

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 10/05/2021.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Campus de Bauru

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Danilo Monteiro Caldas**

**ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE USINAS EÓLICAS ATRAVÉS DOS  
REQUISITOS TÉCNICOS DOS PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS**

**Bauru – SP**

**2019**

**DANILO MONTEIRO CALDAS**

**ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE USINAS EÓLICAS ATRAVÉS DOS  
REQUISITOS TÉCNICOS DOS PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves**

**Co-orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes**

**Bauru– SP**

**2019**

C145a	<p>Caldas, Danilo Monteiro</p> <p>Análise da integração de usinas eólicas através dos requisitos técnicos dos procedimentos de rede do ONS / Danilo Monteiro Caldas. -- Bauru, 2019</p> <p>110 f. : il., tabs., fotos</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru</p> <p>Orientador: Flavio Alessandro Serrão Gonçalves</p> <p>Coorientador: Helmo Kelis Morales Paredes</p> <p>1. Aerogerador full-converter. 2. Controle de tensão. 3. Inércia sintética. 4. Procedimentos de rede. 5. Qualidade de energia. I. Título.</p>
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

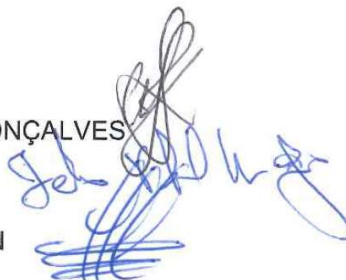
**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANILO MONTEIRO CALDAS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 31 dias do mês de maio do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) ICT Sorocaba - UNESP, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia / UNESP / Sorocaba, Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFAO do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Unesp - ICT Sorocaba, Prof. Dr. JUAN CARLOS CEBRIAN AMASIFEN do(a) Departamento de Engenharia de Produção / UNESP - Itapeva, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANILO MONTEIRO CALDAS, intitulada **ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE USINAS EÓLICAS ATRAVÉS DOS REQUISITOS TÉCNICOS DOS PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES

Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFAO

Prof. Dr. JUAN CARLOS CEBRIAN AMASIFEN



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família especialmente à minha esposa Isabel e ao meu filho Caetano pela estabilidade, motivação e apoio durante a realização do trabalho.

Ao meu orientador, professor Flavio Alessandro Serrão Gonçalves pela paciência, disponibilidade e experiência tanto nos aspectos técnicos como nos detalhes relativos à vida acadêmica.

A todos os professores do programa de pós-graduação especialmente os professores Fernando Pinhabel Marafão, Helmo Kelis Morales Paredes e Eduardo Paciência Godoy pelos ensinamentos durante as disciplinas, exame de qualificação e suporte durante elaboração de publicações.

Aos colegas do GASI (Grupo de Automação e Sistemas Integráveis) pela troca de conhecimentos e conselhos.

Aos colegas da ENERCON, especialmente aos engenheiros Eckard Quitmann e Angelo Mendonça, pela inestimável colaboração nos detalhes relacionados ao funcionamento do aerogerador e compartilhamento de experiências internacionais.

Aos demais amigos e colegas de demais empresas do setor eólico que tive o prazer de colaborar durante os últimos anos e, com certeza, tiveram uma contribuição importante na realização do trabalho.

## RESUMO

Este trabalho realiza uma análise dos principais temas sobre qualidade de energia de usinas eólicas através de uma revisão bibliográfica das principais normas nacionais e internacionais, dando ênfase aos Procedimentos de Rede do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). São avaliados os aspectos técnicos relativos à conexão elétrica de uma usina eólica ao Sistema Interligado Nacional brasileiro (SIN), propondo uma sequência de análises para integrar uma metodologia de verificação do cumprimento de novos requisitos do Submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede utilizando os pacotes de softwares de análise de rede do CEPEL (ANAREDE, ANATEM e HarmZs). Foram revisadas, nesta nova versão publicada em dezembro de 2016, as exigências relativas à capacidade de potência reativa, controle de tensão, impacto na qualidade de energia e funcionamento durante distúrbios de tensão e frequência (*Fault Ride Through*, Inércia Sintética e controle  $P(f)$ ). Para cada um dos requisitos são apresentados exemplos de aplicação da metodologia proposta através de estudos de caso, considerando um aerogerador do tipo *Full-Converter* e através dos resultados destes estudos demonstra-se que a metodologia proposta permite a verificação dos principais requisitos dos Procedimentos de Rede na fase de planejamento da usina eólica, dando previsibilidade e segurança tanto para o desenvolvedor do projeto, quanto ao ONS. O conjunto das orientações e procedimentos propostos, pela primeira vez apresentado de forma integral em um único documento técnico, integra uma metodologia unificada de verificação da conformidade que pode ser facilmente reproduzida, representando um ambiente poderoso para a realização de testes no setor eólico.

Palavras-chave: Aerogerador *Full-Converter*, Controle de Tensão, *Fault Ride Through*, Inércia Sintética, Procedimentos de Rede, Qualidade de Energia.

## ABSTRACT

This work presents an assessment of the main topics related to power quality on wind power plants through a bibliographical review of the main national and international standards, with emphasis on the *Procedimentos de Rede* from ONS (*Operador Nacional do Sistema Elétrico*). The technical aspects related to a wind farm grid connection to the Brazilian National Interconnected System (*Sistema Interligado Nacional - SIN*) are evaluated, proposing a sequence of analyses to integrate a methodology in order to verify the compliance with the new requirements from the Sub-module 3.6 of the *Procedimentos de Rede* using the grid analysis software packages from CEPEL (ANAREDE, ANATEM and HarmZs). The requirements for reactive power capability, voltage control, power quality impact and operation during voltage and frequency disturbances (Fault Ride Through, Synthetic Inertia, and P(f) control) were reviewed in this new version published in December 2016. Examples for the application of the methodology proposed are presented for each of the requirements through case studies considering a Full-Converter type wind turbine and through the results of these studies it is demonstrated that the proposed methodology allows the verification of the main requirements of the *Procedimentos de Rede* in the planning phase of the wind farm, giving predictability and safety for both the project developer and ONS. The set of proposed guidelines and procedures, for the first time entirely presented in a single technical document, incorporates a unified methodology for the compliance verification that can be easily reproduced, representing a powerful environment for conducting tests in the wind sector.

Keywords: Fault Ride Through, Full-Converter Wind Turbine, Power Quality, *Procedimentos de Rede*, Synthetic Inertia, Voltage Control.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Rede fictícia para o cálculo da tensão fictícia. ....	22
Figura 2.2 - Foto de um container de testes de afundamentos de tensão. ....	24
Figura 2.3 - Diagrama unifilar simplificado de um container de testes de afundamentos de tensão. ....	24
Figura 3.1 – Transformador e chave seccionadora instalados dentro da torre de um aerogerador. ....	31
Figura 3.2 – Rede de média tensão aérea de 34,5 kV dentro de uma usina eólica. ....	31
Figura 3.3 - Instalação de rede de média tensão subterrânea de 34,5 kV dentro de uma usina eólica. .	32
Figura 3.4 – Subestação e linha de transmissão de 110 kV em usina eólica na Alemanha. ....	32
Figura 3.5 - Requisito mínimo de geração/absorção de potência reativa no PAC da central geradora eólica. ....	33
Figura 3.6 - Perfil do controle de tensão ( <i>voltage droop</i> ) da central geradora eólica. ....	34
Figura 3.7 - Requisito de controle de potência em função da frequência para eventos de sobrefrequência. ....	35
Figura 3.8 - Requisito de inercia sintética para os aerogeradores. Em azul: Curva de potência ativa em relação à potência disponível antes do distúrbio de frequência. Em vermelho: variação da frequência nos terminais do aerogerador. ....	36
Figura 3.9 - Requisito de suportabilidade a tensões de falta nos terminais do aerogerador. ....	37
Figura 3.10 - Requisito para injeção de corrente reativa durante falta na rede. ....	38
Figura 4.1 – Diagrama esquemático com os requisitos técnicos com seus respectivos pontos de referência e as ferramentas utilizadas para a implementação da metodologia de verificação. ....	46
Figura 4.2 – Diagrama com o processo para o cálculo da capacidade de potência reativa no PAC. ....	46
Figura 4.3 - Diagrama com o processo de verificação do funcionamento do controle de tensão do parque eólico. ....	49
Figura 4.4 – Diagrama com o processo de verificação do requisito de suportabilidade a subtensões e sobretensões ( <i>Fault Ride Through - FRT</i> ). ....	50
Figura 4.5 - Diagrama com o processo de verificação do requisito de suportabilidade a distúrbios de frequência. ....	52
Figura 4.6 – Diagrama com o procedimento de simulação de harmônicos para a verificação do requisito do ONS. ....	54
Figura 4.7 - Representação do circuito básico para estudo de desempenho harmônico de uma usina eólica (equivalente Norton e Lugar Geométrico). ....	55
Figura 4.8 - Cálculo vetorial do valor mínimo de $Y_h = Y_{ih} + Y_{bh}$ que resulta no valor crítico de $V_h$ . ....	56
Figura 5.1 - Diagrama PQ WEC A. ....	60
Figura 5.2 - Diagrama PQ WEC B. ....	61
Figura 5.3 - Exemplo de diagrama unifilar da usina eólica utilizada para os estudos de caso. ....	63
Figura 5.4 – Diagramas PQ do WEC A nos terminais BT (azul) e da usina eólica no PAC (vermelho). .	64
Figura 5.5 – Diagramas PQ nos terminais dos WECs: WEC A (WECs 01 a 05 - Azul) e WEC B (WECs 06 a 10 - Laranja). ....	67

Figura 5.6 – Diagrama PQ no PAC com metade dos WECs com configuração de Q adicional (vermelho) e requisito mínimo do ONS (verde). .....	68
Figura 5.7 - Exemplo de diagrama esquemático de controlador de uma usina eólica.....	69
Figura 5.8 – Diagrama de Blocos do controle Q( $\Delta U$ ) do FCU no modelo EFCU07.cdu .....	69
Figura 5.9 - Exemplo de resposta do controle <i>voltage droop</i> em usina eólica para sobretensão e subtensão em dois tipos de rede.....	72
Figura 5.10 - Caso exemplo com localização da falta simulada. ....	73
Figura 5.11 - Resposta do WEC durante FRT. $U_f=0,85$ ; $I_q=0$ .....	75
Figura 5.12 - Resposta do WEC durante FRT. $U_f=0,76$ ; $I_q=0,26$ (capacitivo). ....	76
Figura 5.13 - Resposta do WEC durante FRT. $U_f=0,55$ ; $I_q=0,89$ (capacitivo). ....	76
Figura 5.14 - Resposta do WEC durante FRT. $U_f=1,10$ ; $I_q=0$ .....	77
Figura 5.15 - Resposta do WEC durante FRT. $U_f=1,13$ ; $I_q=-0,31$ (indutivo). ....	77
Figura 5.16 - Resposta do WEC durante FRT. $U_f=1,16$ ; $I_q=-0,61$ (indutivo). ....	78
Figura 5.17 - Curva característica do modo QU2 ( $I_q(U_f)$ ) obtida a partir dos resultados da simulação no ANATEM. ....	78
Figura 5.18 - Controle P(f) dos WECs ENERCON.....	79
Figura 5.19 - Controle <i>Inertia Emulation</i> dos WECs ENERCON.....	79
Figura 5.20 - Resposta do controle P(f) simulada no ANATEM.....	81
Figura 5.21 - Curva característica do controle P(f) obtida a partir dos resultados da simulação no ANATEM .....	82
Figura 5.22 - Resposta do controle <i>Inertia Emulation</i> simulada no ANATEM.....	83
Figura 5.23 – Usina eólica de 23,5 MW conectado a barra 7 do sistema IEEE 14 barras. ....	84
Figura 5.24 – Resultados de simulação no ANATEM de subfrequência no sistema IEEE 14 barras considerando usina eólica de 23,5 MW com e sem <i>Inertia Emulation</i> . ....	85
Figura 5.25 – Rede A: PAC na Barra 4 do sistema IEEE 14 barras. ....	87
Figura 5.26 - Rede B: PAC na barra 8 na rede STB-16. ....	87
Figura 5.27 - Rede C: PAC na barra 4 na rede STB-16. ....	88
Figura 5.28 - Abertura da rede no software HarmZs.....	89
Figura 5.29 - Criação de arquivo Batch para cálculo de nuvem de pontos de impedâncias harmônicas em diversas contingências na rede. ....	90
Figura 5.30 - Correntes harmônicas de três modelos de WECs.....	93
Figura 5.31 – Inserção de correntes harmônicas dos WECs no software HarmZs. ....	94
Figura 5.32 - Ferramenta do HarmZs (DHT Máxima) que permite o cálculo das distorções harmônicas de tensão no PAC considerando as nuvens de impedâncias calculadas anteriormente no arquivo PRX. ..	96
Figura 5.33 – Distorção harmônica de tensão do parque com WEC 3 conectado aos PACs A, B e C... ..	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Exemplo de medições de flutuação de tensão de um aerogerador de acordo com a IEC 61400-21.....	22
Tabela 2.2 – Formato da tabela de correntes harmônicas (2ª ordem até a 15ª ordem) de acordo com a norma IEC 61400-21.....	23
Tabela 2.3 – Especificação dos afundamentos de tensão da norma IEC 61400-21.....	24
Tabela 2.4 – Limites de distorção harmônica de corrente recomendados pela norma IEEE 519 – 2014. .....	27
Tabela 3.1 - Limites de distorção de tensão harmônica individuais (DTHI) para instalações do SIN.....	39
Tabela 3.2 - Requisitos mínimos para geração distribuída em função da potência.....	41
Tabela 3.3 – Limites de distorção harmônica de tensão harmônica total e individual (PRODIST).....	43
Tabela 5.1 – Dados do WEC A.....	60
Tabela 5.2 - Dados do WEC B. ....	60
Tabela 5.3 - Dados Transformador Unitário .....	61
Tabela 5.4 - Dados dos cabos de ligação entre WECs.....	62
Tabela 5.5 - Dados dos cabos de ligação entre WEC e subestação. ....	62
Tabela 5.6 - Dados transformador elevador da subestação da usina eólica. ....	62
Tabela 5.7 - Resumo do resultado de fluxo de potência para o cálculo da capacidade de potência reativa da usina eólica com 10 x WEC A. ....	64
Tabela 5.8 - Resumo resultado de fluxo de potência para o cálculo da capacidade de potência reativa da usina eólica com 5 x WEC A + 5 x WEC B.....	67
Tabela 5.9 - Resumo dados PAC calculados para simulação de controle de tensão. ....	71
Tabela 5.10 - Parâmetros ajustáveis do ExF4r1.cdu relevantes para a simulação de FRT.....	74
Tabela 5.11 - Casos de FRT simulados no ANATEM.....	75
Tabela 5.12 - Parâmetros do ExF4r1.cdu relevantes para a simulação do controle P(f) para sobrefrequências. ....	80
Tabela 5.13 - Resposta do controle P(f) simulada no ANATEM.....	81
Tabela 5.14 - Parâmetros do ExF4r1.cdu relevantes para a simulação do controle <i>Inertia Emulation</i> . ..	82
Tabela 5.15 – Correntes harmônicas de três modelos de WECs.....	92
Tabela 5.16 – Distorção harmônica individual de tensão (DHI) calculada com o método do polígono...	97
Tabela 5.17 - Distorção Harmônica Individual de Tensão (DHI) calculada com o método do setor anular. .....	98

## SIMBOLOGIA

abs.	Absorção de Potência/Corrente Reativa (comportamento indutivo)
ANAREDE	Programa de Análise de Redes Elétricas
ANATEM	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APCC	Código para a simulação de aplicação de curto circuito no ANATEM
AT	Alta Tensão
B( $\omega$ )	Susceptância da rede externa para a ordem harmônica de frequência $\omega$
BT	Baixa Tensão
cap.	Capacitivo
CDU	Extensão de Controle Definido pelo Usuário no ANATEM
cos $\phi$	Cosseno do ângulo de fase entre corrente e tensão (Fator de Potência)
DEVT	Comando que define os eventos da simulação no ANATEM
Diagrama PQ	Capacidade de Q em função de P
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i> (Gerador de Indução Duplamente Alimentado)
DHI	Distorção Harmônica Individual de Tensão
DTHI	Distorção de Tensão harmônica individual
DTHTS95%	Distorção de Tensão Harmônica Total (Percentil 95)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ExF4r1	Arquivo CDU do modelo dinâmico do Aerogerador ENERCON
F	Frequência
f <sub>ativação</sub>	valor limite para o acionamento da Inércia Sintética
FCU	<i>Farm Control Unit</i>
Flicker	Flutuação de Tensão
fp	Fator de Potência
FRT	<i>Fault Ride Through</i> (Suportabilidade para funcionamento durante faltas na rede)
FTQS	Especificação do aerogerador ENERCON com capacidade de fornecimento de Potência Reativa com P=0

$G(\omega)$	Condutância da rede externa para a ordem harmônica de frequência $\omega$
h	Ordem Harmônica
HarmZs	Programa de Comportamento Harmônico de Análise Modal
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
$I_h$	Corrente Harmônica do Equivalente Norton da ordem h
$I_L$	Corrente Máxima da Carga (componente fundamental) no Ponto de Conexão em condições normais de operação
$I_n$ :	Corrente Nominal do aerogerador em Amperes
ind.	Indutivo
inj.	Injeção de Potência/Corrente Reativa (capacitivo)
$I_q$	Corrente reativa injetada/absorvida pelo aerogerador durante simulação de falta
$I_{sc}$	Corrente de Curto-Circuito
K	Fator de Proporcionalidade entre $(\Delta I_q/I_n)$ e V
$L_{fic}$	Indutância Fictícia para cálculo de Flicker
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Potência Ativa
$P(f)$	Potência Ativa em função da frequência
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PAR	Plano de Ampliações e Reforços do SIN
$P_{disponível}$	P da usina eólica no momento da falta na rede
$P_{eólica}$	Potência Nominal da usina eólica
$P_{max}$	Potência Ativa Máxima da usina eólica
$P_{nom}$	P nominal do aerogerador
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PROINFA	Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
pu	Por Unidade
Q	Potência Reativa
$Q(\Delta U)$	Potência Reativa em função da variação de tensão ( <i>Voltage-Droop</i> )

$Q_{\max}$	Potência Reativa Máxima
$Q_{\min}$	Potência Reativa Mínima
QU2	Modo de Operação durante falta na rede com injeção controlada de corrente reativa
$R(\omega)$	Resistência da rede externa para a ordem harmônica de frequência $\omega$
RCC	Razão entre a Potência de Curto Circuito do PAC e a Potência Instalada da usina eólica
$R_{\text{fic}}$	Resistência Fictícia para cálculo de Flicker
ROCOF	<i>Rate of Change of Frequency</i>
$R_{\text{PAC}}$	Resistência entre a usina eólica e a barra infinita
SAV	Extensão do arquivo com histórico de casos do ANAREDE
$S_{\text{base}}$	Base da Potência no ANAREDE
$S_{\text{cc}}$	Potência de Curto Circuito no PAC
SE MT	Barra de Média Tensão da Subestação do PAC
SIN	Sistema Interligado Nacional
SLACK	Barra de Referência
STB	Extensão do arquivo do caso a ser simulado no ANATEM
STB-16	Sistema-Tese Brasileiro de 16 barras
$U_f$	Tensão nos terminais do aerogerador durante a simulação de falta
$u_{\text{fic}}(t)$	Tensão Fictícia para cálculo de flutuação de tensão
$V_h$	Tensão Harmônica de ordem h
$X(\omega)$	Reatância da rede externa para a ordem harmônica de frequência $\omega$
X/R	Relação entre Reatância e Resistência da Impedância da Rede
$X_{\text{PAC}}$	Reatância entre a usina eólica e a barra infinita
WEC	<i>Wind Energy Converter (Aerogerador)</i>
WEC BT	Barra de Baixa Tensão do Transformador Interno do Aerogerador
WEC MT	Barra de Média Tensão do Transformador Interno do Aerogerador
$Y_{\text{bh}}$	Admitância harmônica de ordem h externa à usina eólica
$Y_{\text{ih}}$	Admitância harmônica de ordem h interna da usina eólica
$Z_{\text{bh}}$	Impedância harmônica de ordem h externa à usina eólica
$Z_{\text{ih}}$	Impedância harmônica de ordem h interna da usina eólica

$Z_{PAC}$	Impedância Equivalente da Rede Elétrica vista pela usina eólica a partir do PAC
$Z_{PAC}$	Impedância entre a usina eólica e a barra infinita
$Z_{PM}$	Modo de Operação durante falta na rede sem injeção de corrente
$\Delta f$	Varição de Frequência para a simulação de distúrbio de frequência
$\Delta I_q$	Corrente reativa durante a falta em relação ao valor anterior a falta em amperes

# SUMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	Considerações Iniciais .....	16
1.2	Objetivos.....	18
1.3	Estrutura da Dissertação .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE NORMAS INTERNACIONAIS</b> .....	<b>19</b>
2.1	<b>IEC 61400-21</b> .....	<b>19</b>
2.1.1	Flutuação de Tensão .....	21
2.1.2	Correntes Harmônicas.....	22
2.1.3	Resposta a Afundamentos de Tensão .....	23
2.1.4	Outros Parâmetros Medidos.....	25
2.1.5	Desafios para a próxima revisão da IEC 61400-21 .....	25
2.2	<b>IEEE 519</b> .....	<b>26</b>
2.3	Conclusões do Capítulo.....	28
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE NORMAS NACIONAIS - CÓDIGOS DE REDE</b> .....	<b>30</b>
3.1	<b>Aerogerador versus Ponto de Acoplamento Comum (PAC)</b> .....	<b>30</b>
3.2	<b>Códigos de Rede – Sistema de Transmissão</b> .....	<b>32</b>
3.2.1	Capacidade de Potência Reativa .....	33
3.2.2	Controle de Tensão .....	34
3.2.3	Inercia Sintética e Controle Potência versus Frequência.....	35
3.2.4	Suportabilidade a subtensões e sobretensões ( <i>Fault Ride Through</i> ) .....	37
3.2.5	Qualidade de Energia .....	38
3.3	<b>Códigos de Rede – Sistema de Distribuição</b> .....	<b>40</b>
3.4	Conclusões do Capítulo.....	43
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS DE REDE: METODOLOGIA DE CONFORMIDADE AOS REQUISITOS</b> .....	<b>45</b>
4.1	Capacidade de Potência Reativa.....	46
4.2	Controle de Tensão .....	48
4.3	Suportabilidade a subtensões e sobretensões .....	50
4.4	Resposta a distúrbios de frequência.....	51
4.5	Qualidade de Energia .....	53
4.6	Conclusões do Capítulo.....	57



<b>5</b>	<b>METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DE REQUISITOS: ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Capacidade de Potência Reativa.....</b>	<b>59</b>
5.1.1	Dados da Usina Eólica Exemplo .....	59
5.1.1.1	Aerogerador .....	60
5.1.1.2	Transformador Unitário .....	61
5.1.1.3	Rede Interna .....	61
5.1.1.4	Transformador Elevador da Subestação .....	62
5.1.2	Rede Modelada.....	62
5.1.3	Casos Simulados .....	63
<b>5.2</b>	<b>Controle de Tensão .....</b>	<b>68</b>
<b>5.3</b>	<b>Suportabilidade a subtensões e sobretensões (<i>Fault Ride Through</i>) .....</b>	<b>73</b>
<b>5.4</b>	<b>Resposta a distúrbios de frequência.....</b>	<b>78</b>
5.4.1	Controle P(f) - Sobrefrequência.....	80
5.4.2	Controle <i>Inertia Emulation</i> - Subfrequência.....	82
<b>5.5</b>	<b>Qualidade de Energia .....</b>	<b>86</b>
5.5.1	Rede Externa .....	86
5.5.2	Rede Interna e Aerogeradores .....	91
5.5.3	Distorção Harmônica de Tensão .....	96
<b>5.6</b>	<b>Conclusões do Capítulo.....</b>	<b>100</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>PUBLICAÇÕES.....</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>107</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

A história da energia eólica no Brasil começou nos anos 90 com as concretizações de projetos originados de parcerias entre universidades e empresas distribuidoras de energia [1]. Em 2002 o governo brasileiro aprovou a lei de implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) que representou um marco importante para o setor no país, pois permitiu aos desenvolvedores de projetos eólicos a venda da energia a partir de fontes alternativas (eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa) com uma tarifa mais atraente de forma similar aos sistemas *feed-in* aplicados em outros países, ou seja, o contrato de venda de energia possuía uma tarifa fixa subsidiada pelo governo [2]. A existência do PROINFA possuía prazo determinado, o encerramento oficial ocorreu em 2010 apresentando um balanço de 54 usinas e 1,3 GW de capacidade instalada de energia eólica [3].

A transição do PROINFA, caracterizado por possuir o preço de energia subsidiado, para um modelo de concorrência direta, iniciou com o leilão de reserva de 2009 que marcou a entrada da energia eólica no mercado regulado de energia brasileiro, no qual os projetos com tarifas de energia mais baixas são vencedores de um contrato de venda de energia com duração de 20 anos para suprir a demanda das distribuidoras. Desde então, os projetos eólicos vêm participando com sucesso de diversos leilões de energia resultando na capacidade instalada acumulada de mais de 15 GW de energia eólica em abril de 2019 [4], chegando entre os 7 países com maior capacidade instalada no mundo [5] e com participação da energia eólica na matriz de energia elétrica brasileira maior do que 9% [4].

Entretanto, o aumento na importância da energia eólica para o sistema elétrico brasileiro resulta em uma mudança do paradigma de operação, visto que a fonte eólica apresenta maior variabilidade dificultando a previsibilidade do despacho da geração o que pode impactar diretamente no controle de tensão, frequência e na qualidade de energia, ou seja, a fonte eólica modificou seu status de fonte de energia alternativa para uma fonte de energia pertencente, de fato, à matriz de energia elétrica do Brasil. Essa realidade representa para organizações como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e ONS (Operador Nacional do

Sistema Elétrico), uma modificação significativa das metodologias de regulação, planejamento e operação do sistema elétrico brasileiro.

O fato de o sistema elétrico apresentar maior inserção de uma fonte de energia variável na rede torna o controle de frequência mais elaborado. Por outro lado, a utilização de dispositivos de eletrônica de potência permite que os equipamentos de geração realizem um fornecimento controlado de potência reativa que, usado da maneira correta, pode evitar a instalação de equipamentos adicionais na rede elétrica para o controle de tensão.

Nesse sentido, os fabricantes de aerogeradores trabalham para disponibilizar ferramentas que diminuam o efeito negativo da variabilidade do recurso eólico, com a implementação de controles de potência ativa versus frequência e limitação de gradiente de potência ativa, além de melhorias nas estratégias de controle de tensão disponibilizadas pelas usinas eólicas [6].

Em paralelo, a ANEEL, em conjunto com o ONS, publicou em dezembro de 2016 uma revisão dos requisitos técnicos mínimos para a conexão de centrais de geração ao SIN, entre elas os aerogeradores, no qual são exigidos das usinas eólicas de forma concomitante a sua função principal de fornecimento de potência ativa (geração de energia útil), a participação ativa no controle de tensão da rede e suporte no controle de frequência da rede.

Outro tema de atenção na discussão da integração de aerogeradores à rede elétrica é o impacto destes equipamentos na qualidade de energia do sistema elétrico, principalmente nos níveis de distorção harmônica. Neste caso, os fabricantes de equipamento seguem as diretrizes de normas internacionais, principalmente a IEC 61400-21 para a realização das medições de correntes harmônicas de seus modelos, porém, para avaliação das distorções de harmônicos no ponto de conexão de uma usina eólica é necessária uma avaliação local definida por cada operador de rede.

Este tipo de avaliação é tecnicamente complexa, principalmente pela dificuldade de se determinar a responsabilidade na emissão de correntes harmônicas, visto que os aerogeradores, como potenciais fontes de harmônicos, normalmente são conectados em uma rede elétrica que também possui distorções harmônicas pré-existentes. No Brasil, o ONS realiza tal avaliação baseada em uma combinação de estudos e medições cujo procedimento está detalhado em um guia específico fornecido pelo ONS [7].

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste em analisar de forma crítica os novos requisitos para a conexão de usinas eólicas ao SIN, visando o desenvolvimento de metodologia unificada de verificação da conformidade, baseada em estudos de caso realizados através de simulações computacionais utilizando os softwares do CEPEL (ANAREDE, ANATEM e HarmZs) e as informações fornecidas para um modelo de aerogerador *Full-Converter*.

Além disso, os objetivos também envolvem a apresentação de um levantamento bibliográfico e de estudos comparativos das principais normas de qualidade de energia nacionais e internacionais relacionadas com sistemas de geração eólica de grande porte.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

O capítulo 1 apresenta um resumo histórico da fonte eólica e do tema de qualidade de energia na conexão desta fonte à rede elétrica, assim como os objetivos esperados pela realização desta dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica das principais normas internacionais associadas ao tema de qualidade de energia para usinas eólicas.

O capítulo 3 descreve os códigos de rede nacionais que devem ser considerados ao se conectar usinas eólicas no Brasil, seja na conexão ao SIN (Sistema Interligado Nacional) através dos Procedimentos de Rede do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) ou para a conexão nas redes de distribuição através do PRODIST da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

No capítulo 4 são detalhadas as metodologias para a realização de estudos para a verificação do cumprimento aos principais requisitos dos Procedimentos de Rede relativos a usinas eólicas utilizando os softwares padrão do sistema elétrico brasileiro (ANAREDE, ANATEM e HarmZs)

No capítulo 5 são realizados estudos de caso através de exemplos desenvolvidos nas ferramentas computacionais indicadas pela ONS para concretizar a metodologia proposta no capítulo anterior.

## 6 Conclusões Gerais

O trabalho abordou as principais normas de qualidade de energia que são consideradas em projetos de energia eólica de grande porte, dando destaque à norma IEC 61400-21, que é referência para a medição de protótipos de aerogerador sendo usada para certificação de tipo pela maioria dos fabricantes de aerogeradores avaliando aspectos como corrente harmônicas e comportamento frente a distúrbios de tensão (*Fault Ride Through*).

É importante salientar que a norma está em processo de revisão para corrigir algumas deficiências da versão atual, tal como, a inexistência de qualquer consideração sobre o efeito de harmônicos de *background* em medições de correntes dos aerogeradores.

No âmbito nacional, foram descritos os requisitos do ONS para a conexão de usinas eólicas ao SIN. O levantamento destes requisitos já considera que foram revistos recentemente com o novo Submódulo 3.6 publicado em dezembro de 2016, e apresenta mudanças significativas que irão impactar diretamente na operação das futuras usinas eólicas tais como: controle de tensão, inércia sintética e injeção de corrente reativa durante falta.

Com base nos novos requisitos de rede do ONS, foram sugeridas metodologias para verificar se uma usina eólica cumpre com os principais requisitos do ONS apenas com simulações utilizando os programas do CEPEL (ANAREDE, ANATEM e HarmZs).

A avaliação das metodologias proposta foi feita com o auxílio de estudos de caso em uma usina eólica hipotética. Os resultados demonstraram que é possível verificar antes da conexão de uma usina eólica se os requisitos mínimos exigidos pelo ONS serão cumpridos, o que permite, tanto ao ONS, quando ao dono da usina eólica, maior previsibilidade da operação do parque eólico e mitigação de riscos associados ao tema de conexão elétrica.

Como a maior parte dos estudos dependem de informações de terceiros tais como fabricantes do aerogerador, transformadores, cabos, etc. Tais dados devem ser coletados e parametrizados de maneira criteriosa.

Além disso, os resultados das simulações dos estudos de caso demonstraram que a tecnologia utilizada em um aerogerador *Full-Converter* permite que a usina eólica cumpra com as novas exigências do ONS. Comprovando uma grande evolução dos equipamentos utilizados atualmente na indústria eólica, com participação mais ativa no

controle de tensão, contribuição para a melhoria da rede em caso de distúrbios de tensão e participação no controle de frequência, sem a necessidade de instalação de equipamentos adicionais na usina eólica, ou seja, apenas com as capacidades inerentes aos inversores e ao controle do aerogerador.

Os resultados dos estudos de caso permitiram uma análise crítica da metodologia de estudos harmônicos proposta pelo ONS, pois, ao avaliar a sensibilidade do estudo em relação a algumas variáveis, tais como, tipo de método escolhido para o cálculo das impedâncias da rede externa, tipo de aerogerador utilizado ou a natureza do PAC, fica claro que os resultados de estudos possuem muitas incertezas e a responsabilidade das supostas violações sempre é atribuída às usinas eólicas.

Por fim, foram apresentadas propostas de metodologias para realização de cada uma das verificações requeridas de conexão de usinas eólicas ao SIN, trazendo orientações e aspectos relacionados com os dados da usina necessários, casos a serem explorados e índices de mérito requeridos. O conjunto das orientações e procedimentos propostos integra uma metodologia unificada de verificação da conformidade que pode ser facilmente reproduzida, representando um ambiente poderoso para a realização de testes no setor eólico.

Além disso, devido à recente revisão dos requisitos, atualmente (2019) não há registro de um documento técnico publicado que trate de forma integral o conjunto das metodologias propostas nesta dissertação.

## 7 Propostas de Trabalhos Futuros

Com o objetivo de dar continuidade na avaliação do tema abordado na dissertação, sugerem-se os seguintes temas como trabalhos futuros:

- Comparação dos diversos modelos de aerogeradores (DFIG e *Full-Converter*) comercializados no Brasil através da resposta de cada modelo aos requisitos do ONS com o auxílio dos modelos na plataforma ANATEM disponibilizados na base do ONS;
- Validação do modelo do aerogerador em ANATEM em comparação a medições de campo de *Fault Ride Through*;
- Simulação das usinas eólicas existentes em uma certa parte da rede elétrica do Brasil considerando sua participação ativa no controle de tensão e frequência;
- Avaliar a resposta do controle de tensão de um parque eólico ao se conectar a uma rede exemplo e avaliar a modificação dos parâmetros de controle;
- Análise da atribuição de responsabilidade sobre a emissão de harmônicos considerando a revisão da norma IEC 61400-21;
- Avaliação da sensibilidade do estudo de harmônicos proposto pelo ONS em relação às variáveis consideradas (fonte de corrente harmônica, rede interna da usina eólica e rede externa da usina eólica) e as incertezas associadas a cada uma destas variáveis;
- Proposta de um procedimento de verificação dos Procedimentos de Rede com medições em campo.

## 8 Publicações

- D. M. Caldas, F.A.S. Gonçalves, F.P. Marafão, A. Mendonça, “Aerogeradores Full-Converter Frente aos Novos Procedimentos de Rede do ONS Relativos a Distúrbios de Frequência e Tensão”. Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2018;
- D. M. Caldas, “Impacto na Qualidade de Energia Para a Integração de Usinas Eólicas no SIN”. VII Seminário de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017;
- D.M. Caldas, “Estudo de Comportamento de Aerogerador Frente a Distúrbios de Tensão com Injeção de Corrente Reativa Durante Falta”. VIII Seminário de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018;
- D. M. Caldas, F.A.S. Gonçalves, F. P. Marafão, H. K. M. Paredes, A. C. G. Martins, “General Overview of Wind Power in Brazil – Technologies, Potential and Project Guideline – Outlook 2016”. Congresso de Energias Renováveis – CONER, 2017;
- D.M. Caldas, F.A.S. Gonçalves, F.P. Marafão, A. Mendonça, “ANATEM-based Platform for Verifying Wind Turbine Compliance to the New Requirements of the Brazilian Grid Code under Voltage and Frequency Disturbances”. Revista IEEE Latin America Transactions (aguardando revisão).



## 9 Referências

- [1] ANEEL, “Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2ª edição,” 2005, pp. 105-108.
- [2] M. Muñoz, V. Oschmann e J. D. Tabara, “Harmonization of renewables electricity feed-in laws in the European Union,” *Energy Policy* 35, pp. 3101-3114, 05 2007.
- [3] Eletrobras, “Dados de Geração das CGEE Participantes do Proinfa.,” [Online]. Available: <http://eletrobras.com/pt/Paginas/Proinfa.aspx>. [Acesso em 04 08 2017].
- [4] ABEEOLICA, “Infovento 10,” 17 04 2019. [Online]. Available: <http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>. [Acesso em 03 05 2019].
- [5] GWEC, “Global Wind Report 2018,” 04 2019. [Online]. Available: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>. [Acesso em 03 05 2019].
- [6] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, Chichester: John Wiley, 2005.
- [7] ONS, “Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras,” 03 2018. [Online]. Available: [https://agentes.ons.org.br/administracao\\_transmissao/qualidadeenergia.aspx](https://agentes.ons.org.br/administracao_transmissao/qualidadeenergia.aspx). [Acesso em 05 05 2019].
- [8] IEC International Electrotechnical Commission, “IEC 61400-21 Wind turbine generator systems – Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines,” IEC Copyright, Genebra, Suíça, 2008.
- [9] B. Andresen, P. E. Sorensen, F. Santjer e J. Niiranen, “Overview, Status and Outline of the New Revision for the IEC 61400-21 - "Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines",” em *12th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*, Genebra, Suíça, 2013.

- [10] IEC International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-15," Genebra, Suíça.
- [11] J. Guitierrez, J. Ruiz, L. Leturiondo e A. Lazkano, "Flicker Measurement System for Wind Turbine Certification," *IEEE Transactions on Instruments and Measurement*, vol. 58, pp. 375 - 382, 2009.
- [12] H. Emanuel, S. Wachtel, M. Schellschmidt e S. Adloff, "Power Quality Measurements of Wind Energy Converters with Full-Scale Converter according to IEC 61400-21," em *Electrical Power Quality and Utilisation*, Lodz, Poland, 2009.
- [13] IEC International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-7 Testing and measurement techniques," Copyright IEC, Genebra, Suíça.
- [14] IEEE, "IEEE St 519," 1992.
- [15] IEEE, "IEEE St 519," 2014.
- [16] IEC International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-30 Testing and measurement techniques," Genebra, Suíça.
- [17] P. F. Ribeiro, "Common Misapplications of the IEEE 519 Harmonic Standard: Voltage or Current Limits," em *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, USA, 2008.
- [18] ANEEL, "PRODIST ANEEL," ANEEL, [Online]. Available: [www.aneel.gov.br/prodist](http://www.aneel.gov.br/prodist). [Acesso em 28 Maio 2017].
- [19] ONS, "Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.," 12 2016. [Online]. Available: [http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento\\_rede/procedimento\\_rede.aspx](http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento_rede/procedimento_rede.aspx). [Acesso em 06 2017].
- [20] ONS, "Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia da Rede Básica," 12 2016. [Online]. Available: [http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento\\_rede/procedimento\\_rede.aspx](http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento_rede/procedimento_rede.aspx). [Acesso em 06 2017].
- [21] "PRODIST Módulo 3 ANEEL," 01 Junho 2017. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/modulo-3>. [Acesso em 01 Junho 2017].

- [22] ANEEL, “PRODIST Módulo 8 ANEEL,” 01 Janeiro 2017. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>. [Acesso em 28 Maio 2017].
- [23] ANEEL, “Resolução Normativa N° 482,” 2012.
- [24] ANEEL, “Resolução Normativa N°687,” 2015.
- [25] COSERN, “Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição da Cosern,” 2012.
- [26] COELBA, “Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição em Baixa Tensão,” 2014.
- [27] CELPE, “Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição,” 2016.
- [28] CEMIG, “Requisitos para Conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição da CEMIG,” 2016.
- [29] ONS, “Submódulo 18.2 - Relação dos Sistemas e Modelos Computacionais,” 01 01 2017. [Online]. Available: <http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. [Acesso em 04 08 2017].
- [30] ONS, “Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos,” 08 2018. [Online]. Available: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. [Acesso em 17 04 2019].
- [31] W. F. Alves, “Proposição de Sistemas-Teste para Análise Computacional de Sistemas de Potência,” Dissertação (Mestrado em Computação), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.
- [32] CEPEL, “Programa de Análise de Redes - ANAREDE - Manual do Usuário,” 2017.
- [33] W. D. Stevenson, Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill, 1982.
- [34] CEPEL, “Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM - Manual do Usuário,” CEPEL, 2016.
- [35] ENERCON, “ExF4\_ANATEM Model Documentation,” 2017.
- [36] ENERCON, “EFCU07 - ANATEM Model Technical Description,” 2016.
- [37] CIGRÉ, “671 - Connection of wind farms to weak AC networks,” 2016.
- [38] ENERCON, “E-92 Overview of Technical Data,” [Online]. Available: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-92/>. [Acesso em 08 07 2019].

- [39] D. Schwanz, “Análise da Distorção Harmônica de um Parque Eólico através da sua Modelagem no Domínio do Tempo e da Frequência.,” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- [40] L. F. M. Machado, “Aspectos Harmônicos na Geração Eólica,” Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [41] D. V. Oliveira, M. M. Lima e P. A. B. Block, “Análise de Indicadores Harmônicos de um Complexo Eólico Utilizando o Método do Lugar Geométrico das Admitâncias,” Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica), Universidade Técnica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- [42] W. F. Alves, “STB - Sistemas-Teste Brasileiros para Uso Didático e Análise Computacional de Sistemas Elétricos de Potência,” 2011. [Online]. Available: <http://www.sistemas-teste.com.br/>. [Acesso em 30 03 2019].
- [43] S.Y.Liu, G.S.Lara e S.R.Silva, “Análise da Sensibilidade das Distorções Harmônicas de Usinas Eólicas em Função do Nível de Curto Circuito no PAC utilizando a Metodologia de Lugares Geométricos do ONS,” em *SBSE*, Goiânia, Brasil, 2012.
- [44] M.P.Carli e R.E.S.Ristow, “Avaliação da Influência das Tensões Pré-Existentes na Rede Sobre as Medições de Correntes Harmônicas em Aerogeradores e a Aplicação de Probabilidades às Correntes.,” em *SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Brasil, 2015.
- [45] F. C. Veliz, S. L. Varricchio e C. d. O. Costa, “Metodologia para a Representação de Redes Elétricas por Polígonos de Admitâncias para Estudos de Impacto Harmônico,” em *XXI SNPTEE*, Brasília, 2013.
- [46] M. P. Carli, R. Antunes, O. J. Rothstein, B. T. Meyer, R. S. Salengue e R. T. Carvalho, “As Dificuldades Enfrentadas no Projetos de Filtros Frente às Baixas Distorções Harmônicas Provocadas pelos Parques Eólicos,” em *XXIV SNPTEE*, Curitiba, 2017.