme definido na IEC 62001 (8). Para o caso dos parques eólicos o modelo considera uma fonte de corrente harmônica constante I_h , que representa a injeção harmônica dos aerogeradores, em paralelo com a impedância da rede interna do parque Z_{lh} e com a impedância da rede externa Z_{Eh} representada por um LG. A Figura 1a e 1b apresentam o circuito utilizado para o cálculo das distorções de tensão geradas no PAC e um exemplo de LG representativo das impedâncias da rede externa.

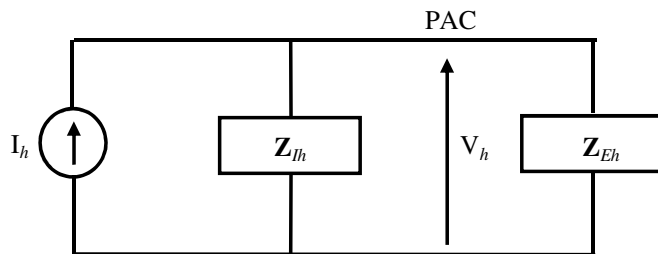


Figura 1a - Modelo para o cálculo das distorções de tensão

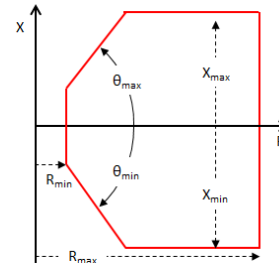


Figura 1b - LG representativo de Z_{Eh}

A máxima distorção de tensão V_h é obtida minimizando o módulo da soma vetorial das admitâncias na Equação 1.

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

Os níveis de emissão assim obtidos são comparados com os limites individuais definidos em (7), concluindo-se sobre o desempenho harmônico do acessante. Cabe ressaltar que a aplicação desta 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, 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.

2.3 Medições de Tensões e Correntes Harmônicas

Além das simulações, é necessário que o novo acessante efetue medições de tensão no PAC antes e após a conexão dos empreendimentos à rede para verificar o quanto a conexão influencia efetivamente 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 (9) como forma de avaliar se estas são maiores ou menores que aquelas fornecidas pelos fabricantes.

2.4 Processo de Avaliação do Desempenho Harmônico

O processo de avaliação do desempenho harmônico de um parque eólico pode ser descrito resumidamente da seguinte forma:

- deve-se medir as distorções de tensão no PAC do empreendimento antes da entrada em operação;
- o acessante avalia através de simulações o impacto provocado pelo seu empreendimento em seu PAC seguindo a metodologia apresentada na seção 2.2 utilizando extratos de correntes harmônicas fornecidos pelo fabricante dos aerogeradores. Caso as distorções simuladas sejam inferiores aos limites definidos em (7), o parque está apto a entrar em operação sem restrições e posteriormente deve medir as correntes harmônicas nos terminais dos aerogeradores e reavaliar o estudo com estas correntes, se as distorções obtidas forem ainda inferiores aos limites, não existiriam mais etapas de avaliação; exceto possíveis comparações das medições de tensão no PAC pré e pós entrada em operação por solicitação do ONS;
- no caso de as simulações, seja com extratos fornecidos pelo fabricante dos aerogeradores ou medidas no próprio parque, resultarem em violação de qualquer dos limites permitidos, o parque deve instalar filtros até a sua entrada em operação. Caso isto não seja viável, o acessante pode solicitar ao ONS entrar em operação com todos os aerogeradores, em caráter de excepcionalidade, sem os filtros instalados, mas condicionado 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;
- após a instalação e comprovação do desempenho dos filtros não existiriam mais etapas de avaliação.

Cabe ressaltar que embora medições e simulações tenham caráter complementar, o ONS, a princípio, prioriza os resultados dos estudos para a avaliação do desempenho dos parques eólicos e a decisão sobre a necessidade de instalação de filtros. Este procedimento tem causado situações onde as medições pós entrada em operação resultam em valores bem abaixo dos limites e daqueles obtidos nas simulações, mas os empreendimentos precisam instalar filtros em função do resultado das simulações.

3.0 - BROCHURA TÉCNICA 468

A BT 468 do Cigré-Cired trata da avaliação dos níveis de emissão por parte de acessantes individuais relativas aos distúrbios de distorção harmônica, flutuação e desequilíbrio de tensão. A Força Tarefa centrou seus esforços na tentativa de responder a seguinte questão: *Como é que se podem aferir, através de resultados de campanhas de medição, os níveis de emissão de um agente individual dentro do condomínio que é a rede elétrica que possui muitas fontes de emissão?* O problema se torna complexo de resolver porque não é possível isolar o agente do resto da rede, separando os efeitos das demais cargas nos níveis de distorção medidos em determinado local.

3.1 Definição de Nível de Emissão Harmônica

Segundo a IEC 61000-3-6 (10), o nível de emissão para cada frequência harmônica de um determinado acessante é definido como sendo a magnitude do fasor tensão que é causado pela instalação considerada no PAC. Na Figura 2a o fasor \bar{E}_{h0} corresponde à tensão harmônica pré-existente na rede devido aos demais acessantes. Os fasores \bar{U}_h e \bar{I}_h correspondem respectivamente às tensões e correntes medidas no PAC. Por se tratar de uma medição, o fasor \bar{U}_h é influenciado por todos os acessantes da rede, portanto, não pode ser atribuído ao acessante em análise. O fasor \bar{E}_{hc} representa o nível de emissão de tensão do acessante e pode ser calculado através da Equação 2.

$$\bar{E}_{hc} = \bar{Z}_h \bar{I}_h = \bar{U}_h - \bar{E}_{h0} \quad (2)$$

O circuito equivalente apresentado na Figura 2b pode ser usado para avaliar o nível de emissão harmônica \bar{E}_{hc} , onde \bar{Z}_h e \bar{Z}_{hc} são, respectivamente, as impedâncias da rede e do consumidor; e \bar{I}_{hc} é a fonte harmônica presente na instalação do consumidor.

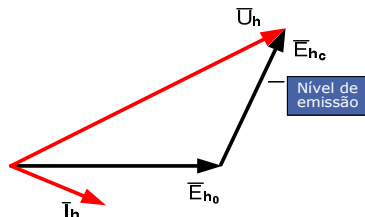


Figura 2a – Nível de emissão de harmônicos

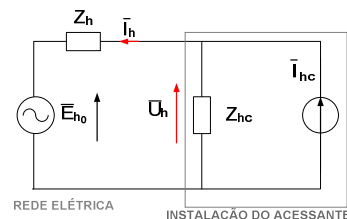


Figura 2b – Circuito equivalente para harmônica h

3.2 Métodos da BT 468 para a Definição do Nível de Emissão

Inicialmente a BT 468 recomenda avaliar se os níveis de distorção pós-conexão do acessante diminuem ou aumentam em relação ao níveis pré-conexão em bases estatísticas. Se os níveis diminuïrem, entende-se que a conexão é aceitável e não são mais necessárias investigações; todavia, se os níveis de distorção no PAC aumentarem é necessário determinar a emissão da instalação sob consideração e compará-la com os limites individuais. Para avaliar este último caso a BT apresenta alguns métodos, dos quais apresentaremos apenas dois.

O primeiro consiste em avaliar se existe uma clara correlação entre a tensão harmônica de ordem h e potência aparente do acessante. Se existir uma clara correlação positiva entre as grandezas, como na Figura 3a, a instalação sob avaliação eleva os níveis de distorção do sistema. A distorção pré-existente seria a extrapolação da tensão harmônica quando a potência é nula e E_{hc} poderia ser calculada usando a Equação 3, com α definido conforme (10). Esta metodologia assume que a tensão pré-existente não varia de forma significativa e somente dá bons resultados na prática quando a instalação sob análise provoca uma contribuição significativa no PAC.

$$E_{hc} = (U_h^\alpha - E_{h0}^\alpha)^{1/\alpha} \quad (3)$$

A segunda metodologia utiliza um gráfico como o da Figura 3b de magnitude da distorção harmônica de tensão vs magnitude da corrente harmônica da mesma ordem. De acordo com a BT 468, se os pontos medidos se situarem próximos da reta $|Z_{hc}|$, que representa o módulo da impedância da rede interna do consumidor vista do PAC, então as fontes dominantes de harmônicos, de ordem h , são as existentes no resto do sistema que fluem pelas instalações do consumidor devido à presença de capacitores ou filtros. Por outro lado, se as medições se concentrarem predominantemente próximas da reta $|Z_h|$, que representa a impedância do sistema, então as fontes dominantes, de ordem h , são as fontes existentes no consumidor que fluem pela impedância da rede.

O nível de emissão de corrente harmônica I_h é o percentil 95 dos valores de corrente harmônica medidos durante uma semana, como sugerido na IEC 61000-3-6, e o nível de emissão harmônica E_{hc} do acessante é definido como o produto de $|Z_h|$ pelo valor da emissão de corrente considerada.

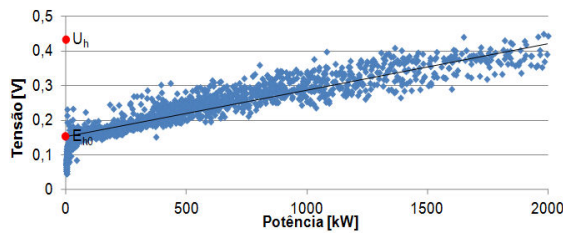


Figura 3a – Correlação entre a potência do consumidor e a distorção harmônica de ordem h

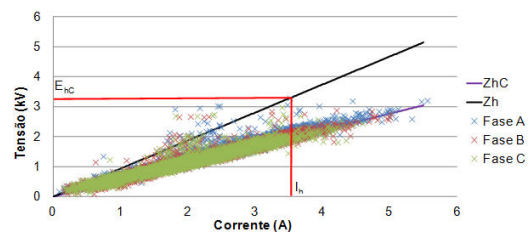


Figura 3b - Correlação entre tensão e corrente harmônica de ordem h

4.0 - ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste IT é realizado em um conjunto de três parques eólicos, denominados Cerro Chato I, II e III, todos de propriedade da Eletrosul. Os parques totalizam uma potência de 90 MW e se conectam à Rede Básica na subestação Livramento 2 230 kV através de uma linha compartilhada, conforme apresentado de forma simplificada na Figura 4. Em cada um dos transformadores 230/34,5 kV se conectam 15 aerogeradores do tipo 4. Distante aproximadamente 50 km do parque, há uma conversora de frequência que é despachada ocasionalmente e consequentemente é energizada junto com seus filtros, os quais reduzem as distorções no PAC do parque.

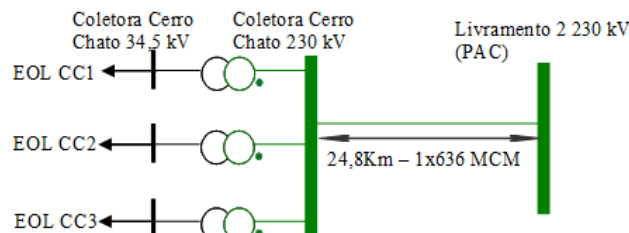


Figura 4 - Configuração de conexão das EOL Cerro Chato I, II e III ao SIN

Nos estudos de distorção harmônica destes parques, para a Solicitação de Acesso, se verificava violações dos limites previstos para algumas harmônicas de baixa ordem (2^a , 3^a , 4^a , 5^a e 7^a) (2). Em situações de regime normal não eram previstas violações, então o ONS liberou a entrada dos parques em operação, mas criou uma Mensagem Operativa que exigia o desligamento de todos os aerogeradores no caso de indisponibilidade de linhas na região. A Eletrosul, o CEPEL e o fabricante dos aerogeradores realizaram diversas campanhas de medição a fim de

compreender melhor o problema. Verificou-se, por exemplo, que correntes de 5ª e 7ª ordens eram, na maior parte, drenadas pelos aerogeradores e não emitidas por eles. O fabricante testou melhorias no controle dos aerogeradores e trocou equipamentos conseguindo reduzir as emissões de 2ª e 4ª ordens. Mesmo assim os estudos ainda indicavam a necessidade de filtros. A Eletrosul contratou um projeto de filtros passivos que se mostrou inviável economicamente e de difícil implementação. Por fim, optou-se por instalar 38 filtros ativos junto aos terminais dos aerogeradores, os quais apresentaram desempenho satisfatório na redução das correntes emitidas pelos aerogeradores.

O estudo de caso apresenta alguns resultados de medições que demonstram que os parques eólicos de Cerro Chato I, II e III não são responsáveis ou causadores das elevadas distorções verificadas em seu PAC. Também são apresentados e discutidos resultados da aplicação de técnicas da BT 468 para a identificação da fonte predominante na geração dos harmônicos, bem como a estimativa da emissão proveniente do parque eólico.

4.1 Análise de Eventos

A Figura 5 apresenta um período de medição das distorções no PAC de Cerro Chato onde ocorreram dois desligamentos para manutenção da rede interna de média tensão ficando energizados apenas a linha de 230 kV e os três transformadores de 230/34,5 kV. Os desligamentos ocorram do dia 19 à 21 e 22 à 24 de abril de 2013. Em todo o período mostrado a rede de 230 kV da região estava completa e com a conversora de Rivera fora de operação. Na figura são mostradas as distorções de 5ª ordem nas três fases, o DTHT e a potência despachada pelos parques. Inicialmente é possível observar que as distorções estão bastante elevadas durante todo o período apresentado e seguem um padrão periódico típico da carga com picos próximo das 13 e 18 horas e reduções na madrugada. Durante os desligamentos do parque verifica-se que as distorções se mantêm nos mesmos níveis praticamente com o mesmo padrão, exceto no primeiro desligamento em uma sexta-feira e um sábado. Além disso, mesmo em períodos de baixa ou nenhuma geração eólica as distorções se mostram elevadas.

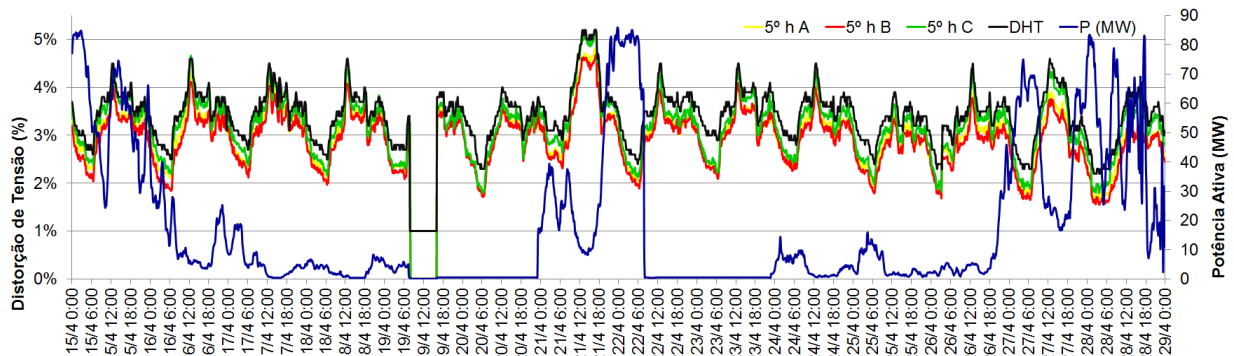


Figura 5 – Tensão de 5ª ordem e DTHT *versus* potência despachada

Nas Figuras 6a e 6b são mostradas as distorções de 2ª e 7ª ordem *versus* potência despachada pelo parque em um período mais curto da Figura 5. Na Figura 6a verifica-se que a tensão de 2ª ordem tem valores máximos próximos a um terço do limite individual permitido e apresenta dependência da potência gerada pelo parque. No caso do 7º harmônico os valores são mais elevados e mostram uma aparente correlação negativa entre tensão e potência (assim como o 5º harmônico na Figura 5), ou seja, quando o parque aumenta a geração as distorções reduzem e vice-versa.

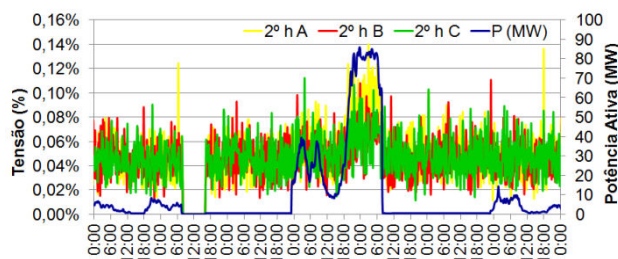


Figura 6a – Tensão de 2ª ordem *versus* potência

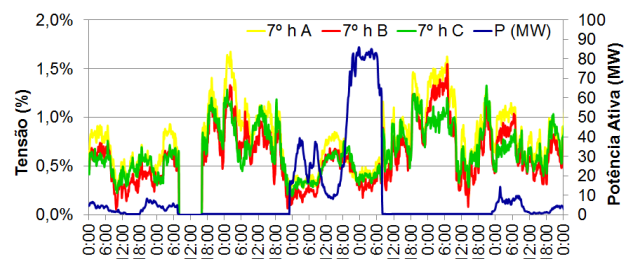


Figura 6b – Tensão de 7ª ordem *versus* potência

A Figura 7a mostra outro desligamento do complexo eólico por solicitação do ONS (Mensagem Operativa) devido ao desligamento da LT 230 kV Alegrete 2 – Santa Maria 3. Neste evento a conversora de Rivera estava fora de operação e os filtros ativos já estavam instalados e operando. Na figura estão indicados os momentos em que a linha e o parque foram desligados, respectivamente às 06:41 e 6:52, quando o complexo estava a plena potência e o DTHT na SE Livramento 2 perto de 3 %. Após o desligamento da linha, a distorção reduz aproximadamente 1 % e ao longo do dia, com a linha e o parque desligados, a distorção vai aumentando até chegar em 4 % no final da tarde. Quando a linha volta a ser ligada, às 17:40, a distorção se eleva imediatamente a 5 % e após às 17:55,

quando o complexo volta a operar, a distorção começa a reduzir até chegar em níveis próximos de 3 %. A Figura 7b demonstra que na contingência da LT 230 kV Alegrete 2 – Santa Maria o módulo da impedância do 5º harmônico visto do PAC se reduz em relação a situação de rede íntegra e este é o principal componente do DTHT.

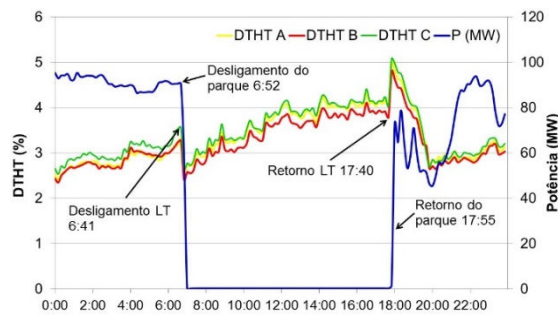


Figura 7a – DTHT versus potência despachada

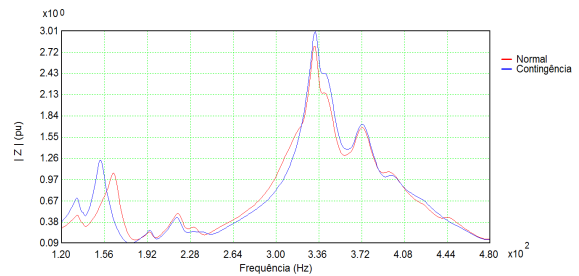


Figura 7b – $|Z|$ vista do PAC em regime e contingência

Algumas conclusões podem ser tiradas destes eventos: o nível de distorção harmônica no PAC do complexo eólico está elevado e pode superar os limites globais superiores mesmo com o complexo desligado; o desligamento de algumas linhas pode resultar na redução das distorções de determinadas ordens harmônicas e do DTHT, ao contrário do que muitas vezes se espera, ou seja, uma rede mais fraca na frequência fundamental pode ser “forte” para algumas frequências harmônicas – resultando em menores distorções. Embora os filtros ativos instalados nos aerogeradores tenham a capacidade de reduzir as emissões de corrente dos aerogeradores, eles não são capazes de reduzir as distorções de tensão com origem na rede.

4.2 Análise BT 468

As análises apresentadas nesta seção utilizam medições de tensões e correntes harmônicas no PAC dos parques de Cerro Chato durante os meses de abril de 2013 e janeiro de 2014, na primeira medição sem filtros ativos (SFA) e na segunda com 38 filtros ativos (CFA) operando. As retas ZI e ZE, que representam o módulo da impedância da rede ínterna do complexo eólico e a impedância do sistema, ambas vistas do PAC, foram calculadas no programa HarmZs, respectivamente, com a rede ínterna modelada desde o PAC até os filtros passivos na saída dos inversores dos aerogeradores e com um caso de carga média do ano de 2014 com a rede elétrica brasileira.

As Figura 8a e 8b apresentam gráficos de correlação entre tensão de 2ª ordem e potência despachada pelos parques. No caso SFA a correlação entre a potência e a tensão na fase A é 0,65, indicando uma correlação moderada entre as grandezas, e o percentil 95 da tensão é 0,095 %. No caso CFA a correlação entre a potência e a tensão na fase A é 0,085, indicando uma correlação fraca, e o percentil 95 da tensão é 0,078 %. Calculando a emissão dos parques com a Equação 3 se obtém 0,047 e 0,029 %, respectivamente para as condições SFA e CFA. Estes resultados indicam que sem os filtros ativos a distorção de tensão de 2ª ordem no PAC depende da potência despachada no parque, após a instalação dos filtros a distorção é reduzida e se mantém constante independente da potência despachada. Em ambas as situações a tensão E_{h0} é praticamente a mesma.

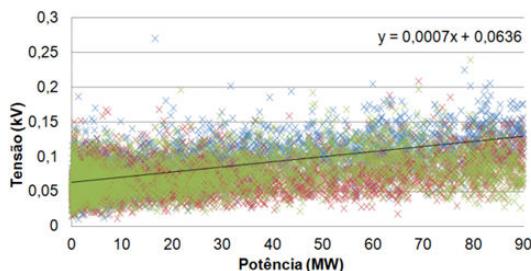


Figura 8a – V2h versus potência SFA

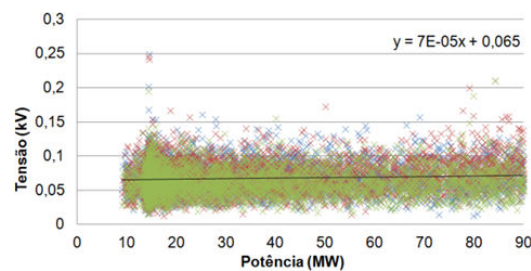


Figura 8b – V2h versus potência CFA

As Figuras 9a e 9b mostram gráficos da magnitude da distorção harmônica de tensão vs magnitude da corrente harmônica de 2ª ordem junto com as retas ZI e ZE, para as condições SFA e CFA. Em ambas as condições a nuvem de pontos V_{x1} está mais próxima da impedância ZE, indicando que a fonte dominante para esta ordem é o parque. Calculando a emissão dos parques com o percentil 95 dos valores de corrente harmônica medidos vezes a impedância ZE se obtém 0,081 % (0,107 kV) para a condição SFA e 0,052 % (0,069 kV) CFA.

Os resultados obtidos para o 2º harmônico, com os dois métodos, indicam que o parque é a principal fonte desta ordem no PAC, mas a distorção por ele produzida é bem menor que o limite individual permitido. Verifica-se ainda o efeito dos filtros na redução das distorções.

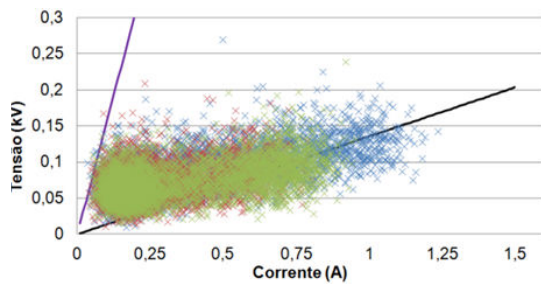


Figura 9a – V2h versus I2h SFA

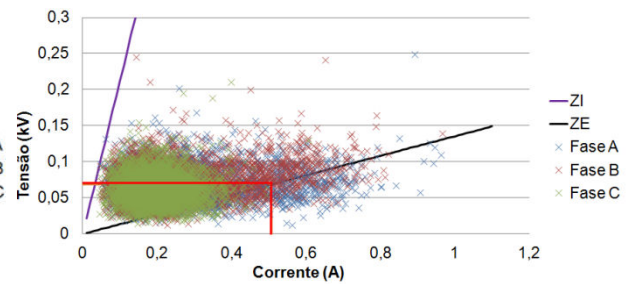


Figura 9b – V2h versus I2h CFA

A Figura 10a apresenta um gráfico de correlação entre tensão de 4ª ordem e potência despachada pelos parques no caso CFA. A correlação entre as grandezas na fase A é 0,441, indicando uma correlação moderada, o percentil 95 da tensão é 0,076 % (0,101 kV). Calculando a emissão dos parques para a 4ª ordem com a Equação 3 se obtém 0,041 %. A Figura 10b mostra o gráfico da magnitude da distorção harmônica de tensão vs magnitude da corrente harmônica de 4ª ordem junto com as retas ZI e ZE na condição CFA. Nesta figura é possível observar que a nuvem de pontos VxI está mais próxima da impedância ZE, indicando que a fonte dominante para esta ordem é o parque. Calculando a emissão dos parques com o percentil 95 dos valores de corrente harmônica medidos vezes a impedância ZE se obtém 0,052 % (0,068 kV). Novamente, mesmo o parque sendo o principal emissor da 4ª ordem harmônica, tanto o percentil 95 das tensões U_h medidas como os valores calculados de emissão dos parques são bem inferiores aos limites permitidos.

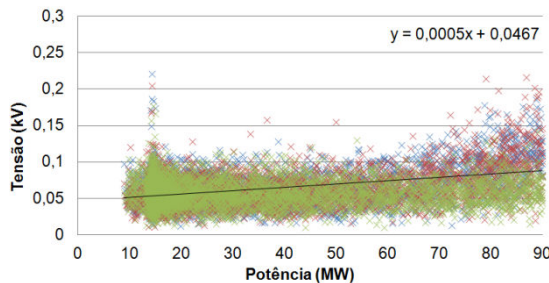


Figura 10a – V4h versus potência CFA

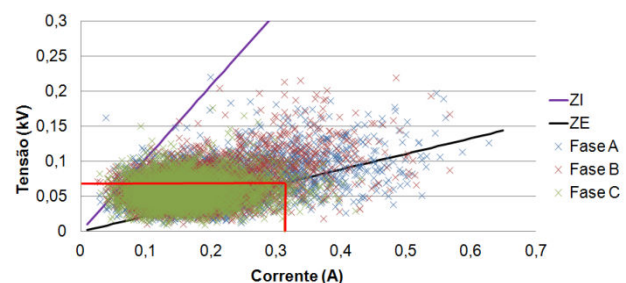


Figura 10b – V4h versus I4h CFA

As Figuras 11a e 11b mostram gráficos da magnitude da distorção harmônica de tensão vs magnitude da corrente harmônica de 5ª ordem junto com as retas ZI e ZE para as condições SFA e CFA. Em ambas as condições a nuvem de pontos VxI está bem próxima da impedância ZI, indicando que a fonte dominante para esta ordem é a rede externa. Calculando a emissão dos parques com o percentil 95 dos valores de corrente harmônica medidos vezes a impedância ZE se obtém 2,743 % (3,64 kV) para a condição SFA e 2,205 % (2,93 kV) para a condição CFA. Estes resultados são incoerentes com os resultados e conclusões da seção 4.1, onde se demonstrou que o efeito do parque sobre a distorção de 5ª ordem no PAC é mínimo. Este nível de emissão não deve ser atribuído ao parque, pois a corrente I_h neste caso é prioritariamente oriunda da rede.

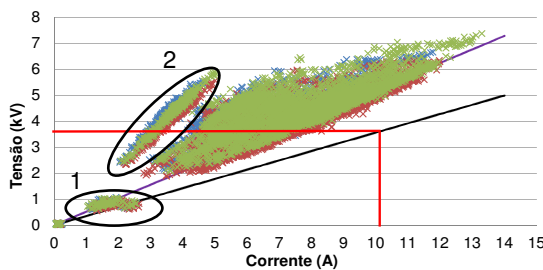


Figura 11a – V5h versus I5h SFA

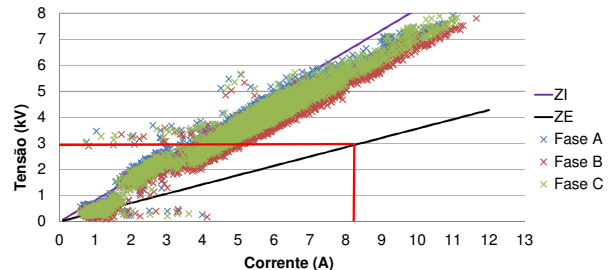


Figura 11b – V5h versus I5h CFA

Vale reparar ainda na Figura 11a a existência de três regiões distintas na nuvem de pontos VxI, os pontos próximos a reta ZI representam a condição normal de operação do parque, os pontos na região 1 ocorrem na mesma condição anterior, mas com a conversora de Rivera operando e os pontos na região 2 ocorrem quando a rede de média tensão do parque e os aerogeradores estão desligados, ficando energizados apenas a LT 230 kV e os transformadores 230/34,5 kV de uso exclusivo dos parques. É interessante observar que mesmo com o parque desligado e correntes de 5ª ordem bem menores ainda se mantém distorções bastante elevadas, bem como o efeito da conversora na redução das distorções.

Outro efeito interessante pode ser observado nas Figuras 12a e 12b, que apresentam gráficos de correlação entre tensão de 7ª ordem e potência despachada pelos parques nos casos SFA e CFA. As correlações entre as grandezas são, respectivamente, -0,483 e -0,163, indicando uma correlação negativa entre as grandezas, ou seja,

os aerogeradores contribuiriam para a redução da distorção de 7ª ordem. O mesmo efeito é verificado para a 5ª ordem.

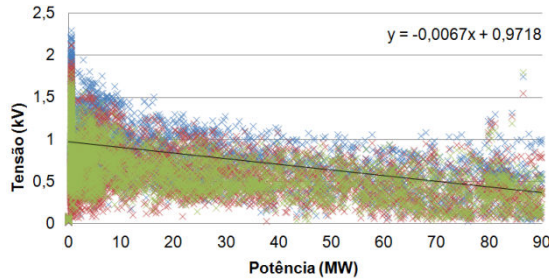


Figura 12a – V7h versus potência CFA

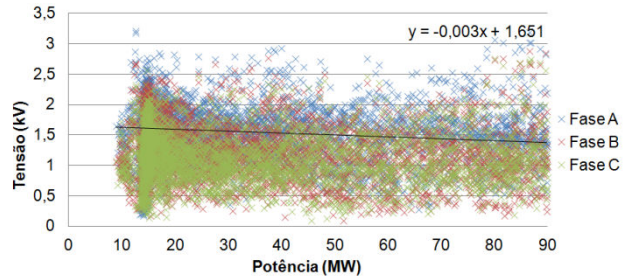


Figura 12b – V7h versus potência CFA

5.0 - CONCLUSÃO

O artigo apresentou resumidamente a regulamentação existente no Brasil do ponto de vista de harmônicos e uma referência internacional recente para a análise de medições de tensões e correntes harmônicas como forma de identificar as fontes dominantes na emissão de harmônicos em um dado PAC.

A análise dos eventos apresentados no estudo de caso em conjunto com as técnicas propostas na BT 468 permitem concluir que os elevados níveis de distorção existentes no PAC do complexo eólico em análise, especialmente do 5º harmônico e o DTHT, não são provocados pelas emissões de corrente dos aerogeradores. Os resultados obtidos demonstram que ordens como a 2ª e a 4ª são geradas prioritariamente pelos parques ou contribuem com parcela significativa para a distorção total, embora tanto os níveis de emissão calculados como a distorção total destas ordens sejam muito baixos. Por outro lado, as técnicas da BT 468 e os eventos de desligamento dos parques indicam que as tensões de 5ª e 7ª ordem são geradas predominantemente pela rede. Além disto, de acordo com as correlações negativas entre potência despachada pelo parque e tensões harmônicas de 5ª e 7ª ordem, os parques contribuiriam para a redução das distorções destas ordens.

O artigo apresenta uma boa adequação entre o cálculo da impedância harmônica via simulação computacional e a medição da impedância harmônica vista do PAC. Tal resultado, que confirma o cálculo teórico pela medição prática, indica que um eventual caminho para simplificação da regulamentação concernente a harmônicos seja se usar a impedância obtida em caso representativo como um sinalizador preferencial no cálculo do desempenho harmônico.

As técnicas analisadas são ferramentas úteis e válidas tanto para avaliações qualitativas quanto quantitativas das emissões, mas seus resultados dependem da qualidade das medições e das impedâncias calculadas por simulação.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) <http://www.portalabeeolica.org.br>

(2) R.P.D. Ross, A. J. de C. Mello, L. F. W. de Souza, "Análise Harmônica para Conexão de Parques Eólicos: Medição e Simulação", XII SEPOPE, Maio de 2012.

(3) M.P. De Carli, B.T. Meyer, R.E.S. Ristow, R. Antunes, R.P.D. Ross. "Influência da Definição do Lugar Geométrico das Impedâncias nos Estudos de Desempenho Harmônico Associados a Usinas Eólicas", XV ERIAC, Foz do Iguaçu, Maio de 2013

(4) R.P.D. Ross, A. J. de C. Mello, M.P. De Carli, B.T. Meyer. "Tensões e Correntes Harmônicas Resultantes da Conexão de Parques Eólicos com a Rede Elétrica – Interação entre a Emissão de Diversos Acessantes", XIII SEPOPE, Foz do Iguaçu, Maio de 2014.

(5) Technical Brochure 468, "Review of Disturbances Emission Assessment Techniques", Cigré-Cired Working Group C4-109, June 2011.

(6) ONS RE 2.1 057/2008 rev.3 – "Instruções para Realizações de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica". Disponível em <http://www.ons.org.br>, janeiro de 2013

(7) ONS. Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, "Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores". Disponível em <http://www.ons.org.br>, novembro de 2011.

(8) IEC/TR 62001: Guide to the specification and design evaluation of AC filters for high-voltage direct current (HVDC) systems. Frankfurt, 2009.

(9) 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.

(10) International Standard IEC 61000-3-6, 2nd. Ed., 2008. "Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-6: Assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installations to MV, HV and EHV Power Systems".

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Miguel Pires De Carli 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 Penido D. Ross, é graduado como engenheiro eletricista em 1977 pela PUC-RJ. Obteve seu mestrado no ano de 1982 pela mesma instituição. Trabalha no CEPEL desde 1985, como pesquisador e atualmente ocupa a função de chefe do departamento de Tecnologia de Distribuição. Suas principais áreas de interesse são qualidade de energia elétrica, estudos de sistemas elétricos, tecnologia de distribuição e redes elétricas inteligentes.



Alex Jean de Castro Mello, é graduado como engenheiro eletrônico em 1990 pelas Faculdades Nuno Lisboa. Obteve seu mestrado no ano de 2000 em engenharia elétrica, com ênfase em eletrônica de potência, na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL desde 1984, onde atualmente atua como Pesquisador. Suas principais áreas de interesse são qualidade de energia e aplicações de eletrônica de potência.