



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Melhorias do Processo de Gerenciamento de Qualidade de Energia do Operador Nacional do Sistema Elétrico face ao aumento das fontes de energias renováveis no Sistema Interligado Nacional

FABIANO ANDRADE DE OLIVEIRA(1); JAQUELINE GOMES PEREIRA(1);
ONS(1);

RESUMO

O presente artigo apresenta algumas melhorias no processo de gerenciamento de Qualidade de Energia do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e uma avaliação decorrente das suas implementações sob os aspectos de Estudos e também das Campanhas de Medição devido à operação das fontes de energias renováveis no Sistema Interligado Nacional (SIN) envolvendo equipamentos de compensação reativa: bancos de capacitores e filtros de correntes harmônicas, além dos próprios transformadores de instrumentos presentes nas subestações e utilizados para realizar uma campanha de qualidade de energia.

Essas melhorias se fazem necessárias para que o ONS possa aprimorar os requisitos de qualidade de energia e, portanto, gerenciar esses indicadores, de forma que mais acessantes possam se conectar à Rede Básica garantindo a aplicação de soluções mitigadoras para reduzir a propagação de uma tensão com conteúdo harmônico acima dos limites aceitáveis pelos Procedimentos de Rede.

PALAVRAS-CHAVE

Processo de Gerenciamento, Qualidade de Energia, Fontes de Energias Renováveis, Distorção Harmônica de Tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

As fontes de energias renováveis estão cada vez mais presentes nos mercados do setor elétrico e constituem nichos crescentes de negócios para o fornecimento de uma energia limpa e sustentável, contribuindo sobretudo, para a redução da emissão de carbono na atmosfera. Todavia, essas mesmas fontes de energias, caso das Centrais Eólicas e Fotovoltaicas, têm contribuído de modo gradativo para uma deterioração da forma de onda de tensão e, por conseguinte, na qualidade do fornecimento de energia elétrica. Neste sentido, o ONS vem aprimorando continuamente o processo de gerenciamento de Qualidade de Energia, através de discussões com o Grupo de Trabalho (GT ABEEólica) e participantes afins do setor elétrico, em especial, aqueles relacionados às Eólicas e às Fotovoltaicas para que a operação dessas fontes de energias renováveis sejam supridas de soluções mitigadoras para reduzir a propagação de uma tensão com conteúdo harmônico acima dos limites aceitáveis pelos Procedimentos de Rede.

Além de algumas melhorias de gerenciamento da qualidade de energia que são mencionadas nesse artigo e, atualmente descritas no documento [4], pretende-se realizar uma avaliação decorrente dessas implementações abrangendo, fundamentalmente os aspectos voltados para área de Estudos e também para as Campanhas de Medição. Na parte dos estudos de desempenho harmônico, os resultados apresentados nesse artigo são obtidos através de análises de sensibilidade (deslocamentos dos pontos de impedância harmônica) e dos valores resultantes de distorção harmônica de tensão resultantes devido à influência de equipamentos de compensação

reativa (bancos de capacitores) com a representação detalhada dos parâmetros que estão próximos à área de estudo. Esse estudo, por sua vez, utilizou-se da ferramenta computacional HarmZs, cujo objetivo principal foi mostrar a importância de se considerar os bancos de capacitores e a influência desses equipamentos sobre os filtros existentes e futuros próximos à região do empreendimento no quesito dimensionamento final dos filtros de correntes harmônicas. Quanto à parte das campanhas de medição, é ressaltado a necessidade da correção das medições ao se utilizar transformadores de potencial indutivo e capacitivo (transdutores que não apresentam uma resposta linear para faixas de frequência acima da fundamental) com destaque para as causas e dos problemas decorrentes da não aplicação dessas correções.

2.0 - IMPORTÂNCIA DA NECESSIDADE DE REPRESENTAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES COM OS PARÂMETROS REAIS DOS FILTROS DE CORRENTES HARMÔNICAS E SEUS EFEITOS NOS ESTUDOS DE QUALIDADE DE ENERGIA

A influência dos equipamentos de compensação reativa capacitiva (bancos de capacitores), no que diz respeito à sua operação e/ou manobra, acarretam perturbações ao sistema elétrico, sendo uma delas refletidas diretamente no dimensionamento do(s) filtro(s) do empreendimento, por exemplo, *na definição da sua potência reativa final e dos seus componentes*, principalmente por causarem deslocamentos dos pontos de ressonância (pontos de alta impedância) que resultam em sobretensões prejudiciais para os seus componentes *como também para seus equipamentos de manobra, como os disjuntores dos próprios parques eólicos/fotovoltaicos*. Essas sobretensões são consequências dos altos valores de distorções harmônicas de tensão decorrentes de impedâncias harmônicas de elevada magnitude que podem ser previsíveis no sistema elétrico, quando da presença e operação de bancos de capacitores sobre os demais equipamentos da subestação, principalmente sobre a solução de filtragem do empreendimento.

Dessa forma, com o intuito de reforçar a relevância do impacto da representação dos bancos de capacitores com os parâmetros reais dos filtros de correntes harmônicas em estudos de desempenho harmônico [4], foram feitas simulações computacionais utilizando dados de um parque eólico real, onde foram considerados as informações de sua Rede Interna e da Rede Externa [4]. O diagrama unifilar simplificado do sistema de transmissão na região de acesso desse trabalho pode ser verificada na Figura 1, a qual compreende um empreendimento conectado ao barramento de 230 kV da SE Juazeiro da Bahia II:

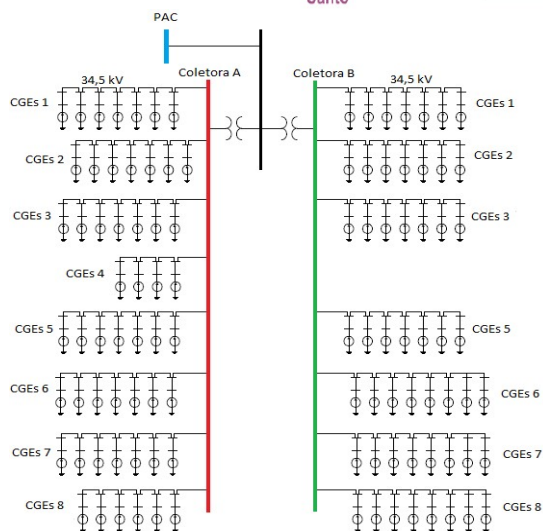


FIGURA 1 – Diagrama unifilar simplificado do sistema de transmissão na região de acesso em estudo e a Rede Interna do empreendimento.

O complexo eólico analisado compreendeu 104 aerogeradores (90 unidades inicialmente e mais 14 unidades após ampliação) com uma potência total de 209,4 MW (180 MW no início e mais 29,4 MW acrescentadas posteriormente), envolvendo 02 tipos de máquinas, ambas DFIG, porém de fabricantes distintos com potências cada uma de 2,0 MW e 2,1 MW, respectivamente. Inicialmente, o complexo eólico necessitava para correção de fator de potência de 2 conjuntos de bancos de capacitores de potência 35 Mvar/34,5 kV (2 x 17,5 Mvar/34,5 kV) conectados cada um nas coletoras A e B do empreendimento. Com a ampliação foram necessários mais 02 conjuntos de 5 Mvar/34,5 kV de bancos de capacitores, também para correção de fator de potência e conectados em cada coletora. As coletoras se conectam a um outro barramento, e por sua vez, através de uma linha de transmissão em 230 kV, circuito simples de extensão aproximada de 90 km interliga à SE Juazeiro da Bahia II 230 kV. Houve a necessidade também de filtros de correntes harmônicas de ordens pares e ímpares de potência total de 3,185 Mvar/34,5 kV (sendo 05 filtros de ordem par (2x2ª, 2x4ª e 1x8ª ordens harmônicas) e potência total de 2,738 Mvar/34,5 kV e 01 filtro de ordem ímpar (3ª ordem harmônica) e potência de 0,447 Mvar/34,5 kV).

Com o intuito de se avaliar a influência e a importância de se representar os bancos de capacitores nos estudos de desempenho harmônico e também suas interações com a representação completa (incluindo todos os parâmetros) dos filtros de correntes harmônicas propostos para o empreendimento em análise, foram realizadas simulações computacionais que, além de mostrarem os deslocamentos inerentes dos pontos de ressonâncias paralelas, esses equipamentos são muitas vezes, os responsáveis pelas violações dos níveis de distorção harmônica de tensão estabelecidos pelo documento [4].

Para tanto, o estudo foi dividido basicamente em 03 situações, os quais mostram as variações das impedâncias harmônicas do sistema (Rede Interna e Externa), ou seja, a resposta em frequência devido à entrada dos equipamentos de compensação de reativos:

- a) Situação 01 – Sistema em análise sem bancos de capacitores;
- b) Situação 02 – Sistema em análise com bancos de capacitores ;
- c) Situação 03 – Sistema em análise com bancos de capacitores e com a representação completa dos componentes dos filtros de correntes harmônicas;

Para a situação 02 foram consideradas as configurações de bancos de capacitores, antes e após a ampliação do empreendimento, considerando, portanto, o fornecimento dos estágios de bancos de capacitores. Para tanto, foram estudadas as seguintes condições:

- b.1) Instalação com 01 estágio de bancos capacitores de 17,5 Mvar em cada coletora A e B;
- b.2) Instalação de um banco de capacitores de 35 Mvar (2 x 17,5 Mvar) somente na coletora A ou na coletora B;
- b.3) Instalação de um banco de capacitores de 35 Mvar em cada coletora A e B;
- b.4) Instalação dos bancos de capacitores de 35+5 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B;

Para a situação 03 foram considerados os bancos de capacitores do empreendimento e também dos filtros de correntes harmônicas propostos para minimizar os problemas das distorções harmônicas de tensão. Foram analisadas as condições abaixo que evidenciam, claramente a influência do montante significativo de reativo dos bancos de capacitores sobre um valor de reativo muito reduzido dos filtros de correntes harmônicas:

- c.1) Instalação de um banco capacitores de 17,5 Mvar e com um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B (com a presença de todos os filtros e somente com o filtro de 3ª harmônica);
- c.2) Instalação de um banco capacitores de 35 Mvar e com um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B (com a presença de todos os filtros e somente com o filtro de 3ª harmônica);
- c.3) Instalação de um banco capacitores de 35 Mvar na coletora A e sem um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B (com a presença de todos os filtros e somente com o filtro de 3ª harmônica);
- c.4) Instalação de um banco capacitores de 35 Mvar na coletora A e com um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B e somente o filtro de 3ª harmônica.

2.1 Situação 1: Sistema de análise sem bancos de capacitores

Nesse primeiro caso é verificado pontos previsíveis de ressonância para as faixas de harmônicas 23-24, 32-33 e 37 com magnitudes de impedância harmônica alcançando a ordem de 35 p.u. Foi violada a distorção harmônica de tensão individual de 8ª ordem com valor resultante de 0,45% para a metodologia alternativa de lugar geométrico (LG) “Polígono de n lados”, recentemente utilizada para parques eólicos/fotovoltaicos [4].

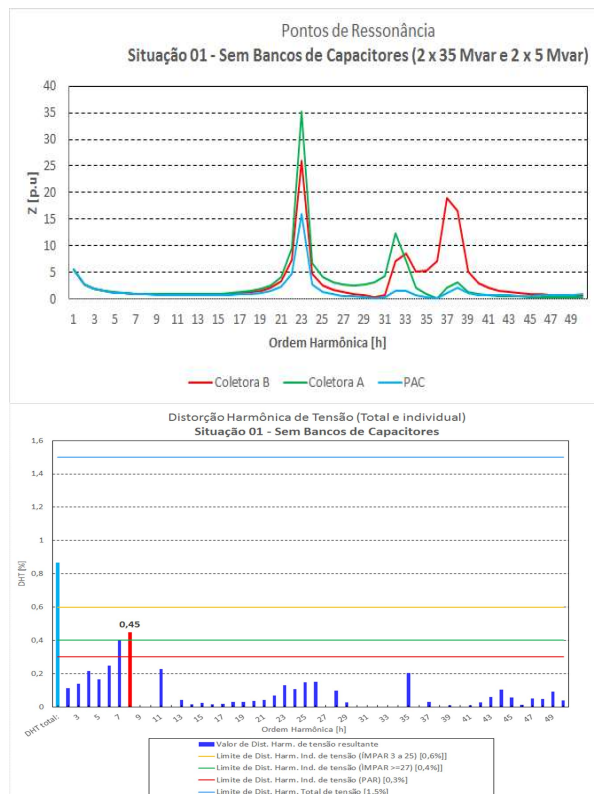


FIGURA 2 - Complexo Eólico sem Bancos de Capacitores – Situação 01.

2.2 Situação 02 – Sistema de análise com bancos de capacitores

2.2.1 Instalação com 01 estágio de bancos capacitores de 17,5 Mvar em cada coletora A e B

A situação 2 abrangeu a presença de um banco de capacitores de 35 Mvar/34,5 kV formado por 2 estágios de 17,5 Mvar/34,5 kV em cada coletora A e B. A Figura 3 ilustra o deslocamento do ponto de ressonância com uma magnitude de impedância harmônica resultante de 45 p.u para o barramento diferente das coletores A e B. Os valores das impedâncias harmônicas atingiram patamares que variaram de 5 e 31 p.u, mas que devido às correntes harmônicas de mesmas ordens apresentarem valores praticamente zero, não houve, portanto, problemas de sobretensões nos barramento das coletores devido a essas ordens harmônicas. Por outro lado, houve violação de tensão harmônica de 0,98% para a 4ª ordem harmônica.

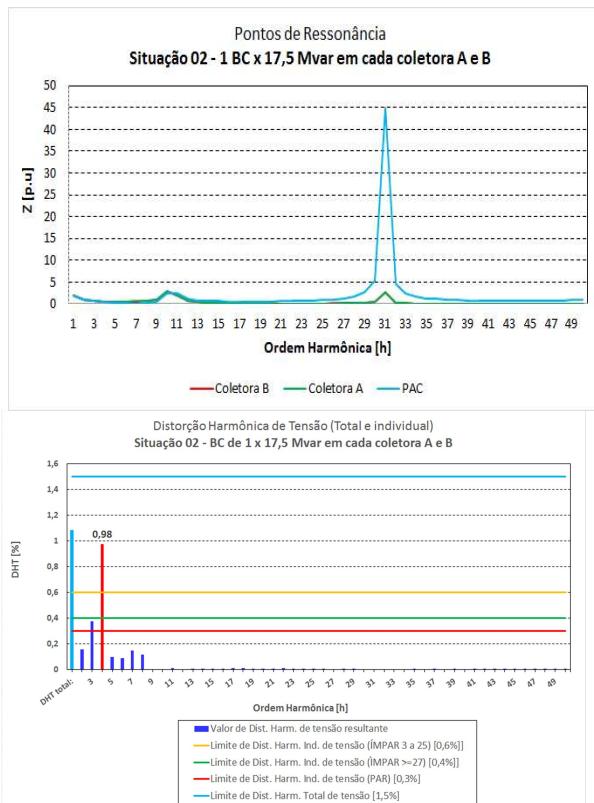


FIGURA 3 - Complexo Eólico com Bancos de Capacitores – Situação 02 (b.1).

2.2.2 Instalação de um banco de capacitores de 35 var (2 x 17,5 Mvar) somente na coletora A ou na coletora B

Essa situação propiciou novos deslocamentos do ponto de ressonância com valores de impedância máxima da ordem de 50 p.u (27ª ordem harmônica) e outras menores de valores 10 p.u (8ª ordem harmônica) e 20 p.u (37ª ordem harmônica) refletidos na coletora B. Por outro lado, quando o banco de capacitores de 35 Mvar operava somente na coletora B, as impedâncias harmônicas alcançaram patamares de 190 p.u (25ª ordem harmônica) e outros de menor magnitude de valores de 9 p.u (8ª ordem harmônica) e 48 p.u (34ª ordem harmônica). Todavia, esses valores altos de impedâncias harmônicas não foram suficientes para provocarem valores de distorção harmônica que ultrapassassem os limites estabelecidos pelo submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede. A Figura 4 mostra nitidamente os deslocamentos dos pontos de maior impedância harmônica pelo simples fato da inserção de um banco de capacitores formado por 02 estágios de 17,5 Mvar em cada coletora A e B.

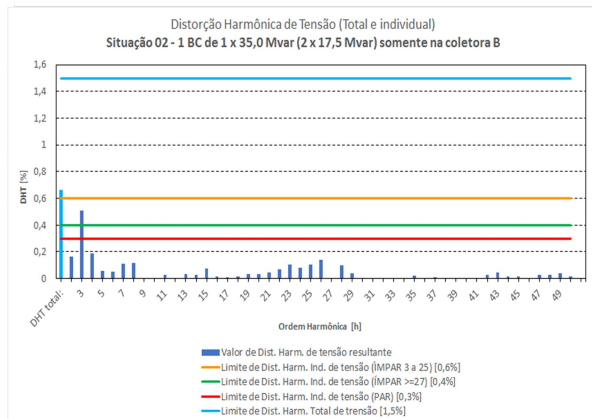
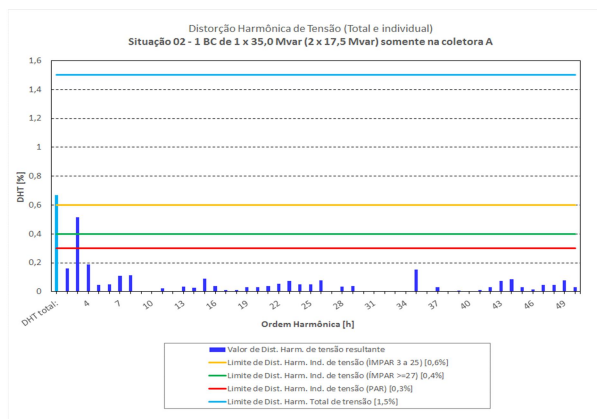
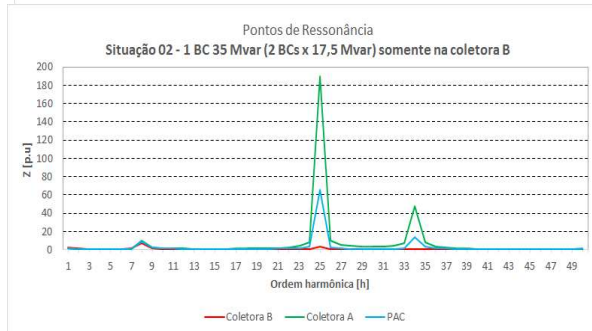
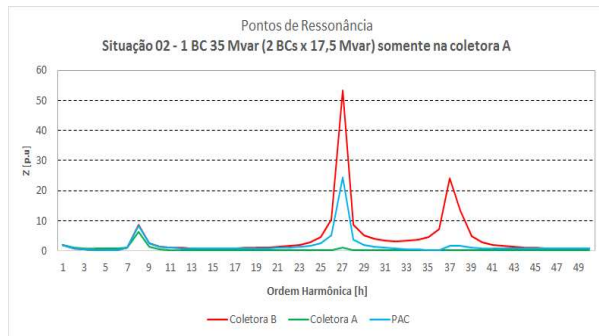


FIGURA 4 - Complexo Eólico com Bancos de Capacitores – Situação 02 (b.2).

2.2.3 Instalação de um banco de capacitores de 35 Mvar em cada coletora A e B

Para a situação em que há um banco de capacitores de 35 Mvar/34,5 kV em cada coletora A e B, o deslocamento do ponto de ressonância mais acentuado foi verificado para a 10ª e 31ª ordens harmônicas com magnitudes de impedância harmônica variando de 5 a 26 [p.u] para o ponto de acoplamento comum (PAC),

enquanto que para as barras coletoras A e B os valores de impedância harmônica mantiveram-se nos patamares de 1,74 p.u (10ª ordem harmônica) e 0,8 p.u (31ª ordem harmônica). Quanto à distorção harmônica de tensão, os bancos de capacitores foram suficientes para provocarem uma violação da 3ª ordem harmônica de 1,01%, muito acima do limite permitido para ordens ímpares de 0,6% estabelecido pelo submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede e, conforme a análise de desempenho harmônico da instalação para essa condição sistêmica. A Figura 5 ilustra os pontos de maior impedância harmônica devido à presença de um banco de capacitores de 35 Mvar em cada coletora A e B.

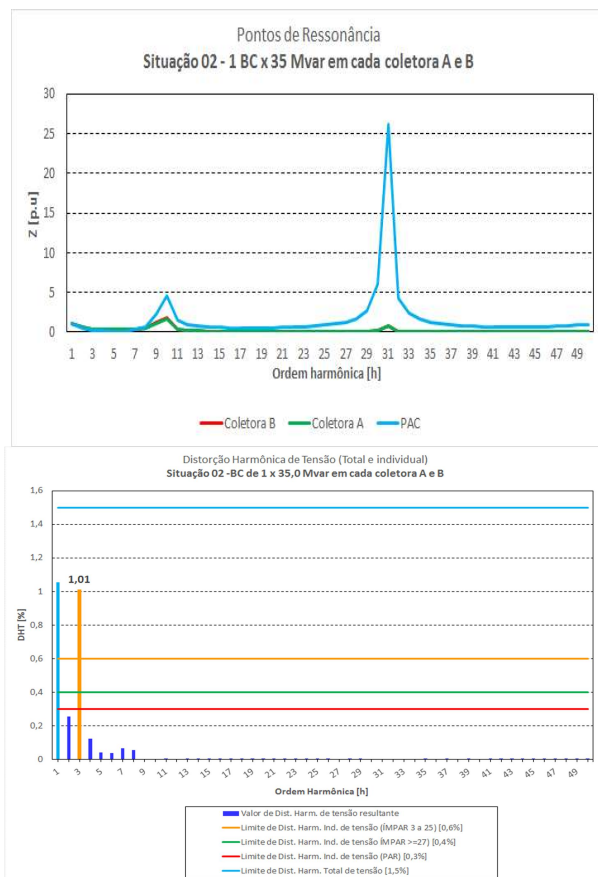


FIGURA 5 - Complexo Eólico com Bancos de Capacitores – Situação 02 (b.3).

2.2.4 Instalação dos bancos de capacitores de 35+5 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B

A inserção de mais 05 Mvar/34,5 kV em cada coletora A e B para correção de fator de potência da instalação foi devido à entrada de novas centrais eólicas no empreendimento e, nesse caso, não foi suficiente para mudar o estado da situação anterior, no que se refere aos pontos de maior impedância harmônica como também para as ordens harmônicas correlacionadas. Entretanto, o adicional de 5 Mvar em cada coletora A e B ultrapassou o limite permitido para a 2ª ordem harmônica reforçando mais uma vez que, além da previsibilidade das condições do sistema de ocorrer problemas de sobretensão em equipamentos devido a determinadas ordens harmônicas, uma análise mais cuidadosa da influência de bancos de capacitores com fontes não lineares deve ser sempre verificada para se evitar posteriormente a queima de equipamentos.

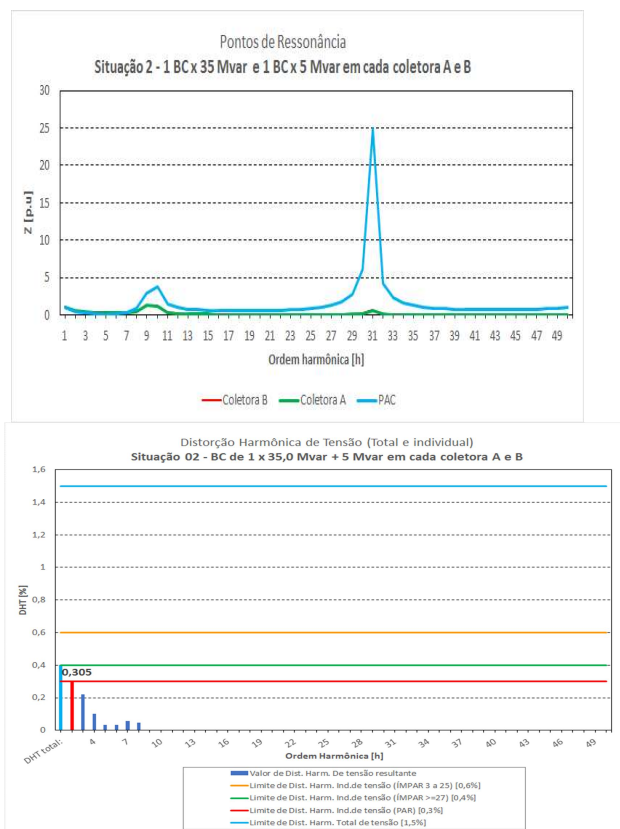


FIGURA 6 - Complexo Eólico com Bancos de Capacitores – Situação 02 (b.4).

Dentre as várias combinações que podem ser realizadas com os bancos de capacitores existentes (2 x 35 Mvar) em cada coletora A e B e com os bancos de capacitores adicionais (2 x 4,56 Mvar) também distribuídos em cada coletora, foi verificado que os resultados encontrados da interação desses equipamentos de compensação reativa com os filtros previstos e o proposto (3ª ordem harmônica) devido à ampliação tendem a apresentar problemas de distorção harmônica de tensão. Os gráficos reforçam dessa forma, a importância de se representar os parâmetros dos filtros (RLC) ao operar com os bancos de capacitores da instalação, com o objetivo de se avaliar tanto o desempenho harmônico na época de estudo, como o dimensionamento final de fornecimento dos filtros, do ponto de vista de “rating” de seus componentes.

2.3 Situação 03 – Sistema em análise com bancos de capacitores e filtros de correntes harmônicas

2.3.1 Instalação de um banco capacitores de 17,5 Mvar e com um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B (com a presença de todos os filtros e somente com o filtro de 3ª harmônica)

Seguindo de forma análoga às condições de simulações dos casos anteriores e com o propósito de simplificar a apresentação dos resultados, as informações quanto aos pontos de maior impedância harmônica e suas respectivas distorções harmônicas de tensão serão apenas relatadas e destacadas graficamente, exclusivamente quando necessitarem de maiores esclarecimentos.

Dessa forma, para o caso em análise, os valores de impedância harmônica atingiram valores mais elevados para 10ª (10,16 p.u) e 31ª (34,81 p.u) ordens harmônicas na presença dos filtros e com valor um pouco mais alto para a 10ª ordem harmônica (12,06 p.u) quando da presença somente do filtro de 3ª harmônica. E referente às distorções harmônicas para ambos os casos, essas permaneceram abaixo dos limites estabelecidos pelo SM 2.8.

2.3.2 Instalação de um banco capacitores de 35 Mvar e com um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B (com a presença de todos os filtros e somente com o filtro de 3ª harmônica)

Para essa configuração do sistema não houve diferenças significativas quando comparadas à anterior, tanto para a parte de impedâncias harmônicas (valores de pico) como para de distorções harmônicas de tensão, as quais permaneceram abaixo dos limites aceitáveis do Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede. Tal fato pode ser explicado pelos altos valores de potência reativa dos bancos de capacitores quando comparados com as dos filtros.

2.3.3 Instalação de um banco capacitores de 35 Mvar na coletora A e sem um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B (com a presença de todos os filtros e somente com o filtro de 3ª harmônica)

A retirada do banco de capacitores de 4,56 Mvar de cada coletora A e B foi suficiente para provocar grandes variações de impedâncias harmônicas, que se intensificaram em uma determinada ordem harmônica (27ª) considerando a presença de todos os filtros com valor de 140 p.u., ao passo que, somente com o filtro de 3ª harmônica e para a mesma ordem harmônica se atingiu o valor de 60 p.u. e de 8,1 p.u. (8ª ordem harmônica), conforme pode ser verificado na Figura 7 a seguir. Outros pontos de ressonância surgiram também nessa condição, destacando-se a 38ª ordem harmônica com 26 p.u. de amplitude quando todos os filtros estão conectados e a 37ª ordem harmônica com um valor de impedância harmônica de 22 p.u. As distorções harmônicas resultantes para essa situação mantiveram-se dentro dos limites aceitáveis e, por isso, não foram mostradas para esse caso. Vale ressaltar que para as altas impedâncias harmônicas encontradas nessa análise não houveram violações dos limites de distorção harmônica de tensão harmônica, pois os valores de correntes harmônicas para essas ordens, em particular, foram praticamente nulos.

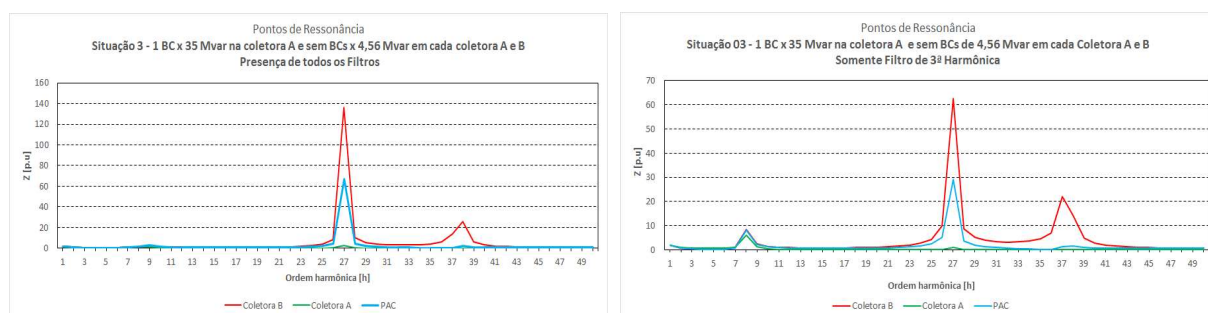


FIGURA 7 - Complexo Eólico com Bancos de Capacitores e Filtros – Situação 03 (c.3).

2.3.4 Instalação de um banco capacitores de 35 Mvar na coletora A e com um banco de 4,56 Mvar (banco adicional) em cada coletora A e B e somente o filtro de 3ª harmônica

Para esse caso estudado, os altos picos de impedância harmônica se assemelharam com os do caso anterior ao inserir o banco de 4,56 Mvar, todavia com a presença somente do filtro de 3ª ordem harmônica, ainda não foi possível limitar a distorção harmônica de tensão dentro de limite de 0,6% determinado para essa ordem harmônica. Os valores de distorção harmônica de tensão obtidos foram de 0,77% e 0,79%, caracterizando as condições com todos os filtros e somente com o filtro de 3ª harmônica, respectivamente. Esse caso real expressa, de forma clara, uma das motivações para a apresentação desse trabalho, ressaltando a necessidade da representação detalhada dos parâmetros dos filtros presentes e projetados para um determinado empreendimento, quando na presença de bancos de capacitores no âmbito das distorções harmônicas de tensão e da interação com a Rede Básica.

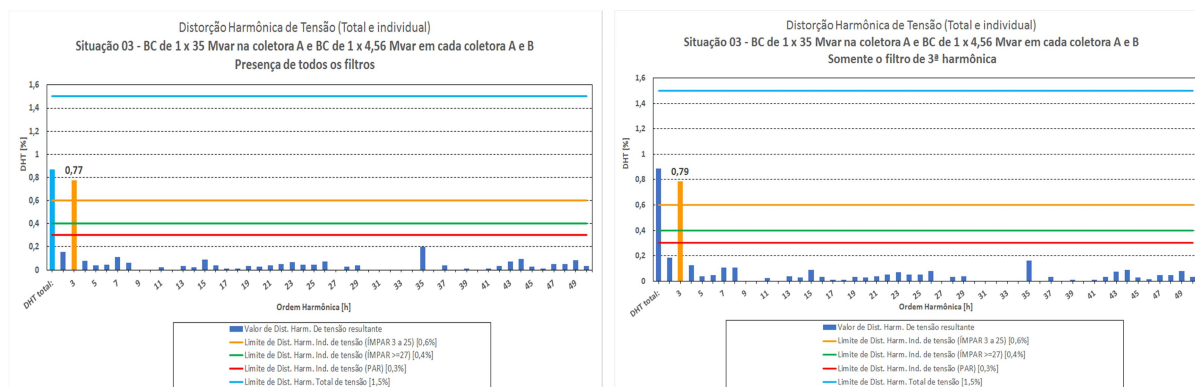


FIGURA 8 - Complexo Eólico com Bancos de Capacitores e Filtros – Situação 03 (c.4).

3.0 - CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA – NECESSIDADE DA CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO CAUSADAS POR INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO TIPO TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVO (TPI) E CAPACITIVO (TPC)

O processo de qualidade de energia do ONS exige atualmente a realização de campanhas de medição de tensão e, para o caso de fontes de energia renováveis, também as de corrente para a entrada e operação de sistemas não lineares à Rede Básica. Essas campanhas fazem parte de uma etapa complementar aos estudos de desempenho harmônico e, também para a liberação de documentos de atendimento emitidos pelo Operador para cada fase de implementação de novo empreendimento. Para tanto, a emissão desses documentos estão vinculados a vários submódulos dos Procedimentos de Rede, dentre eles e em particular para as fontes de energia renováveis, os sumódulos 3.3 [1], 24.2 [2], 2.8 [3] e a NT009/2016 [4].

Quanto à realização das campanhas de medição de qualidade de energia, algumas observações devem ser destacadas, dentre as quais, as que afetam diretamente os resultados a serem medidos que são os equipamentos de medição aptos a realizarem tais medições e os problemas decorrentes da utilização de transformadores de instrumentos de medição do tipo potencial indutivo e capacitivo. Com respeito aos equipamentos de medição de qualidade de energia, esses devem ser classificados como Classe A, com certificação obtida por laboratório nacional ou internacional credenciado em atendimento à IEC 61000-4-30 [5]. Esses equipamentos, por sua vez, estão sempre sendo atualizados, conforme documento [6] disponibilizado na página da internet do ONS. Quanto aos transformadores de instrumento que são utilizados nas campanhas de medição deve-se atentar, portanto, com respeito aos transdutores de tensão que encontrados ou que estão disponibilizados na maioria das subestações para a realização de uma campanha de medição de qualidade de energia. Além das principais normas técnicas indicadas para medições que envolvem harmônicas de tensão (IEC 61000-4-7 [7]) e corrente (IEC 61400-21 [8]), a IEC 61869-103 [9] estabelece as recomendações/precauções que devem ser seguidas quando são envolvidos transdutores do tipo TPI e TPC. Outros pontos adicionais e apenas mencionados nesse artigo são as formas alternativas de se realizar as campanhas de medição utilizando outros tipos de transdutores como: divisor de potencial capacitivo (DPC), divisor de potencial capacitivo resistivo (DPCR) e o tape capacitivo de bucha de transformador de potência ou de reator em derivação (TCB), inclusive o levantamento da curva de resposta em frequência dos transdutores TPI e TPC. Essas técnicas alternativas de correção da resposta em frequência para transdutores tipo TPI ou TPC são solicitadas pelo ONS aos Agentes e seu detalhamento pode ser verificado nos documentos [10] e [4]. A Figura 9 descreve, de forma sucinta, os comentários anteriores no tocante às práticas e recomendações mais comumente utilizadas pelas normas técnicas internacionais ao se utilizar transformadores de instrumento tipo TPI/TPC.

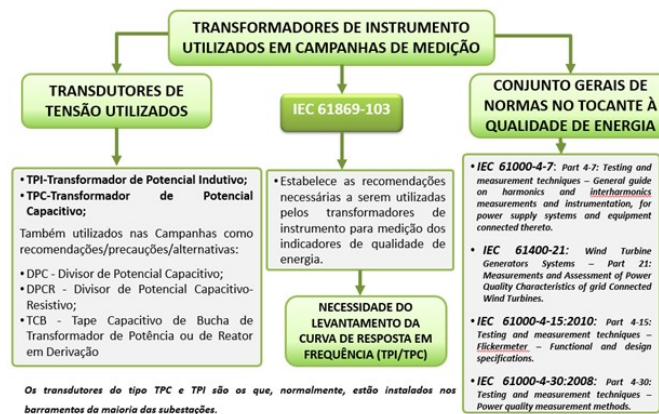


FIGURA 9 – Transformadores de Instrumento utilizados nas campanhas de medição.

De uma forma geral, os TPCs são desaconselháveis ou inadequados para medições de qualidade de energia, a menos que seja adotada outra forma de compensar a reconstrução do sinal primário devido ao seu comportamento *fortemente não linear* para frequências da ordem de centenas de Hz. O TPI, por sua vez, é projetado para ter um comportamento linear na faixa de amplitudes de sinal primário e na frequência nominal, de forma que, fora dessas faixas, seu comportamento não é padronizado, mesmo que as características de linearidade possam se estender além das faixas nominais. A não linearidade de resposta em frequência para esses tipos de transformadores é uma questão importante para a qualidade de energia (QEE), pois afetam diretamente o dimensionamento final dos equipamentos de compensação de reativos, sejam eles baseados em bancos de capacitores e filtros de correntes harmônicas.

No que diz respeito à visão geral do processo das campanhas de medição de QEE utilizando transdutores de tensão e praticados atualmente pelo ONS, a Figura 10 ilustra, resumidamente, as opções que devem ser verificadas, a fim de ser corrigir os valores medidos por transformadores de instrumento tipo TPI e TPC.

Especificamente para o TPC, destaca-se a aplicação de um dispositivo externo, conhecido como PQSensor™, que é um transdutor que pode ser adaptado em um TPC tradicional para fornecer uma saída linear e reproduzir adequadamente o espectro harmônico da tensão primária em alta tensão (AT).

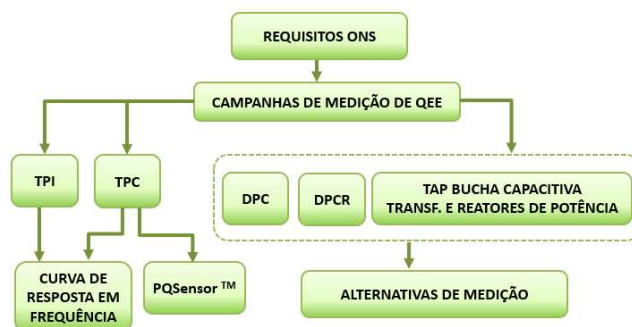


FIGURA 10 – Formas alternativas de realizar uma campanha de medição de qualidade de energia quando são utilizados transformadores de instrumento tipo TPI e TPC.

Considerando a importância do tema no que diz respeito à não linearidade da resposta em frequência dos transformadores de instrumento para a faixa de interesse de 3kHz nas campanhas de medição de QEE, esse artigo mostra somente a correção dos valores medidos através da aplicação do fator de correção (FC) obtido do levantamento da curva de resposta em frequência de alguns transformadores de potencial indutivo e capacitivo. Para tanto, será mostrado exemplos reais de resultados de distorção harmônica, antes e após a aplicação do FC, provocados por esses tipos de transformadores nas campanhas de medição de QEE e que fazem parte do processo de análise desempenho harmônico estabelecido pelo ONS.

3.1 Campanha de Medição - Valores de distorção harmônica de tensão sem e com a aplicação do (FC)

Com base na curva da resposta de frequência são obtidos os fatores de correção para cada ordem harmônica e, assim aplicados sobre os valores obtidos das medições para que dessa forma, os valores corrigidos expressem as reais distorções harmônicas encontradas no PAC. A Figura 11 ilustrada abaixo é um exemplo de levantamento da curva de resposta em frequência e a Tabela 1 mostra os valores de distorção harmônica de tensão individual para as principais ordens harmônicas, além da distorção harmônica total após a aplicação do fator de correção.

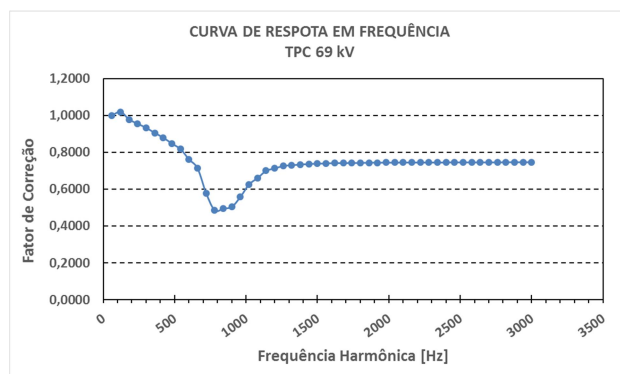


FIGURA 11 – Exemplo de obtenção da Curva de Resposta em Frequência.

TABELA 1 – Valores de distorção harmônica de tensão corrigidos com a curva de resposta em frequência.

Campanha Pré-tensão			Campanha Pós-tensão		
Índices DHT D95%	Valores SEM Correção	Valores COM Correção	Índices DHT D95%	Valores SEM Correção	Valores COM Correção
DTHTaD95%	1,23	1,46	DTHTaD95%	1,62	1,85
DTHTbD95%	1,84	2,17	DTHTbD95%	2,11	2,44
DTHTcD95%	1,58	1,81	DTHTcD95%	1,92	2,20
V5aD95%	0,62	0,67	V5aD95%	1,23	1,32
V5bD95%	0,82	0,88	V5bD95%	1,33	1,42
V5cD95%	0,80	0,86	V5cD95%	1,44	1,54
V7aD95%	1,10	1,25	V7aD95%	1,06	1,21
V7bD95%	1,68	1,91	V7bD95%	1,68	1,91
V7cD95%	1,35	1,54	V7cD95%	1,31	1,49
V11aD95%	0,17	0,24	V11aD95%	0,18	0,25
V11bD95%	0,19	0,27	V11bD95%	0,24	0,33
V11cD95%	0,15	0,22	V11cD95%	0,20	0,28
V13aD95%	0,10	0,16	V13aD95%	0,10	0,20
V13bD95%	0,07	0,21	V13bD95%	0,10	0,21
V13cD95%	0,00	0,15	V13cD95%	0,08	0,17

4.0 - CONCLUSÃO

A influência dos equipamentos de compensação reativa capacitiva (bancos de capacitores), no que diz respeito à sua operação e/ou manobra, acarretam perturbações ao sistema elétrico, sendo uma delas refletidas diretamente no dimensionamento do(s) filtro(s) do empreendimento, por exemplo na definição da sua potência reativa final e dos seus componentes, principalmente por causarem deslocamentos dos pontos de ressonância (pontos de alta impedância) que resultam em sobretensões prejudiciais para os seus componentes e para os próprios parques eólicos/fotovoltaicos. Essas sobretensões são consequências dos altos valores de distorções harmônicas de tensão presentes no sistema elétrico, quando da presença de bancos de capacitores sobre os demais equipamentos de filtragem.

Em relação à representação detalhada dos parâmetros e operação dos filtros e que estão instalados próximos à área de estudo, verifica-se que seus efeitos também têm influência direta sobre o dimensionamento do(s) futuro(s) filtro(s) da instalação e, portanto, no cálculo final de seus componentes e de uma solução de filtragem mais otimizada. Essa tratativa possibilita, obter resultados mais realísticos e em conformidade às reais necessidades do sistema elétrico, quando comparada àquela utilizada no passado em que os filtros eram representados somente pelas suas parcelas reativas capacitivas (dados provenientes dos estudos de fluxo de potência). Essa otimização é, portanto, o resultado final de uma análise crítica de um conjunto de fatores previsíveis para atender às reais necessidades do sistema elétrico no tocante aos requisitos de qualidade de energia. Do ponto de vista de medição, outras melhorias de gerenciamento têm sido implementadas e merecem ser destacadas, como a necessidade de correção dos valores medidos de uma campanha de tensão de qualidade de energia devido à resposta não linear dos transformadores de potencial indutivo (TPI) e capacitivo (TPC) para determinadas faixas de variação de frequência na operação desses equipamentos. Ressalta-se que as correções nas medições são recomendadas e exigidas atualmente pelo ONS nas campanhas de medição que informam sobre os níveis de distorção harmônica de tensão atualmente presentes no PAC. Os valores corrigidos dessas medições permitem um conhecimento das reais distorções de tensão do PAC, possibilitando a tomada de decisões mais assertivas relativas à prevenção e manutenção do sistema elétrico pelo Operador.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Submódulo 3.3 – Solicitação de Acesso," Procedimentos de Rede, 2017.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Submódulo 24.2 - Integração de uma instalação de geração ao Sistema Interligado Nacional," Procedimentos de Rede, 2017.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica da Rede Básica," Procedimentos de Rede, 2017.
- [4] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "NT009/2016 – Instruções para a realização de Estudos e Medições de QEE relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras," nº 2, 2018.
- [5] IEC 61000-4-30, "Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods".
- [6] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Lista de equipamentos certificados para uma campanha de medições de harmônicos, 2017.
- [7] IEC/TR 61000-4-7 – "Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto".
- [8] IEC 61400-21, "Wind Turbine Generators Systems – Part 21: Measurements and Assessment of Power Quality Characteristics of grid Connected Wind Turbines".
- [9] IEC/TR 61869-103 – "Instrument Transformers – The use of Transformer Instruments for Power Quality".
- [10] CEPEL e Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Re. ONS - 2.1-028/2005 - Definição das metodologias e procedimentos necessários às campanhas de medição dos indicadores de desempenho, Rio de Janeiro, 2007.



Fabiano Andrade de Oliveira possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia - MG (1992), pós-graduação em Qualidade de Energia (QEE) com ênfase em Flutuação de Tensão pela mesma Universidade (1994). Trabalhou na empresa Davnar do Brasil Ltda. (1994-1997) como Engenheiro de Aplicação na área de Compensação de Energia Reativa, QEE e suporte técnico a equipamentos de medição e análise de perturbações na distribuição. Trabalhou na empresa ABB (1997-2014) na elaboração de propostas técnicas/comerciais para Soluções Inovadoras de QEE e Compensação de Energia Reativa (Bancos de Capacitores & Filtros Harmônicos) e como Engenheiro Líder/Especialista em FACTS (CER e Bancos Série). Atualmente trabalha no

ONS como Engenheiro Especialista visando a Melhoria do Processo de QEE e Gerenciamento de Harmônicos na Rede Básica e coordenação do Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede e apoio técnico aos demais submódulos correlacionados.



Jaqueline Gomes Pereira graduou-se em Engenharia Elétrica em 2011 pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Possui pós-graduação em Geração de Energia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (2015). Obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ em 2019, na área de Qualidade de Energia Elétrica. Ingressou no Operador Nacional do Sistema Elétrico em 2013, onde atualmente trabalha na área de Qualidade de Energia Elétrica.