



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

### **ANÁLISES TÉCNICO-QUALITATIVAS COM BASE EM ABORDAGENS TÉCNICAS REFERENCIADAS AOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO HARMÔNICO PRATICADOS PELO OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO NA OPERAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA CONECTADAS NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.**

**FABIANO ANDRADE DE OLIVEIRA (1); ANTONIO SAMUEL NETO (1); CARLOS EDUARDO MONTEIRO FERNANDES (2); DILTON SERRA SECA VASCONCELOS FILHO (2); EDUARDO HENRIQUE MAFRA (3); FLÁVIA MARIA CAVALCANTI FERREIRA (3); JAQUELINE GOMES PEREIRA (2); RICARDO ANTUNES (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO ONS (1); OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELETRICO ONS (2); ONS (3)**

#### **RESUMO**

O presente artigo apresenta uma avaliação técnico-qualitativa das melhores práticas decorrentes de metodologias de desempenho e medição de harmônicos atualmente existentes na literatura técnica científica com respaldo em normas nacionais e/ou internacionais. Tais práticas permitem, por sua vez, representar e avaliar o comportamento típico e mais adequado do sistema elétrico brasileiro através de um tratamento equânime e unívoco estabelecido pelo Operador a cada nova solicitação de conexão ao SIN. Para tanto, esse artigo visa esclarecer determinadas abordagens técnicas/questionamentos referentes ao processo de qualidade de energia relacionados aos métodos de avaliação de desempenho harmônico praticados pelo Operador em instalações com fontes renováveis de energia.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Processo de Gerenciamento, Qualidade de Energia, Fontes de Energias Renováveis, Distorção Harmônica de Tensão, Abordagens Técnicas dos Métodos de Avaliação de Desempenho Harmônico.

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

Com a expansão das fontes renováveis de energia, devido, principalmente, às políticas incentivadoras para a utilização de uma energia limpa, as gerações eólicas e solares fotovoltaicas vêm ocupando lugar de destaque na matriz energética brasileira e mundial. Ao considerar a operação de centrais geradoras eólicas e solares fotovoltaicas devem ser avaliadas duas questões importantes, a primeira voltada para o lado do planejamento do desenvolvimento social e a outra para o planejamento técnico-qualitativo do suprimento da energia elétrica, sendo que, nessa última questão, o papel do ONS é fundamental para o cumprimento e atendimento dos requisitos estabelecidos pelos Procedimentos de Rede.

Enquanto a integração desses empreendimentos baseados em fontes de energia renováveis traz inúmeros benefícios socioeconômicos para o desenvolvimento do país em diversos aspectos, dentre eles o energético, em contrapartida, a utilização dessas mesmas fontes de energia, contribui para uma degradação da forma de onda da tensão e, por conseguinte, aumenta a necessidade de aprimoramento dos requisitos relacionados à qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Considerando que o processo de gerenciamento de qualidade de energia do ONS é evolutivo e contínuo, com um tratamento equânime e unívoco para avaliação do impacto de cada novo empreendimento ao Sistema Interligado Nacional (SIN), principalmente no que diz respeito às fontes renováveis de energia, é importante ressaltar que todas as melhorias alcançadas e implementadas até o momento, tanto sob o aspecto de Estudos quanto em relação às Campanhas de Medição, buscam preservar os padrões definidos nos Procedimentos de Rede para todo o período de concessão do empreendimento. Para tanto, faz-se necessário compatibilizar, aprimorar e adequar as atuais técnicas de avaliação de qualidade de energia existentes nos informes, documentos e normas técnicas internacionais à realidade do sistema elétrico brasileiro. Sendo assim, esse artigo faz uma abordagem técnico-qualitativa e esclarecedora quanto aos aspectos relacionados aos métodos de avaliação de desempenho harmônico praticados atualmente pelo Operador com destaque para: metodologias de formação de lugares geométricos em comparação a sistemas tipos CCAT e Compensadores Estáticos, recomendações/considerações para a Rede Externa e Rede Interna mediante aos diversos cenários do ciclo do PAR/PEL (Plano de Operação Elétrica de Médio Prazo), utilização de correntes harmônicas máximas para representar a geração harmônica das cargas não lineares representadas pelos parques eólicos/solares fotovoltaicos e viabilidade de aplicação de novas técnicas para o cálculo de distorções harmônicas de tensão com foco no compartilhamento de responsabilidades.

## 2.0 PONTOS QUESTIONÁVEIS DO PROCESSO DE QUALIDADE DE ENERGIA DO ONS

Para justificar as diferenças estabelecidas no processo metodológico de avaliação de desempenho harmônico de diversas instalações que operam com cargas não lineares na Rede Básica, bem como esclarecer as diversas abordagens técnicas sobre o tema, faz-se necessário identificar, inicialmente o comportamento das principais cargas não lineares tradicionalmente conhecidas (compensadores estáticos - CER, sistemas de corrente contínua de alta tensão – CCAT, sistemas retificadores/conversores de  $n$  pulsos, fornos a arco, etc.) em comparação às fontes renováveis de energia. Para uma melhor compreensão das principais diferenças no processo de integração das cargas não lineares, em particular os CERs e CCATs, mencionadas anteriormente, a Figura 1 mostra de forma simplificada, que existem tratamentos distintos e, contrariamente informados pela referência [1], associados basicamente aos tipos de equipamentos, finalidades e locais de operação na Rede Básica. Levando em consideração a complexidade das cargas não lineares presentes em uma determinada instalação (dimensões, equipamentos de eletrônica de potência etc.), a única similaridade que se pode afirmar sobre esses tipos de cargas é que geram um conteúdo harmônico de maior ou menor intensidade sobre o sistema elétrico, totalmente previsível ao se considerar CERs ou mesmo CCATs, mas totalmente aleatório e imprevisível com valores obtidos somente por ensaios em laboratório (correntes certificadas fornecidas por fabricante) ou em campo (correntes medidas). A similaridade, portanto, está somente na classificação dessas cargas quanto à não linearidade provocada na forma de onda da tensão de suprimento, pois quanto aos demais itens envolvidos durante o processo de integração, tais como: a geração harmônica, as metodologias utilizadas para uma avaliação de desempenho harmônico, as campanhas de medição necessárias para o cumprimento e regularização<sup>1</sup> para a integração de cada tipo de empreendimento, esses passam a solicitar exigências com vistas ao atendimento dos requisitos mínimos estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

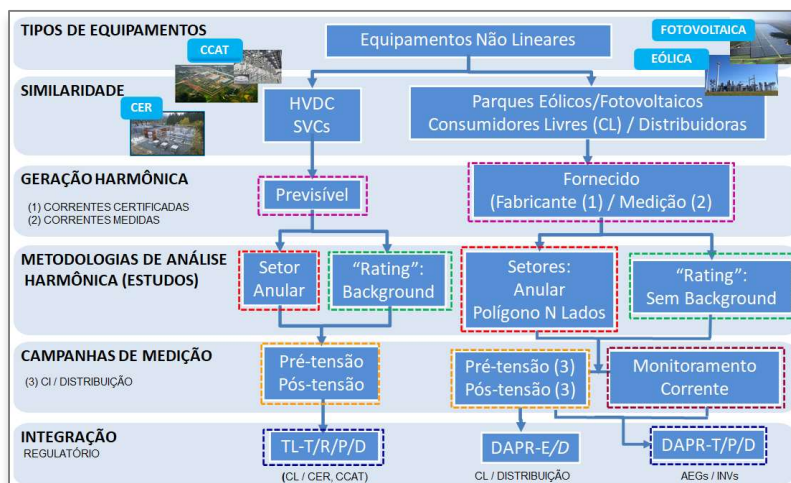


FIGURA 1 – Comparações do processo de qualidade de energia de cargas não lineares presentes na Rede Básica e as diferenças básicas mínimas exigidas para sua integração e atendimento aos Procedimentos de Rede.

### 2.1 Metodologias de formação para lugares geométricos em comparação a sistemas tipos CCAT e Compensadores Estáticos

Ainda com referência à Figura 1, especificamente quanto aos métodos a serem adotados para avaliação de desempenho harmônico de parques eólicos/solares fotovoltaicos, pode-se dizer que a utilização do Lugar Geométrico (LG) alternativo, composto pelo Polígono de  $n$  Lados (PnL) é, de uma forma geral, o mais representativo dessas novas cargas não lineares e, comprovadamente menos conservador [1] que o do Setor Anular, anteriormente aplicado a qualquer tipo de carga não linear, independentemente da sua complexidade. Conforme recomendações da IEC 62001 [2], especificamente para os casos em que se aplicam LGs tipo Setor Anular, alguns cuidados especiais devem ser levados em consideração ao se operar com cargas em sistemas em que a precisão na determinação da impedância mínima, os valores da resistência (de amortecimento) da rede e de ângulos excessivamente grandes (baixo amortecimento), principalmente para as impedâncias de baixas ordens harmônicas ( $2^a$ ,  $3^a$  e  $5^a$ ) são decisivos para os cálculos finais de distorções harmônicas de tensão máximas e, por sua vez, na indicação de uma solução de filtragem com as frequências sintonizadas para essas baixas ordens harmônicas.

<sup>1</sup> TL = Termo de Liberação (Teste, Receita, Provisório, Definitivo)

DAPR = Declaração de Atendimento aos Procedimentos de Rede (Teste, Provisória, Definitiva)

DAPR = Declaração de Atendimento aos Procedimentos de Rede (Energização, Definitiva)

A Figura 2 mostra, por sua vez, um comparativo entre os 02 LGs (Setor Anular e PnL) e a otimização inerente da construção do LG do PnL, em virtude de área resultante do conjunto de impedâncias harmônicas representativas da Rede Básica, [3], [4], [5] e [6]. Dentre todas as tentativas e abordagens diversas de críticas quanto às possíveis inconsistências nas análises de desempenho harmônico que se utilizam de lugares geométricos [1] para representar o comportamento da Rede Básica, o ONS justifica a funcionalidade dessa ferramenta como uma prática equânime e eficiente que melhor representa a variação da impedância/admitância do sistema ao longo de todo o seu período de operação (vida útil da instalação). Outro fator preponderante e vantagem da utilização do LG é a possibilidade de se identificar condições de ressonância mais críticas e que possam produzir os maiores níveis de distorções de tensão no PAC (ponto de acoplamento comum) para os mais variados cenários, níveis de carga (leve, média e pesada), bem como situações de operação degradada (N-1) de submissão da Rede Básica (Externa). Outra questão que não apresenta fundamentos sólidos, quando se trata da avaliação de desempenho harmônico de instalações de parques eólicos/solares fotovoltaicos ao se utilizar LGs específicos conforme se refere [1], é se equiparar a *outros tipos de metodologias*, mais comumente encontradas na maior parte de referências técnicas, além das experiências de outros países que apresentam sistemas elétricos com características, regras e comportamentos próprios bem diferentes do brasileiro. Em função dessas equiparações às metodologias mencionadas anteriormente, que não devem se apoiar simplesmente na transposição de práticas e experiências internacionais, mas nas adequações necessárias à realidade das condições operativas de cada país é que a utilização do método do LG é perfeitamente justificada. Adicionalmente, em detrimento à imprecisão inerente dos cálculos de impedâncias/admitâncias harmônicas decorrentes de dados, modelos e metodologias de cálculo de sistemas equivalentados, programas de fluxo harmônico, os quais que representam apenas situações momentâneas ou cenários restritos a uma determinada condição operacional da Rede Externa, que a aplicação da metodologia do LG é a forma mais eficaz de se abranger todas as incertezas presentes ao longo de todo o período operacional da instalação.

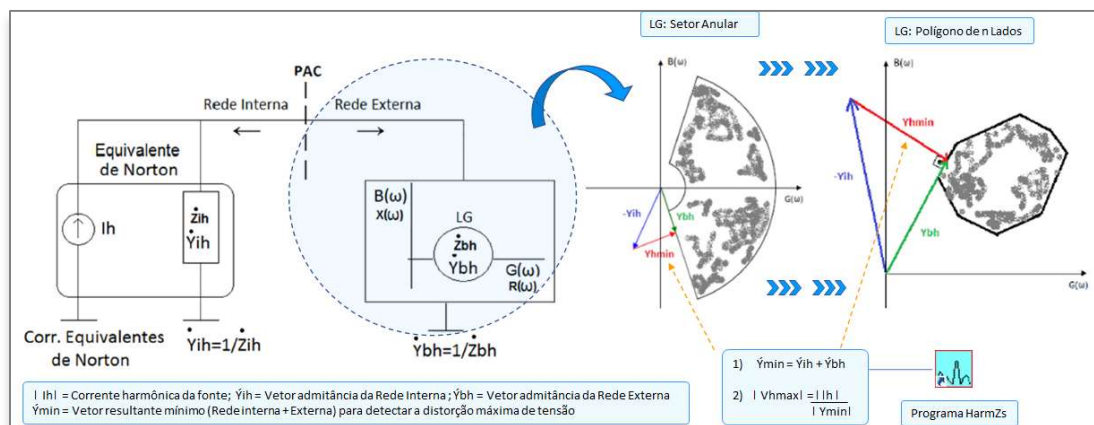


FIGURA 2 – Representação da Rede Externa através de lugares geométricos (LG) específicos.

Em virtude de todas as questões atuais que envolvem as metodologias de avaliação de desempenho harmônico de um determinado empreendimento, principalmente aquelas associadas à operação de parques eólicos/solares fotovoltaicos, o ONS informa que a proposta do novo LG (PnL) teve como base principal as mais modernas soluções técnicas adaptativas de avaliação das distorções de tensão ajustadas/adequadas a um comportamento aleatório e muito peculiar dessas novas cargas especiais com dependência direta das características próprias, unívocas do sistema elétrico brasileiro. Tais ajustes/adequações foram necessários em virtude da menor complexidade dessas fontes de geração renováveis em comparação aos sistemas elétricos como CCAT (HVDC)/CERs, da dependência da sua geração renovável associada às características elétricas locais e das particularidades específicas, operacionais e regulamentares do sistema elétrico de cada país/região. Quanto à inexistência de um consenso internacional na utilização de uma determinada metodologia pode-se facilmente justificar esse fato ao considerar que cada país, com o seu respectivo Operador, adota suas próprias metodologias e procedimentos de rede específicos para avaliação das distorções harmônicas de tensão/corrente que melhor possam mitigar seus impactos nos respectivos sistemas elétricos com respeito à qualidade de energia.

## 2.2 Recomendações/considerações para a Rede Externa e Rede Interna mediante aos diversos cenários associados ao ciclo do PAR/PEL (Plano de Operação Elétrica de Médio Prazo)

As melhorias alcançadas no processo de Qualidade de Energia possuem como base as recomendações/considerações para a Rede Externa e Interna, as quais têm sido fundamentais para as adequações e ajustes necessários, tanto para a parte técnica como para a parte operacional das fontes renováveis de energia no SIN. Para tanto, o processo evolutivo de qualidade de energia do ONS visa, fundamentalmente, avaliar as melhorias propostas de revisões de normas técnicas e experiências práticas de outros países realizando, por conseguinte, as compatibilidades factíveis ao sistema elétrico brasileiro mediante a determinação de premissas básicas e

procedimentos técnicos voltados para uma realidade local, com atenção especial à integridade e proteção do sistema elétrico em consonância com os requisitos definidos nos Procedimentos de Rede.

### 2.2.1 Para a Rede Externa

Quanto à representação da Rede Externa no que diz respeito ao comportamento do sistema elétrico e as contingências inerentes que estão sujeitos os empreendimentos, após sua conexão ao SIN, é necessário conhecer e ter uma previsibilidade do impacto da entrada em operação de cada instalação durante diversos cenários associados ao ciclo do PAR/PEL (Plano de Operação Elétrica de Médio Prazo).

Essa representação, por sua vez, fornecida através de dados de impedâncias do sistema elétrico para o horizonte de abrangência do PAR/PEL (atualmente de 05 anos) é convertida na forma de LG para a utilização futura no programa de desempenho harmônico desenvolvido pelo CEPEL[9]. Para que essa representação de impedâncias atenda os objetivos dos estudos de qualidade de energia, de forma que os efeitos de distorções harmônicas de tensão possam ser mitigados através de soluções de filtragem efetivamente necessárias, é primordial que parâmetros e modelos de equipamentos (seja do ponto de vista de compensação reativa capacitiva e de filtros e até mesmo de aerogeradores/inversores) sejam bem definidos por todos os seus componentes, sem a presença de modelos equivalentados ou mesmo concentrados.

No sentido de esclarecer alguns pontos questionáveis e explorados em [1] quanto à representatividade da Rede Externa pela adoção de um LG pelo ONS, os itens descritos a seguir mostram, assertivamente que essa representação e demais requisitos correlatos visam, sobretudo, manter a integridade, operação e segurança do sistema elétrico:

- a) Atendimento do critério N-1: Os estudos de análises de desempenho harmônico devem abranger todos os cenários do ciclo do PAR/PEL, cujas ocorrências/contingências de maior ou menor probabilidades para os valores de impedâncias vistas do PAC possam ser previstas dentro de uma área definida por um LG, atendendo assim, o critério N-1 (rede completa e degradada) estabelecido pelos Procedimentos de Redes;
- b) Representação completa das impedâncias dos componentes dos filtros: A impedância dos filtros não deve ser representada apenas por seus equivalentes até à 3ª vizinhança da área de estudo, mas por uma descrição os valores dos parâmetros que definem sus componentes (resistência, reatância indutância e reatância capacitiva) presentes até à 3ª vizinhança da área de estudo;
- c) Consideração dos equipamentos de potência reativa capacitiva: Necessidade de se considerar os equipamentos de compensação reativa capacitiva (bancos de capacitores) presentes e previstos no horizonte do PAR/PEL também até a 3ª vizinhança, a fim de se avaliar previamente a interação desses equipamentos nos resultados dos valores de distorção harmônica de tensão de cada empreendimento (prevendo-se ressonâncias paralelas) à medida que a topologia do sistema vai sendo alterada;
- d) Inadequação da proposta em utilizar P95% nos estudos de qualidade de energia: Quanto à proposta de aplicação da metodologia do percentil P95% [1], que descarta a utilização de um LG para os estudos de desempenho harmônico e que tem como propósito inicial, de eliminar as contingências com baixas probabilidades de ocorrerem para, de certo modo, evitar possíveis distorções harmônicas de tensão de valores elevados, contraria a (correta) aplicação do critério (N-1) de contingências, no qual deve-se ter uma previsibilidade de todos os impactos sobre o sistema elétrico, independentemente do grau de probabilidade das ocorrências. Uma observação importante a ser considerada é que pelo fato do comportamento harmônico de um sistema elétrico ser dependente de uma determinada contingência, cuja melhor representação é por um conjunto de impedâncias variáveis com a frequência ("nuvem de pontos"), onde podem existir pontos de impedâncias mais afastados (com baixa probabilidade de ocorrência), isso não significa *necessariamente* que a distorção harmônica de tensão resultante para aquele ponto, em particular, apresente um valor elevado. As regras de construção do LG do tipo (PnL) e, por sua vez, da técnica utilizada para o cálculo do próprio vetor resultante de distorção harmônica de tensão (Rede Externa e Rede Interna) - Figura 2 - foram recomendadas visando não somente a máxima otimização da área ocupada pelos pontos que formam as impedâncias representativas da Rede Externa (LG) devido às suas ocorrências/contingências, bem como verificar um valor de impedância final decorrente das combinações e contribuições de impedâncias da Rede Externa e Interna, na forma de vetor resultante, para a obtenção da maior distorção harmônica de tensão. Assim a metodologia do P95% reduz, literalmente, as chances de se detectar ressonâncias paralelas, pontos de altas distorções harmônicas resultante de alguma situação de contingência, desprezando, por conseguinte, condições ou situações de operação, que mesmo com baixas probabilidades de ocorrerem, ainda necessitam de serem consideradas para garantir os requisitos mínimos de confiabilidade e operação para o bom funcionamento do sistema elétrico. A proposta de P95%, definitivamente, não é a mais adequada para os estudos de desempenho harmônico e determinação das distorções harmônicas pelas razões descritas anteriormente.

Dentre outras adequações (melhorias) incorporados ao processo de Qualidade de Energia para a avaliação de desempenho harmônico de instalações dos parques eólicos/solares fotovoltaicos, destacam-se:

- e) Dispensa de fornecimento de filtros de potências menores que 0,4 Mvar e de ordens pares: conhecidas as dificuldades em se fabricar filtros de baixa potência (< 0,4Mvar) e que são propostos como solução de filtragem em complexos eólicos/solares fotovoltaicos, o Agente será dispensado do fornecimento de filtros para esse valor

de potência especificada. Com respeito aos filtros de ordem harmônica par ( $2^a$ ,  $4^a$ ,  $6^a$ , etc.) e àqueles de ordens superiores à  $13^o$  indicados nos estudos de desempenho harmônico não devem, em um primeiro momento, ser implementados em sistemas que operam com complexos eólicos/solares fotovoltaicos. Tais medidas foram necessárias com o objetivo de se ajustar os baixos valores de distorção harmônica de tensão para os harmônicos de ordem par [5] verificados atualmente nas campanhas de medição de tensão na Rede Básica com relação às mesmas ordens harmônicas e seus valores de distorção harmônica de tensão resultantes do estudo de qualidade de energia.

f) Utilização de passos e intervalos harmônicos adequados:

O ONS ao estabelecer algumas melhorias para o processo de qualidade de energia, adotou a metodologia do LG do tipo PnL, especificamente para parques eólicos/solares fotovoltaicos, atribuindo valores mais adequados para o *passo e intervalo harmônico* ao novo traçado desse LG com os seguintes objetivos: (a) ajustar a área resultante das impedâncias/admitâncias harmônicas predominantes imposta ao sistema elétrico em função das condições operativas e mais realistas das fontes renováveis de energia e (b) estabelecer uma margem de segurança naturalmente exigida pela aplicação da referida metodologia.

Para contornar a questão da margem de segurança e justificar a dinâmica do sistema devido à entrada e operação de outros parques eólicos/solares fotovoltaicos ou mesmo de outros tipos de cargas não lineares, tanto o *intervalo* como o *passo de integração harmônicos* foram alterados para que fosse possível assegurar/prevenir possíveis pontos de deslocamentos de impedâncias harmônicas e, dessa forma, capturar ressonâncias harmônicas (sobretensões harmônicas) não detectáveis na otimização do novo LG.

Com respeito ao passo de frequência, especificamente àquele utilizado pelo ONS (de 6 em 6 Hz) no cálculo do LG do tipo PnL, tem o suporte técnico da própria brochura do Cigré "TB 766 [7], que recomenda que um valor satisfatório a ser adotado para o passo não deve ser maior que  $(f_n/10)$ , ou seja,  $(60 \text{ Hz}/10 = 6 \text{ Hz})$ , embora intervalos menores podem ser requeridos para diferentes sistemas dependendo da resposta em frequência.

Para informação adicional, a referência [7] descreve também que um passo de frequência típico de  $(f_n/100 = 60\text{Hz}/100 = 0,6\text{Hz})$  é utilizado por operadores do sistema de transmissão europeu.

Vale ressaltar que faz parte de pesquisas futuras do Operador uma reavaliação/adequação do passo harmônico para valores ainda menores que 6 Hz, principalmente para as baixas ordens ( $2^a$  e  $3^a$  ordens harmônicas) e outros para ordens superiores à  $13^a$  ou  $25^a$  ordens harmônicas, bem como da viabilidade de se utilizar um intervalo que aumente proporcionalmente ao aumento da frequência (devido às incertezas) de aproximadamente  $\pm 3\%$  em relação à frequência, de acordo com [8], porém mantendo o passo de 6 Hz  $(f_n/10)$ .

## 2.2.2 Para a Rede Interna

Com respeito à Rede Interna cabe aqui destacar a importância da inclusão na sua representação dos equipamentos de compensação reativa capacitiva pertencentes ao empreendimento sob análise com o objetivo de se conhecer previamente o impacto desses equipamentos no tocante às distorções harmônicas de tensão, muitas vezes decorrentes do surgimento de pontos de ressonâncias paralelas dos próprios equipamentos com o sistema elétrico sob análise. Para tanto, a referência [6] solicita ao Agente que sejam estudadas as condições de operação/manobra de bancos de capacitores e possíveis estágios nos estudos de qualidade de energia de parques eólicos/solares fotovoltaicos.

Um outro ponto que merece ser destacado e que tem sido motivo de discussões técnicas diz respeito quanto à correta representação das fontes geradoras de harmônicas, principalmente, quando se referem aos aerogeradores (AEGs). Atualmente, essas fontes são representadas através de um "Equivalente de Norton" conforme mostrado na Figura 2, composto por fontes de correntes harmônicas "ideais" em paralelo com uma impedância equivalente constituída por filtros e equipamentos de compensação reativa capacitiva pertencente à Rede Interna. Para os aerogeradores, especificamente, as fontes de correntes harmônicas "ideais" têm sido, até o presente momento utilizadas nos estudos de qualidade de energia, tanto para a fase inicial de integração de empreendimentos para a solicitação do Parecer de Acesso como as correntes certificadas fornecidas pelo fabricante, como na revisão do estudo com as correntes medidas, conforme [12] para justificar a falta de um modelo fiel, confiável e realmente representativo para esses tipos de cargas.

Para o caso específico de aerogeradores, embora essas correntes "ideais" sejam obtidas através das correntes certificadas fornecidas por fabricantes e por meio de medições em laboratório em protótipos que seguem as recomendações da versão mais antiga da IEC 61400-21 [10], somente em meados de 2019 através de uma atualização e divisão dessa mesma norma [11] é que foi oficialmente disponibilizado à comunidade do setor elétrico, propostas de modelos de fontes geradoras de harmônicas sob a forma de um circuito equivalente de Thévenin/Norton incluindo as impedâncias próprias dessas fontes e dos seus respectivos filtros passivos incorporados a cada modelo, que deveriam ser obtidos e processados mediante a realização de medições e seguindo, por sua vez, as considerações (modelos) e orientações de execução (medições) das novas versões segmentadas da IEC 61400-21: [11] e [12].

Dessa forma, de acordo com [11] o novo modelo harmônico proposto deverá refletir o comportamento harmônico de um ou mais parques eólicos, independentemente das perturbações do sistema. A Figura 3 ilustra, de uma forma simplificada, os modelos harmônicos genéricos propostos de acordo com a referência [11], sendo o do Circuito Equivalente de Norton, o modelo que já é empregado *nos estudos de desempenho harmônico* do ONS para a solicitação de Parecer de Acesso, com exceção da consideração da impedância interna própria da fonte geradora e



de seus filtros correlatos. A diferença básica da impedância do equivalente de Norton considerada atualmente pelo ONS nos estudos de qualidade de energia, em comparação às dos modelos propostos, é que na representação da impedância equivalente da Rede Interna não é incluída a impedância das fontes geradoras de harmônicas, uma vez que, essas são consideradas como fontes ideais. Todavia, para a composição das várias fontes harmônicas e obtenção das correntes harmônicas resultantes, é aplicado o fator de agregação, conforme a referência [13].

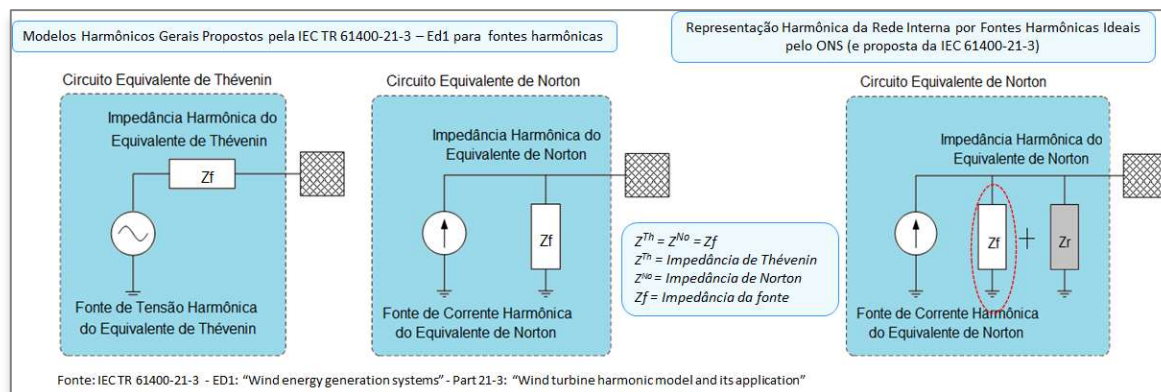


FIGURA 3 – Modelos Harmônicos gerais propostos pela IEC TR 61400-21-3 – Ed1 em comparação à representação harmônica da Rede Interna por fontes harmônicas ideais utilizadas pelo ONS.

Os modelos das fontes geradoras de harmônicas propostas pela referência [11] devem atender a requisitos mínimos quanto à sua *aplicação* (análises harmônicas em conformidade aos Procedimentos de Rede locais, projetos de filtros), *parâmetros de entrada* ("setpoints" de potência ativa e reativa, velocidade, tipo de modulação do conversor, etc.), *modelo harmônico terminal* que caracteriza seu comportamento para as frequências harmônicas nos terminais de baixa e média tensão do transformador, além de componentes passivos relevantes que fazem parte do circuito interno do aerogerador (por exemplo, filtros, circuitos auxiliares) e, finalmente a sua *estrutura* deverá ser capaz de representar tanto os aspectos relacionados às fontes geradoras de harmônicas, assim como suas unidades mitigadoras através de filtros passivos e ativos. Para tanto, pontos importantes a serem considerados na emissão harmônica para *um determinado tipo de aerogerador* e que podem influenciar na sua modelagem devem ser cuidadosamente avaliados com o objetivo de se minimizar ou mesmo excluir seus efeitos no conteúdo harmônico dessas fontes. Tais pontos críticos, como a distorção harmônica de "background" da Rede Externa, as ressonâncias decorrentes de impedâncias de curto-circuito dependentes da frequência da rede e da potência de curto-circuito no ponto de conexão da rede (PAC) tem influências, de maior ou menor impacto, sobre a emissão harmônica de um aerogerador e, tanto o Operador como a referência [11], apresentam opiniões similares que ainda não se tem estabelecido um procedimento eficaz, normalizado, para identificar e excluir tais influências. Embora sejam recomendados modelos de aerogeradores [11] e técnicas de avaliação de qualidade de energia quanto ao comportamento de aerogeradores/parques eólicos [12], as conclusões mais atuais dessas referências é que não há uma abordagem padrão para a estimativa de correntes harmônicas de fontes provenientes de aerogeradores, mas, simplesmente, recomendações baseadas em [12] e que devem refletir sobre a estrutura e aplicação do modelo harmônico a ser adotado.

### 2.3 Utilização de valores máximos de correntes harmônicas para representar a geração harmônica das cargas não lineares representadas pelos parques eólicos/solares fotovoltaicos

Um outro ponto que merece uma abordagem técnico-qualitativa é com respeito à adoção dos valores máximos de correntes harmônicas nos estudos de desempenho harmônico de uma instalação composta por parques eólicos/solares fotovoltaicos. A utilização do "input" dessas correntes máximas medidas solicitada pelo ONS a todo empreendimento na sua fase final de integração e de definição do fornecimento de equipamentos, principalmente para aqueles que confirmaram a necessidade de uma solução de filtragem, foi reforçada e consolidada tecnicamente na versão atualizada de 2019 da IEC 61400-21 [12] (técnicas de medição) com a complementação final pela IEC 6100-3-6 [13] para a composição e contribuição de várias fontes harmônicas nos estudos de desempenho harmônico. Vale ressaltar que o ONS já demandava na realização da campanha de corrente que fosse informado o maior valor percentual de corrente representativo de uma quantidade de amostras medidas para cada ordem harmônica ( $2^a$  –  $50^a$ ) e faixa percentual (0 – 100% com passo de 10%) da potência nominal do aerogerador/inversor para sua utilização futura na revisão do estudo de qualidade de energia. Assim, as possíveis imprecisões da metodologia [3], questionáveis ainda por usuários da ferramenta computacional padrão de análise harmônica [9] e utilizada atualmente para os estudos de avaliação do impacto harmônico de um empreendimento, é em grande parte compensada por essas correntes harmônicas medidas. Essas correntes harmônicas obtidas da campanha de medição representam definitivamente na sua composição fasorial (módulo –  $I$  e ângulo –  $\Phi$ ) a influência de outras fontes geradoras de harmônicas, bem como aquelas pré-existentes no sistema (as de "background"), o que proporciona maior consistência ao método de avaliação e, sobretudo, a precisão necessária dos resultados com uma

melhor representatividade da operação e impacto dos aerogeradores sob investigação. Com a evolução da nova versão da IEC 61400-21 [12] foi identificada também a necessidade de se realizar uma avaliação prévia probabilística baseada no percentil P95% para a apresentação dos resultados das correntes harmônicas medidas. A Figura 3 mostra a evolução de [12], no tocante à utilização das correntes harmônicas máximas e do percentil P95% em comparação à referência [10].

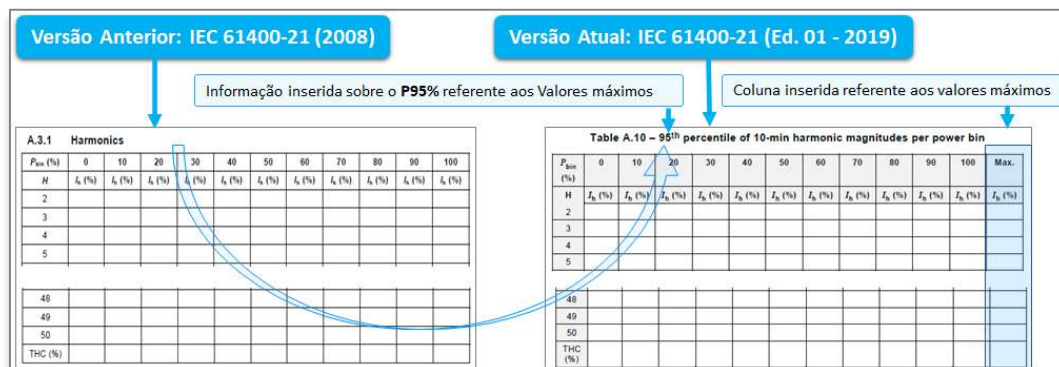


FIGURA 3 – Consolidação técnica na nova versão da norma IEC 61400-21 referente aos valores máximos e do percentil 95% (P95%) nas campanhas de corrente solicitadas pelo ONS.

O ONS entende que, ao se tratar *exclusivamente* de Medições, em que o volume de dados é consideravelmente alto, determinados conjunto de amostras podem estar fora de uma normalidade ou comportamento padrão esperado e a aplicação do percentil P95% para que sejam expurgados valores discrepantes daqueles mais susceptíveis de ocorrerem, é perfeitamente aceitável e recomendável no tratamento final dos dados medidos.

Vale reforçar que anteriormente às recomendações atuais da referência [12], o ONS já solicitava a necessidade da utilização das maiores correntes harmônicas percentuais (medidas na saída de aerogeradores/inversores e do lado da média tensão dos respectivos transformadores) para os estudos revisados com os resultados da campanha de corrente. Tal prática é justamente para se evitar qualquer interferência quanto à emissão harmônica relatada no item 2.2.2 associada à adoção do tipo de modelo da fonte harmônica, bem como eliminar qualquer influência de componentes de sequência positiva ou negativa para limitação da utilização de programas computacionais de simulação harmônica.

#### 2.4 Viabilidade de aplicação de novas técnicas para o cálculo de distorções harmônicas de tensão com foco no compartilhamento de responsabilidades

Considerando o aprimoramento e evolução constante do processo de qualidade de energia, o ONS vem investigando as melhores técnicas disponibilizadas na literatura científica, bem como o desenvolvimento e aperfeiçoamento de outras ferramentas existentes, com o objetivo principal de adequá-las futuramente aos indicadores de desempenho harmônico com soluções mitigadoras que resultem no menor custo financeiro final para o empreendimento. Para tanto, surgem novas propostas para a determinação das parcelas de responsabilidades sobre eventuais violações dos limites pré-estabelecidos para as distorções harmônicas de tensão. Dentre algumas metodologias de cálculo encontradas recentemente na comunidade científica para a determinação das contribuições individuais de várias fontes geradoras de harmônicas em relação a um mesmo PAC, destacam-se as referências [14], [15], [16]. Essas metodologias apresentam, embora recentes, apresentam perspectivas promissoras para uma avaliação mais determinística e direcionada das contribuições harmônicas resultantes entre várias centrais geradoras eólicas/solares fotovoltaicas conectadas em um mesmo ponto comum e a própria Rede Externa. Todavia, ainda não se tem um consenso sobre o método mais adequado para a determinação das responsabilidades harmônicas [17], e tampouco, recomendações estabelecidas em normativas nacionais e internacionais que exigem a determinação destas parcelas de responsabilidade.

Dentre os métodos mais comuns de compartilhamento de responsabilidades harmônicas comentados na referência [17], este artigo destaca aquelas que recentemente mostraram-se, de forma geral, mais eficazes quanto aos resultados das investigações, até então realizadas. Todos os métodos têm como princípio básico o método da superposição tradicional da literatura clássica, *que embora apresente uma simplicidade na sua aplicação, há a questão que para que se atingir uma boa exatidão dos resultados há a necessidade do pré-conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da Rede Externa e da Rede Interna. Essa dificuldade pode, por sua vez, acarretar erros relevantes no tocante ao compartilhamento de responsabilidades.* Para tanto, cada método estabeleceu suas próprias estratégias com o objetivo de contornar essa dificuldade utilizando, todavia, a aplicação de equipamentos adicionais (filtros passivos e ativos) ou mesmo de recursos próprios como a aplicação direta dos medidores utilizados nas campanhas de medição de qualidade de energia.

- Com respeito a primeiro método, denotado por *Método da Impedância Harmônica Dominante* [14], esse tem como princípio a inserção de uma impedância dominante (daí a origem do nome do método) apresentada na forma de

um filtro passivo e frequência de ressonância ajustável configurando assim, um recurso físico adicional a ser instalado junto ao PAC apenas durante as atividades de medições para a obtenção das informações requeridas e aplicação da metodologia. O método foi testado em sistemas de larga escala (sistemas reais encontrados na prática levando em consideração a ocorrência de situações adversas, como de ressonância na impedância do sistema supridor e de interações de ressonância entre a impedância do sistema supridor e da instalação), bem como em escala reduzida (laboratórios) com resultados eficientes e confiáveis para ambas as condições analisadas.

- O segundo método [15] emprega a necessidade de um *Isolamento Harmônico entre os Sistemas Envolvidos* para sua correta aplicação e determinação das responsabilidades, a partir do emprego de filtros ativos e de medidores de qualidade de energia. Reforça-se aqui a não necessidade do conhecimento das impedâncias harmônicas dos sistemas envolvidos, além da aplicação simultânea para todos os harmônicos de interesse. O método, até então, já foi testado em um ambiente controlado e com resultados bastante promissores com respeito à exatidão das grandezas de interesse, mas ainda necessita ser validado com os testes em campo.
- E quanto ao terceiro método, denominado por *Método da Superposição com Múltiplas Fontes e Impedâncias* [16], esse não necessita da instalação de filtros passivos e ativos, mas apenas das correntes e tensões harmônicas medidas no PAC e das impedâncias harmônicas das redes Externa e Interna. Por outro lado, sabendo-se das dificuldades na representação das impedâncias harmônicas, em particular da Rede Externa e do seu comportamento dinâmico, as análises são feitas para diversas impedâncias representativas das condições da rede, de forma conservadora, abrangente e associadas ao período de medição das distorções harmônicas. As condições da rede, assim estabelecidas são: (a) impedâncias simuladas com a rede completa para os patamares de carga leve, média e pesada e (b) as impedâncias dos vértices de um LG representativo da rede externa para as cargas mencionadas anteriormente, além de contingências até a terceira vizinhança do PAC para as medições realizadas no período sob análise. Outras informações precisam ser mais bem exploradas no tocante às precisões dos dados medidos (tensões e correntes) para a correta aplicação da metodologia.

### 3.0 – CONCLUSÃO

O artigo descreveu sobre os principais pontos, muitos deles questionáveis, quanto ao processo de gerenciamento de qualidade de energia do ONS com respeito às fontes renováveis de energia. Para tanto, o ONS se apoiou em uma avaliação técnico-qualitativa dos pontos considerados relevantes no processo de avaliação e integração dessas cargas não lineares visando esclarecer essas questões com base em literaturas técnicas científicas compostas de normas nacionais e/ou internacionais, usualmente conhecidas na área de qualidade de energia. Adicionalmente, vale lembrar também que todas as tratativas descritas nesse artigo estabelecem, sobretudo, um tratamento equânime, unívoco e que buscam as adequações necessárias para minimizar os efeitos diretos e específicos de um sistema elétrico, no caso o brasileiro, a cada nova solicitação de conexão ao SIN. Dessa forma, seguem algumas ponderações ressaltadas nesse artigo quanto às avaliações técnico-qualitativas do processo de qualidade de energia do ONS:

- As metodologias de avaliação de desempenho harmônico, através de LGs otimizados, tipo (PnL) atualmente praticados pelo ONS para as fontes renováveis de energia, foi uma evolução técnica derivada de uma metodologia clássica e mais conservadora da operação com sistemas CCAT (HVDC) e CERs;
- Vale destacar que a recomendação do ONS quanto ao passo de frequência de 6 em 6 Hz para o LG tipo (PnL) está em consonância com a brochura técnica do Cigré "TB 766", que recomenda, de forma geral, esse mesmo valor para as análises de desempenho harmônico;
- Outro ponto importante a destacar, dentre as boas práticas empregadas nas *campanhas de medição* pelo ONS, em particular o das correntes harmônicas geradas por parques eólicos/solares fotovoltaicos, é o da utilização dos valores máximos das correntes harmônicas com um tratamento estatístico (percentil P95%) destinadas à revisão do estudo de desempenho harmônico.
- As propostas de modelos para as fontes geradoras de harmônicas adequadas à operação dos aerogeradores/parques eólicos em substituição às fontes ideais tradicionais utilizadas atualmente, além das novas técnicas de responsabilidades harmônicas propostas, foram também outros pontos considerados e motivadores da realização desse artigo.

Devido à operação e ao comportamento bastante peculiar e aleatório das fontes renováveis de energia, faz-se necessário, portanto, dar continuidade às investigações e pesquisas para o aprimoramento do processo de qualidade de energia.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. P. CARLI - Identificação e Análise das Inconsistências e dos Critérios Conservadores da Metodologia de Avaliação do Desempenho Harmônico de Parques Eólicos no Brasil, XXV SNPTEE, Belo Horizonte, 2019.
- [2] IEC, IEC/TR 62001: Guide to the specification and design evaluation of AC filters for high-voltage direct current (HVDC) systems. Frankfurt, 2009.
- [3] F. C. VELIZ, S. L. VARRICCHIO, C. O. COSTA - Metodologia para a Representação de Redes Elétricas por Polígonos de Admitâncias para Estudos de Impacto Harmônico, XXII SNPTEE, Brasília, DF, 2013.



- [4] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, Submódulo 2.3 - Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos - Metodologia, 2021.
- [5] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, Submódulo 2.9, - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica - Requisitos, 2021.
- [6] 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 3, 2019.
- [7] C4/B4 – TECHNICAL BROCHURE - Network modelling for harmonic studies - Reference: 766, April 2019, Cigré
- [8] J. G. PEREIRA, T. M. L. ASSIS, R. F. S. DIAS, F. A. OLIVEIRA - Impacto da Modelagem das Linhas de Transmissão na Análise Harmônica de Sistemas com Geração Eólica, XXV SNPTEE, Belo Horizonte, 2019.
- [9] ELETROBRÁS, CEPEL, Programa HarmZs - Estudos de Comportamento Harmônicos e Análise Modal de Redes Elétricas.
- [10] CEI IEC 61400-21 - First Edition - Wind turbine generator systems - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, 2001-12
- [11] IEC TR 61400-21-3 - Edition 1.0 - Wind energy generation systems - Part 21-3: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind turbine harmonic model and its application, 2019-09
- [12] IEC 61400-21-1, Edition 1.0 - Wind energy generation systems - Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics - Wind turbines, 2019-05.
- [13] IEC/TR 61000-3-6 - Edition 2.0 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, 2008-02
- [14] I. N. SANTOS, J. C. OLIVEIRA E A. C. DOS SANTOS - Dominant impedance method to assign harmonic voltage contributions at a point of common coupling, Wiley (Research Article)
- [15] F. C. VÉLIZ, S. L. VARRICCHIO, C. O. COSTA, I. F. DA NOVA, L. E. D. Santos - Validação por Meio de Medições da Metodologia que Utiliza Filtros Ativos e Medidores de Tensão e Corrente para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas no PAC, XXV SNPTEE, Belo Horizonte, 2019, CEPEL
- [16] M. P. CARLI, R. ANTUNES, ESUL - Proposição do Método da Superposição com Múltiplas Fontes e Impedâncias para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas de Tensão, XXV SNPTEE, Belo Horizonte, 2019.
- [17] B. M. GIANESINI - Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias, 172 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2020.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



FABIANO ANDRADE OLIVEIRA possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1992) e mestrado em Qualidade de Energia (QEE) pela mesma Universidade (1994). Trabalhou na empresa Davnar do Brasil Ltda. (1994-1997) na aplicação de Compensação de Energia Reativa, QEE e suporte técnico para equipamentos de medição e análises de perturbações na distribuição. Na empresa ABB (1997-2014) elaborava propostas técnicas/comerciais para Soluções Inovadoras de QEE e, posteriormente como Especialista em FACTS (CER/Bancos Série, Shunt/Filtros). Atualmente, é Engenheiro Especialista no ONS dedicado às Melhorias do Processo/Gerenciamento de QEE e coordenação (submódulos afins) dos Procedimentos de Rede.

#### (2) ANTONIO SAMUEL NETO

Antonio Samuel Neto, engenheiro eletricista pela UFPE/2003, Mestrado pela UFPE/2005. Trabalha no ONS desde outubro/2005 com estudos pré-operacionais de regime permanente, transitórios eletromagnéticos, análises de Projetos Básicos de empreendimentos de Transmissão e estudos de Qualidade de Energia (geração eólica/solar).

#### (3) CARLOS EDUARDO MONTEIRO FERNANDES

Carlos Eduardo Monteiro Fernandes, engenheiro eletricista pela UFMS/2002. Possui mestrado em Sistemas de Potência pela UFSC/2006 e especialização em Proteção do Sistema Elétrico pela UNIFEI/2014. Atualmente trabalha na Gerência de Engenharia Sul do Operador Nacional do Sistema Elétrico -ONS.

#### (4) DILTON SERRA SECA VASCONCELOS FILHO

Dilton Serra Seca Vasconcelos Filho, engenheiro eletricista pela UFPE/2018. Trabalha no ONS desde abril/2019 com estudos pré-operacionais de regime permanente, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, análises de Projetos Básicos de empreendimentos de Transmissão e estudos de Qualidade de Energia (geração eólica/solar).

#### (5) EDUARDO HENRIQUE MAFRA

Graduou-se em engenharia elétrica na Universidade Regional de Blumenau (FURB)/2017. Trabalhou entre 2015 e 2017 na Engenharia de Transformadores da WEG Transmissão e Distribuição S/A. Ingressou no ONS em 2017, onde atua como engenheiro na Gerência de Engenharia do Sul do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

#### (6) FLÁVIA MARIA CAVALCANTI FERREIRA

Flávia Maria Cavalcanti Ferreira, engenheira eletricista pela UFPE/1996, com Mestrado pela UFPE/1998, e MBA Master em Desenvolvimento Gerencial - CAISE, pela PUC - Rio/2012. Trabalha no ONS desde abril/2000 com estudos pré-operacionais de regime permanente, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, análises de Projetos Básicos de empreendimentos de Transmissão e estudos de Qualidade de Energia (geração eólica/solar).

(7) JAQUELINE GOMES PEREIRA

Jaqueline Gomes Pereira possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF/2011, pós-graduação em Geração de Energia Elétrica pela UCP/2015 e mestrado em Engenharia Elétrica pela UFRJ/2019. Trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico desde 2013, onde atualmente atua na área de Qualidade de Energia Elétrica.

(8) RICARDO ANTUNES

Graduação e mestrado em engenharia elétrica pela UFSC/(2001. Trabalhou na Eletrosul (16 anos) com estudos relacionados à transmissão, geração hidroelétrica/eólica e projetos de equipamentos de AT. Desde 2018, trabalha no ONS, na avaliação de Projetos Básicos de novos empreendimentos de transmissão e elaboração/análise de estudos pré-operacionais e nas áreas de transitórios eletromagnéticos e qualidade de energia. Membro do Cigré, atua nos grupos CE-A2 (Transformadores) e CE-C4 (Desempenho de Sistemas Elétricos).