

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

### IMPACTO HARMÔNICO DA COMPENSAÇÃO REATIVA DEFINIDA NO PARECER DE ACESSO DO ONS NAS BARRAS DE 34,5 KV DE UM PARQUE EÓLICO: ESTUDOS DE CASOS

PATRICK ROBERTO DE ALMEIDA(1);MATEUS DUARTE TEIXEIRA(2);FLÁVIO RESENDE GARCIA(3)  
BREE ENERGY(1);UFPR(2)

#### RESUMO

O aumento na construção de fontes de energia renováveis, como energia eólica e solar, tem aumentado a preocupação com a qualidade da energia elétrica no ponto de acoplamento comum de conexão dessas fontes. Os estudos de parecer de acesso para o ONS tem avaliado o ponto de conexão em 230kV ou 138kV, porém tem deixado de lado a barra interna de 34,5kV. Este artigo vem apresentar uma análise da simulação de um complexo eólico existente, contemplando as interações dos bancos de capacitores com o barramento de 34,5kV e os possíveis danos causados devido a uma ressonância paralela franca.

#### PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Energia Elétrica, Bancos de Capacitores e Filtros Harmônicos, Ressonâncias Paralelas

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Na última década o mercado brasileiro tem avançado fortemente na construção e operação de novas fontes renováveis de energia, sobretudo a energia eólica, aumentando a participação dessa geração na matriz energética. Complexos eólicos tem sido construído em vários lugares do país, em sua maioria no Nordeste, uma vez que as condições de velocidade dos ventos são favoráveis naquela região.

Em conjunto com os parques eólicos, projetos de complexos fotovoltaicos de grande porte também começaram a ser instalados também na região nordeste do país, aproveitando a proximidade do Equador e dos altos índices de exposição solar durante o ano e, em alguns casos, aproveitando a própria área do parque eólico existente.

Todos estes parques têm como característica a geração de componentes harmônicas, bem como a compensação reativa necessária à operação dos parques, eólicos e solares, dentro de determinados limites técnicos constantes no procedimento da rede básica.

Para a implementação de uma fonte renovável a partir da geração eólica ou solar, são realizados estudos de acesso solicitados nos procedimentos de rede pelo Operador Nacional do Sistema, sobretudo estudos elétricos como fluxo de carga, fluxo harmônico, curto-circuito, análise dinâmica e outros.

Os estudos do parecer de acesso requeridos pela ONS avaliam os índices de qualidade da energia elétrica visando obter resultados que atendam a legislação vigente no ponto de acoplamento comum (PAC) com a rede básica.

A energização de bancos de capacitores e/ou filtros de harmônicos conectados aos barramentos de 34,5kV dos complexos eólicos podem gerar comportamentos de ressonância harmônica que são danosos aos próprios equipamentos de compensação reativa, aos aerogeradores e demais equipamentos do sistema [1],[2]. Nos últimos anos diversos problemas tem sido detectados em vários parques eólicos e solares, problemas que vão desde a queima de capacitores e reatores até a queima de inversores e, até em alguns casos, incêndio nos aerogeradores, cessando a geração e causando sérias perdas financeiras.

Os problemas descritos acima podem ser evitados se fossem realizados estudos prévios nos barramentos de 34,5kV, visando garantir a operação e a suportabilidade dos equipamentos de compensação reativa e filtragem de harmônicos. Os estudos para os barramentos de 34,5kV devem contemplar simulações de fluxo de carga, fluxo harmônico, curva de impedância com a frequência e transitórios de energização e desenergização com o objetivo de detectar possíveis pontos com probabilidade de danos à geração de energia, eólica e/ou solar.

Este artigo tem por objetivo demonstrar os problemas de qualidade de energia que ocorrem, e vem apresentar uma análise da simulação de um complexo eólico existente, contemplando as interações dos bancos de capacitores com o barramento de 34,5kV e os possíveis danos causados devido a uma ressonância paralela franca.

Ao final os autores pretendem conscientizar todos os agentes envolvidos, desde investidores, integradores, operadores, fabricantes e empresas de engenharia, sobre a importância imprescindível da realização dos estudos de qualidade da energia elétrica (QEE) voltados para a barra de 34,5 kV, antes da instalação dos equipamentos de compensação reativa e filtragem de harmônicas, e propor soluções que garantam a operação segura destes parques de geração de energia renovável.

## 2.0 - RESSONANCIA HARMÔNICA PARALELA

Fisicamente, uma ressonância harmônica ocorre à uma frequência particular, quando uma reatância indutiva ( $X_L$ ) se equipara numericamente a uma reatância capacitiva ( $X_C$ ) adjacente. Se as duas reatâncias vistas do ponto de injeção da fonte harmônica estão em série, então uma baixa impedância será detectada (ressonância série). Se, por outro lado, as duas reatâncias se encontram em paralelo, a denominada impedância equivalente será bastante alta (ressonância paralelo). Se a conexão do circuito é série ou paralela, isto dependerá do ponto de vista do local de injeção do sinal harmônico, assim como, da configuração do sistema e da carga. Algo só verificado através de estudos computacionais de fluxo harmônico.

A ressonância paralela ocorre quando a corrente harmônica gerada pela carga não linear (inversores de frequência, fornos à arco e de indução, geração fotovoltaica e eólica, etc) encontra uma situação semelhante ao circuito ilustrado na Figura 1, isto é, a indutância e a capacitância vistas pela fonte geradora de harmônicos estão conectadas em paralelo. Embora não representado, o efeito da resistência própria do indutor é de reduzir a impedância do circuito paralelo de um valor infinito para um valor finito. Da mesma forma, o efeito de uma resistência em paralelo com a combinação LC é de proporcionar um caminho adicional para a circulação da corrente harmônica gerada pela fonte, e desta forma, causar uma redução da tensão harmônica que aparece junto aos terminais da carga.

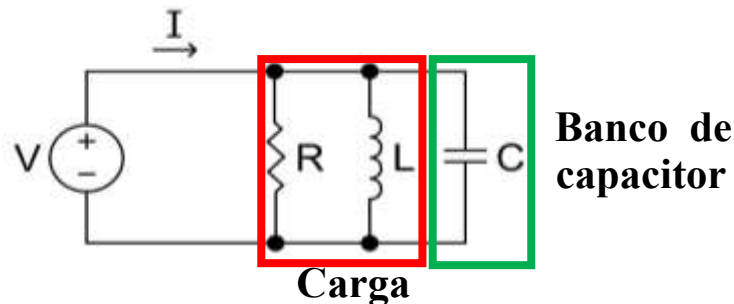


FIGURA 1 – Circuito elétrico paralelo.

A equação (1) apresenta a impedância equivalente do circuito elétrico paralelo.

$$Z_{eq} = R // X_L // X_C \quad \Rightarrow \quad X_{eq} = \frac{X_L \times (-X_C)}{X_L - X_C} \quad (1)$$

Porém, se para uma frequência harmônica  $f_h$ ,  $X_L = X_C$

$$X_h \sim \infty \quad \Rightarrow \quad Z_h \sim \infty \quad (2)$$

Observa-se que na frequência de ressonância, a admitância do circuito é puramente resistiva. Isto significa um alto valor para a impedância quando da ocorrência da ressonância.

A Figura 2, apresenta uma ilustração destacando as principais características de uma ressonância paralela.

Na ressonância, a admitância do circuito é mínima, ou seja, a impedância é máxima

Disto resulta que, um circuito paralelo ressonante, dificulta o caminho da corrente que possui uma frequência igual a da ressonância

Na ressonância, a admitância e a impedância apresentam característica resistiva

Para frequência abaixo da ressonância o circuito tem predominância indutiva e a para frequências acima, capacitivas

FIGURA 2 – Características da ressonância paralela.

Assim, obedecendo a lei de ohm clássica ( $V_h = Z_h I_h$ ), mesmo que a amplitude da corrente harmônica na frequência de ressonância seja baixa, devido ao alto valor da impedância resultante do circuito (na ressonância franca ela tende ao infinito), a tensão resultante na frequência harmônica será muito alta. Desta forma, equipamentos submetidos a esta tensão poderão ter seu isolamento comprometido levando a falhas e curto-circuito.

No caso de usinas eólicas, os estudos desenvolvidos consideram na maioria das vezes o efeito destes empreendimentos para o sistema elétrico, ou seja, todo estudo de fluxo harmônico é conduzido a se evitar que os níveis de tensão harmônica não sejam ultrapassados no ponto de acoplamento ao sistema elétrico de potência, o que geralmente acontece em níveis de tensão superiores a 138 kV, após os transformadores responsáveis pela conexão da usina com o SEP.

Contudo, condições operacionais e características de equipamentos podem conduzir instalações elétricas internas à usina à condições de ressonância harmônica não prevista nos estudos solicitados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e concessionárias de energia.

No que diz respeito à condições operacionais podemos citar o fato de que inversores geram diferentes níveis de correntes harmônicas dependendo da potência injetada na rede elétrica. Mesmo medições de 10 minutos que consideram a probabilidade 95% podem não detectar momentos críticos de injeção de correntes harmônicas capazes de sensibilizarem um circuito ressonante.

A instalação e características de equipamentos como a bancos de reatores empregados para redução da tensão na barra de MT da subestação associado à capacitância de cabos, podem formar circuitos ressonantes a depender de configuração imposta em algum momento da operação de parques eólicos e fotovoltaicos.

Ambas situações, na maioria dos casos não são previstas ou detectadas pelos estudos de impacto ao SIN. Por esse motivo, é de fundamental importância olhar para o sistema para o atendimento à regulação imposta, porém, da mesma forma, é muito importante realizar estudos olhando para dentro da instalação da usina solar ou eólica, para se evitar distúrbios que podem levar a falhas de equipamentos e grandes perdas financeiras.

### 3.0 - MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICA

Para a execução dos trabalhos utilizou-se o programa **PQF - Power Quality Filtros**. Este programa utiliza técnicas no domínio da frequência para a solução do fluxo harmônico e fluxo de potência em sistemas elétricos de potência, com tratamento monofásico, ou seja, considerando o sistema elétrico em estudo equilibrado.

Sua metodologia de simulação consiste na solução linear da matriz admitância harmônica, onde, para cada frequência, o programa realiza o cálculo do fluxo harmônico, fornecendo como resultado as distorções harmônicas de tensão e corrente nas diversas barras e linhas do sistema em estudo. O programa PQF também realiza o cálculo do fluxo de potência determinando os valores de tensão, corrente e potências RMS em cada barra e circuitos as elas conectados.

O programa traz incorporados os diversos modelos de componentes elétricos que compõem um sistema elétrico tais como: transformadores, banco de capacitores, linhas de transmissão, motores de indução, cargas lineares, filtros harmônicos, etc. As cargas não lineares são modeladas como fontes de correntes harmônicas, cujos dados (ordem harmônica, amplitude e ângulo de fase) podem ser oriundos de medições de campo ou a partir de soluções analíticas de modelos que representam à operação destas cargas em regime permanente.

### 4.0 - DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

#### 4.1 - Diagrama unifilar

A Figura 3 abaixo apresenta o diagrama unifilar resumido do complexo eólico em análise.

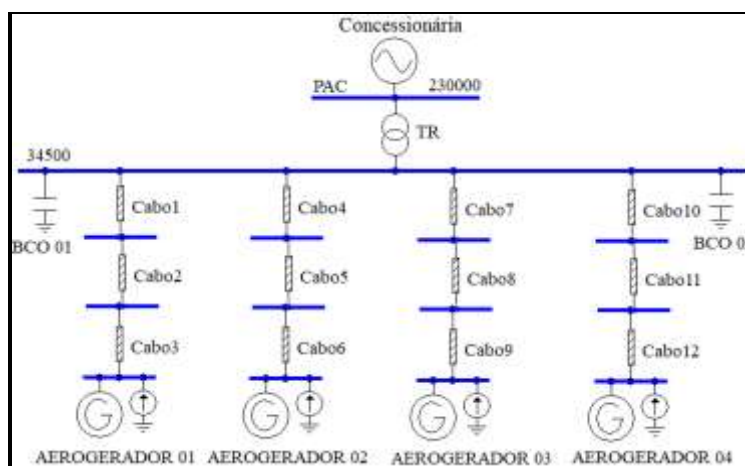


FIGURA 3 – Diagrama unifilar geral.

#### 4.2 Potência de curto-circuito no pac

A corrente de curto-circuito em 34,5 kV considerada nas simulações é apresentada na Tabela 1.

**TABELA 1 – Nível de curto-circuito no 230kV e em 34,5kV.**

Local	Tensão (kV)	Sc (MVA)	I (kA)
PAC	230	3040	7,63
34,5 kV	34,5	1000	16,73

Adotou-se um ângulo de curto-circuito de 85°.

#### 4.3 Dados do Transformador

A modelagem dos transformadores geral depende de suas características nominais. A Tabela 2 apresenta as características nominais dos transformadores conforme informações obtidas por e-mail.

**TABELA 2 – Características elétricas dos Transformadores.**

Transformadores	Tensão (kV)	Potência (MVA)	Z (%)
TR	230 – 34,5	120	12,00

#### 4.4 Dados do Banco de Capacitores

A Tabela 3 abaixo apresenta as principais características elétricas do banco de capacitores existente.

**TABELA 3 – Dados do banco de capacitores existente.**

Equipamento	V <sub>NOMINAL</sub> (kV)	Q <sub>NOMINAL</sub> (Mvar)	I <sub>NOMINAL</sub> (A)
BC01 e BC2	34,50	20	335

#### 4.5 Dados dos Aerogeradores

A Tabela 4 apresenta os dados dos aerogeradores do Complexo Eólico analisado.

**TABELA 4 – Aerogerador do Complexo Eólico.**

Modelo	f(Hz)	Tensão (V)	Potência (MVA)	Potência (MW)	FP
AEROGERADOR	60	690	2,0	2,0	0,96ind – 0,98cap

A Tabela 5 apresenta as correntes harmônicas mensuradas e declarada do fabricante do aerogerador

**TABELA 5 – Corrente Harmônica Máxima Medidas e Teórica do Aerogerador do Complexo Eólico.**

ORDEM	MEDIÇÃO 01	MEDIÇÃO 02	MEDIÇÃO 03	FABRICANTE	FABRICANTE
	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.
h	I <sub>h</sub> (A)	I <sub>h</sub> (A)	I <sub>h</sub> (A)	I <sub>h</sub> (%)	I <sub>h</sub> (A)
2	0,191	0,195	0,195	0,58	0,202
3	0,101	0,125	0,094	0,63	0,219
4	0,080	0,091	0,080	0,18	0,063
5	0,212	0,230	0,132	0,73	0,254
6	0,108	0,111	0,104	0,10	0,035
7	0,136	0,125	0,108	0,51	0,178
8	0,139	0,139	0,129	0,15	0,052
9	0,028	0,042	0,031	0,11	0,038
10	0,024	0,031	0,024	--	0,000
11	0,066	0,073	0,063	0,42	0,146

ORDEM	MEDIÇÃO 01	MEDIÇÃO 02	MEDIÇÃO 03	FABRICANTE	FABRICANTE
	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.
h	Ih (A)	Ih (A)	Ih (A)	Ih(%)	Ih (A)
12	0,024	0,024	0,028	--	0,000
13	0,042	0,038	0,028	0,61	0,212
14	0,024	0,024	0,024	0,12	0,042
15	0,017	0,017	0,021	0,32	0,111
16	0,017	0,021	0,017	0,32	0,111
17	0,024	0,028	0,021	2,26	0,787
18	0,021	0,021	0,021	0,14	0,049
19	0,045	0,038	0,028	1,11	0,386
20	0,031	0,038	0,031	0,12	0,042
21	0,010	0,017	0,014	0,20	0,070
22	0,007	0,010	0,010	--	0,000
23	0,007	0,010	0,010	0,25	0,087
24	0,007	0,010	0,010	--	0,000
25	0,007	0,007	0,010	0,23	0,080
26	0,007	0,007	0,010	--	0,000
27	0,007	0,007	0,010	0,20	0,070
28	0,007	0,007	0,010	0,10	0,035
29	0,007	0,007	0,007	0,40	0,139
30	0,007	0,007	0,007	--	0,000
31	0,007	0,007	0,007	0,23	0,080
32	0,007	0,007	0,007	--	0,000
33	0,010	0,010	0,010	--	0,000
34	0,021	0,021	0,014	--	0,000
35	0,014	0,017	0,010	0,13	0,045
36	0,017	0,024	0,021	--	0,000
37	0,021	0,028	0,017	0,12	0,042
38	0,021	0,024	0,017	--	0,000
39	0,028	0,035	0,024	--	0,000
40	0,174	0,198	0,143	--	0,000
41	0,178	0,181	0,139	--	0,000
42	0,132	0,139	0,111	--	0,000
43	0,077	0,091	0,066	--	0,000
44	0,010	0,010	0,010	--	0,000
45	0,010	0,007	0,007	--	0,000
46	0,007	0,007	0,007	--	0,000
47	0,007	0,007	0,007	--	0,000
48	0,007	0,007	0,007	--	0,000
49	0,007	0,007	0,007	--	0,000
50	0,003	0,003	0,003	--	0,000

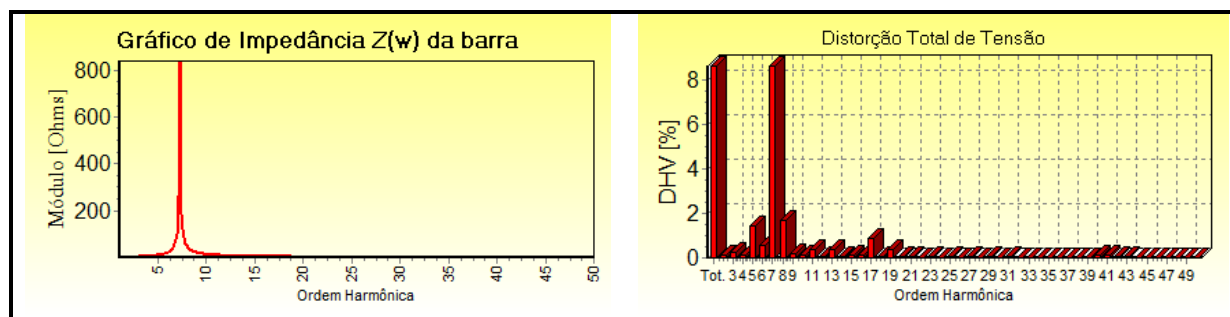
## 5.0 - RESULTADOS

A Tabela abaixo apresenta os resultados de distorção harmônica de tensão, distorção harmônica de corrente, corrente RMS, frequência e módulo referente a máxima magnitude do ponto de ressonância.

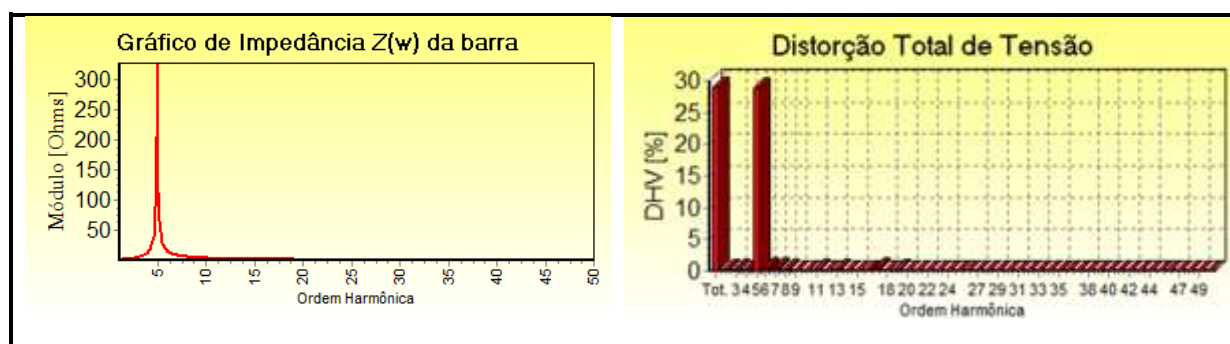
**TABELA 6 – Distorção harmônica de tensão e frequência do pico da ressonância em 34,5 kV.**

Bancos Ligados	Tensão em 34,5kV (pu)	DHTV em 34,5kV (%)	DHTI no Equip. (%)	Corrente RMS (A / pu)	Frequência do Pico da Ressonância (Hz)	Máximo  Z  da Barra ( $\Omega$ )
BCO 01	<b>1,06</b>	<b>8,52</b>	118,28	518 / <b>1,55</b>	<b>438</b>	838
BCO 01 e 02	<b>1,14</b>	<b>27,43</b>	145,32	590 / <b>1,76</b>	<b>300</b>	330

A Figura 4 e Figura 5 apresentam os gráficos de impedância pela frequência e DHV na barra de 34,5kV.



**FIGURA 4 – Gráficos de Imp. Harmônica x Frequência e DHTv(%) nas barras de 34,5 kV com o BCO 01 em operação**



**FIGURA 5 – Gráficos de Imp. Harmônica x Frequência e DHTv(%) nas barras de 34,5 kV com o BCO 01 e BCO 02 em operação**

Observa-se que a entrada de um banco de capacitores de 20Mvar (BCO 01) gera uma ressonância muito próxima a 7ª ordem, de forma que a tensão no barramento atinge 1,06pu e distorção harmônica de tensão atinge 8,52%. A distorção harmônica de corrente no banco de capacitores atinge aproximadamente 118,28%, com uma corrente RMS de 518 A, ou seja, 55% acima da corrente nominal.

Quando os dois bancos estão ligados, a ressonância atinge a 5ª ordem harmônica. A tensão no barramento atinge 1,14pu e a distorção harmônica de tensão atinge aproximadamente 29%. A distorção harmônica de corrente nos bancos de capacitores atinge aproximadamente 145,32%, com uma corrente RMS de 590 A, ou seja, 76% acima da corrente nominal.

Portanto, observa-se que nos dois casos analisados, seja com apenas BCO 01 ligado ou com os dois bancos de capacitores ligados, a distorção harmônica de tensão está fora dos limites recomendados pelas IEEE 519/2014 e PRODIST e tensão RMS do barramento está acima do limite recomendado para operação (1,05 pu).

A ressonância paralela no barramento de 34,5kV apresentada acima, ocasiona uma sobrecarga nos bancos de capacitores acima dos limites recomendados pela norma de fabricação NBR 5282/1998, onde cita que os capacitores devem suportar uma sobrecarga de até 1,31 pu.

## 6.0 - CONCLUSÃO

A aplicação de bancos de capacitores puros em complexos eólicos tem sido bastante difundida e executada nos empreendimentos mais recentes do sistema elétrico brasileiro. A necessidade de compensação reativa definida nos pareceres de acesso, levam ao dimensionamento de bancos de capacitores com alta potência para o operador nacional do sistema possuir a flexibilidade de excursionar o fator de potência de 0,95 indutivo a -0,95 capacitivo no



ponto de acoplamento comum, conforme a necessidade do sistema elétrico.

Bancos de capacitores puros geram ressonâncias paralelas quando conectados em qualquer barramento, ficando a indagação da frequência do pico da ressonância.

As simulações mostraram que um banco de 20Mvar ligado no barramento do sistema estudado, gera uma ressonância paralela que atinge o seu pico muito próximo da 7ª ordem harmônica. A tensão atinge 1,06pu, a distorção harmônica de tensão atinge 8,52% e a distorção harmônica de corrente no próprio banco de capacitores atinge 118,28%, ou seja, superiores aos valores das normas vigentes.

Para a condição operativa com dois bancos de capacitores de 20Mvar, a tensão atinge 1,14pu, a distorção harmônica de tensão no barramento atinge 27,43% e a distorção harmônica de corrente no próprio banco de capacitores atinge 145,32% respectivamente, ou seja, superiores aos valores das normas vigentes.

Para esse caso em estudo, a operação do sistema torna-se comprometida, pois a amplificação da tensão RMS, os altos índices de distorção harmônica de tensão e corrente no banco de capacitores levam a avarias no próprio banco de capacitores, queima dos inversores dos aerogeradores e parada da operação.

A aplicação de bancos de capacitores dessintonizados ou filtro harmônicos passivos torna-se uma solução viável, com melhor custo – benefício, evitando assim possíveis queimas dos equipamentos e parada de operação do complexo eólico.

Os estudos internos dos complexo eólicos e solares, com a modelagem completa da rede interna, objetivando a análise dos barramentos de 34,5kV, é crucial para validação dos pareceres de acesso de regime permanente e qualidade da energia elétrica, assim como para o dimensionamento dos equipamentos de compensação reativa, garantido a operação segura do complexo eólico.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C., MacGRANAGHAN, M. F. and BEATY, H. W. Electrical Power System Quality. McGraw-Hill, New York,. 2012
- [2] ARRILAGA, J. WATSON, N. R., Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 2004.

## 8.0 - BIOGRAFIA



Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2010). Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2014) na área de Qualidade da Energia Elétrica. Responsável pela área de Engenharia de Aplicação da BREE Eficiência Energética. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica, Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: correção do fator de potência, mitigação de harmônicos, transitórios eletromagnéticos de banco de capacitores e proteção do sistema elétrico de potência. Possui cerca de 10 artigos publicados em congressos e revistas nacionais.



MATEUS DUARTE TEIXEIRAÉ professor doutor do curso de Engenharia Elétrica da UFPR. Foi gerente de P&D da Bree, pesquisador do LACTEC, gerente da UNCE na ARTECHE EDC, além de ter ocupado a presidência da SBQEE entre 2017 e 2019. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos C4 do Cigre Brasil. Vem trabalhando em projetos de pesquisa e P&D ANEEL, orientação de alunos, estudos técnicos e consultorias para indústria e concessionárias, tendo publicado dezenas de artigos em revistas e congressos nacionais e internacionais.



FLÁVIO RESENDE GARCIAEng. MSc. Flávio Resende Garcia, formado pela Universidade Federal de Uberlândia em Junho de 1988, com pós-graduação em “Sistemas Elétricos de Potência com ênfase em Compensação Estática de Reativos” em Dezembro de 1989, Mestrado em “Harmônicos e Cargas Elétricas Especiais” em Maio de 1992 e Especialização em Gestão da Qualidade de Energia na Westinghouse - EUA em 1998. Atualmente atua como Diretor Comercial, Engenharia e P&D na empresa BREE Eficiência Energética sendo responsável pelas áreas de Vendas de Soluções e Estudos de Engenharia, além do Desenvolvimento de Novos Produtos e Soluções de QEE para o mercado de energia elétrica.