

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE AEROGERADORES NA OCORRÊNCIA DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO E VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DE VENTO INSTALADOS NO NORDESTE DO BRASIL



<https://doi.org/10.22533/at.ed.654112526025>

Data de aceite: 15/05/2025

Eloi Rufato Junior

UTFPr - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica

Carolina Ribeiro

UTFPr - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica

Gustavo Rodrigues Barreto

UTFPr - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica

Leonardo Dal Bosco

UTFPr - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica

RESUMO: A energia eólica é uma das fontes renováveis mais promissoras para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e a crescente demanda por energia limpa. Seu impacto ambiental reduzido em comparação com fontes fósseis, como carvão e petróleo, e sua capacidade de gerar energia sem emissões de gases de efeito estufa a tornam essencial para a transição energética global. Além disso, o avanço tecnológico

tem permitido a construção de turbinas mais eficientes, capazes de aproveitar ao máximo os ventos, mesmo em áreas de menor intensidade, porém, efeitos como desequilíbrio e flutuação de tensão, além da propagação de harmônicos, entre outros, devem ser considerados ao utilizar esse tipo de sistema. Dito isso, esse trabalho propõe-se a avaliar os impactos causados por curtos-circuitos no sistema de transmissão, bem como os resultados dos estudos da influência da distorção harmônica provocada pelo parque eólico, sob o aspecto dos parâmetros de qualidade, e por fim os efeitos da ocorrência de desequilíbrios de tensão, todos por meio de simulações computacionais, com base nos dados de um parque eólico localizado no Nordeste do Brasil, cuja modelagem foi feita por meio dos softwares ANAFAS e ATPDraw, por meio de modelos que equivalem ao complexo de geração. Os resultados dessas simulações visam apontar quais as consequências de tais fenômenos na rede.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica; Produção de Energia; Harmônicos; Qualidade de Energia.

PERFORMANCE ANALYSIS OF WIND TURBINES IN THE OCCURRENCE OF VOLTAGE IMBALANCES AND WIND SPEED VARIATION INSTALLED IN NORTHEAST BRAZIL

ABSTRACT: Wind energy is one of the most promising renewable sources for addressing the challenges of climate change and the growing demand for clean energy. Its reduced environmental impact compared to fossil sources such as coal and oil, and its ability to generate energy without greenhouse gas emissions make it essential for the global energy transition. In addition, technological advances have allowed the construction of more efficient turbines, capable of making the most of the wind, even in areas of lower intensity. However, effects such as voltage imbalance and fluctuation, as well as harmonic propagation, among others, must be considered when using this type of system. That said, this work aims to evaluate the impacts caused by short circuits in the transmission system, as well as the results of studies on the influence of harmonic distortion caused by the wind farm, from the perspective of quality parameters, and finally the effects of the occurrence of voltage imbalances, all through computer simulations, based on data from a wind farm located in the Northeast of Brazil, whose modeling was done using the ANAFAS and ATPDraw software, using models that are equivalent to the generation complex. The results of these simulations aim to indicate the consequences of such phenomena on the network.

KEYWORDS: Wind energy; Power production, Electric; Harmonics; Energy quality.

INTRODUÇÃO

Segundo o Relatório Síntese do último Balanço Energético Nacional, 89,2% da matriz elétrica brasileira é composta por fontes renováveis, demonstrando um comprometimento significativo com a sustentabilidade. Nesse contexto, as fontes solar e eólica apresentaram um crescimento de aproximadamente 24,7% em relação ao ano anterior, impulsionadas por políticas de incentivo à geração renovável (EPE, 2024). De acordo com o Global Wind Report 2024, elaborado pelo Global Wind Energy Council (GWEC, 2024), o Brasil ocupa a sexta posição mundial em capacidade instalada de energia eólica onshore, tendo adicionado 4,8 GW em 2023, o que elevou sua capacidade total para pouco mais de 30 GW. Ainda segundo o GWEC (2024), há 96 projetos de energia eólica offshore em processo de licenciamento ambiental no Brasil, evidenciando o crescente interesse pela expansão dessa tecnologia. A Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, [s.d.]) informa que o país possui 32 GW de capacidade instalada em operação e teste, com mais de 11.358 aerogeradores distribuídos em 1.063 usinas eólicas, presentes em 12 estados.

Com base em dados do Ministério de Minas e Energia (Ministério do Trabalho, 2019), observa-se uma demanda crescente por energia no Brasil, o que, somado aos impactos ambientais da geração, reforça a necessidade de modernização do setor elétrico. Para isso, foi instituído o Grupo de Trabalho pela Portaria MME nº 187/2019, com o objetivo de desenvolver novas tecnologias e propor soluções para o setor. Em 2023, a potência instalada de geração eólica no Brasil atingiu 30,45 GW, sendo que 92% desse total está na região Nordeste, com novos parques instalados na Bahia, Pernambuco, Paraíba, Piauí e Rio Grande do Norte (ABEEólica, 2024).

Contudo, a elevada concentração de usinas eólicas em uma única região, associada à variabilidade da fonte, impacta o funcionamento do Sistema Interligado Nacional (SIN), com oscilações diárias e semanais entre 40% e 55% da capacidade instalada (Torres, 2020). Essas variações podem causar sobretensões, falhas em sistemas de proteção, danos a equipamentos e riscos à estabilidade da rede elétrica (Ouyang et al., 2019). De acordo com Guo et al. (2015 apud Ouyang et al., 2019), flutuações de vento provocaram variações superiores a 6 kV em apenas 10 segundos em determinados parques eólicos, reforçando a necessidade de maior controle e integração adequada desses sistemas.

EMBASAMENTO TEÓRICO E METODOLOGIA

A localidade e análise que este estudo se embasa consiste em um complexo eólico instalado e em operação comercial no nordeste brasileiro, com potência total instalada de 312,9 MW distribuídas em parques eólicos conectadas em uma única subestação interligadora de 230 kV/34,5 kV, dando continuidade a outro estudo e trabalho desenvolvidos por Rodrigues, Pedroso e Silochi.

A análise dos indicadores de qualidade de energia elétrica e condução do estudo foram levantados seguindo-se os critérios estabelecidos pelo Módulo 8 Seção 8.1 do PRODIST, retirando os parâmetros e limites/valores de referência, tais como fenômenos de regime permanente (variações de tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência) e fenômenos de regime transitório (variações de tensão de curta duração - VTCD), garantindo os padrões mínimos necessários que devem ser atendidos para assegurar aos consumidores um produto de qualidade ANEEL (2022). Como também vamos analisar estes mesmos parâmetros de qualidade de energia no quesito de desequilíbrio de tensão quando da ocorrência de variações cíclicas de velocidade, em sistema de geração eólica, estudando variáveis como: velocidade de vento, velocidades de rajadas, variedade de variações do vento, além de perturbações usuais da rede, destacando a perturbação de curto-circuito, que faremos a análise por meio de simulações, utilizando o software ANAFAS (CEPEL, 2024), para os seguintes tipos de aerogeradores:

- TIPO C - Turbina eólica de velocidade variável e gerador de indução duplamente alimentado ou (DFIG);
- Tipo D - Turbina eólica de velocidade variável completa e gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG) ou gerador síncrono de rotor bobinado (WRSG).

Sistemas de Geração Eólicos

A denominação aerogerador ou turbina eólica refere-se a todo o sistema responsável pela conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. Esse sistema inclui não apenas os componentes básicos, como o rotor e o gerador, mas também os sistemas de

controle e outros subsistemas necessários para o funcionamento eficiente e seguro da turbina. Devido à sua complexidade, os componentes do aerogerador podem ser divididos em quatro principais grupos construtivos: o sistema responsável pela captação da energia cinética do vento, transformando ela em torque, que vai para o sistema de transmissão mecânica, acoplado ao sistema de geração de energia elétrica e, estes sistemas, estão alojados sobre o grupo de componentes responsáveis pela sustentação da infraestrutura (GOUVEIA; MISSIAS, 2018).

Na Figura 1, são apresentados os principais componentes de uma turbina eólica.

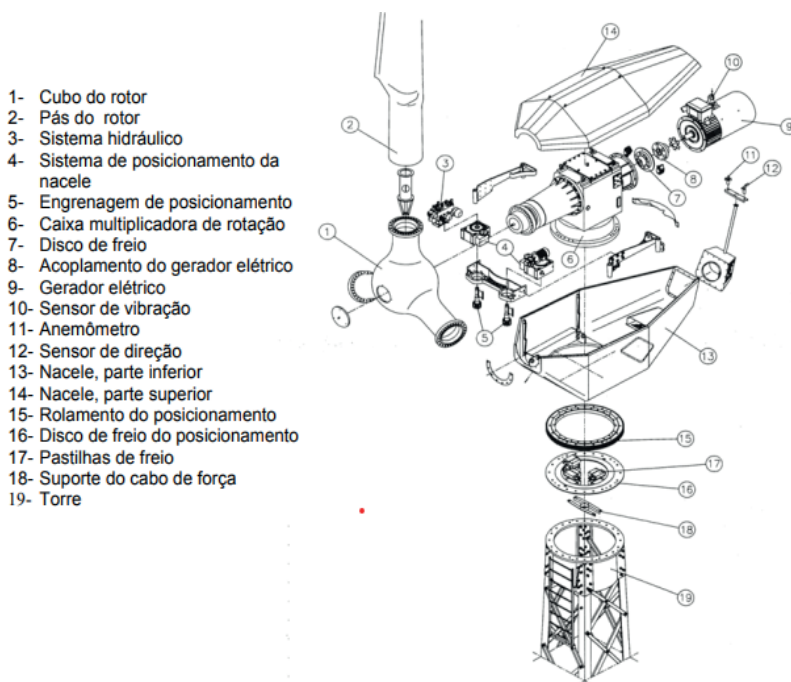


Figura 1 - Estrutura de um Aerogerador.

Fonte: (CEPEL, 2014).

Configuração dos geradores utilizados em parques eólicos

Segundo Ackermann (2005), as turbinas eólicas são classificadas conforme o sistema de controle de velocidade e pelo tipo de controle de potência utilizado nas pás.

Conforme apresentado no Quadro 1, existem 4 tipos de aerogeradores utilizados em parques eólicos, classificados em tipos das turbinas, conforme o controle de velocidade e controle de potência. As áreas cinzas indicam turbinas que não são mais utilizadas.

Controle de velocidade Estol		Controle de potência		
		Passo	Estol	Estol ativo
Velocidade fixa	Tipo A	Tipo A0	Tipo A1	Tipo A2
	Tipo B	Tipo B0	Tipo B1	Tipo B2
Velocidade variável	Tipo C	Tipo C0	Tipo C1	Tipo C2
	Tipo D	Tipo D0	Tipo D1	Tipo D2

Quadro 1 - Configuração de aerogeradores

Fonte: Adaptado de Ackermann (2005)

Aerogerador de velocidade variável limitada equipado com gerador de indução duplamente alimentado - DFIG

Essa configuração é realizada através do conjunto de uma turbina de velocidade variável limitada, um WRIG (Wound Rotor Induction Generator) é um conversor de frequência de escala parcial, projetado para uma potência em torno de 30% da nominal do gerador, acoplado no circuito do rotor. Devido ao uso de um conversor de frequência, não é mais necessário o uso de soft-starter para conexão do aerogerador e banco de capacitores para compensação de reativos da rede. Devido a ampla faixa de controle de velocidade, em torno de -40% a +30% da velocidade síncrona da máquina, apresenta uma grande vantagem em relação ao OptiSlip (Ackermann, 2005).

Conforme Pinto et al. (2013), o termo DFIG é utilizado para o sistema no qual o estator e o enrolamento do rotor de uma máquina com anéis coletores são alimentados simultaneamente. Desta forma, a operação sub e supersíncrona é possível. A sobreposição da frequência do inversor em relação à frequência do campo girante do rotor, faz com que ela seja constante para qualquer valor de velocidade do rotor da máquina.

Na Figura 2, é apresentada a configuração típica de uma turbina Tipo C.

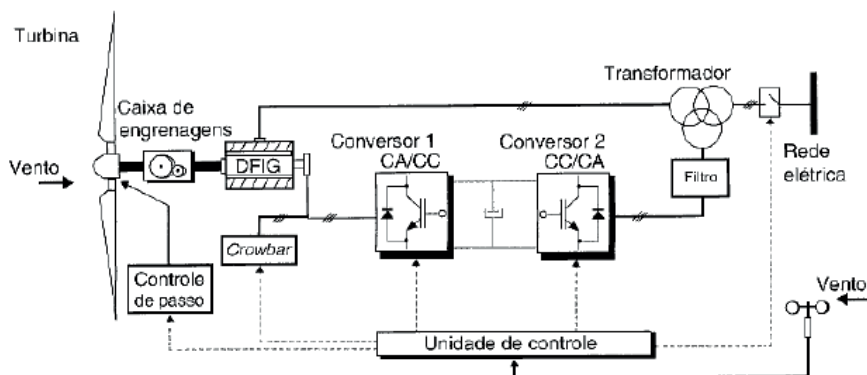


Figura 2 - Composição de uma aerogerador do Tipo C

Fonte: (Pinto et al., 2013).

Aerogerador de velocidade variável completa equipado com gerador síncrono de ímãs permanentes ou de rotor bobinado – PMSG/WRSG

Assim como na configuração DFIG, esta topologia utiliza um conversor de potência, porém desta vez projetado para 100% da potência nominal da máquina. Há duas maneiras para fazer a excitação do gerador utilizado, por meio de ímãs permanentes ou eletricamente, nos casos dos geradores de WRSG ou WRIG. Em alguns casos, como quando é utilizado um gerador multipolar com grandes dimensões e acionado diretamente, é dispensável o uso da caixa de engrenagens, como mostrado a configuração típica de uma turbina Tipo D, na Figura 3 (Ackermann, 2005).

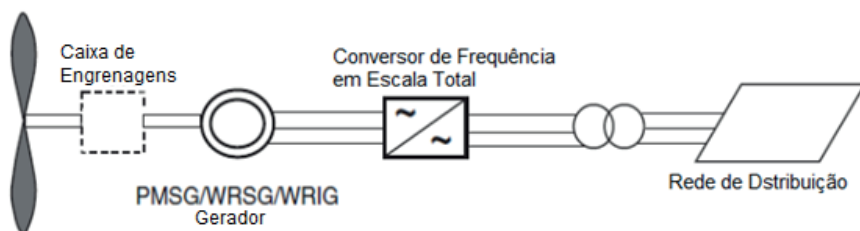


Figura 3 - Composição de uma aerogerador do Tipo D

Fonte: (Adaptado de Ackermann, 2005).

Relação entre o vento e a potência de saída de aerogeradores

A potência de saída de aerogeradores nada mais é do que a conversão da energia cinética de translação (presente nos ventos) em energia cinética de rotação pelas pás das turbinas. Essa energia cinética de rotação é convertida em energia mecânica pelo rotor da turbina, que como é acoplado ao gerador elétrico, este converte a para energia elétrica (David; Correa, 2019). Essa conversão pode ser calculada seguindo o raciocínio de que a energia cinética do vento que entra em contato com as pás da turbina está diretamente relacionada com a velocidade do vento que incide sobre elas, estabelecendo uma relação entre fluxo de ar que movimenta as pás e a área dessas, porém durante a conversão da potência do vento em potência mecânica ocorrem perdas, e essas são representadas por um fator chamado coeficiente de potência, que adequa a equação da potência mecânica convertida pelo aerogerador, e de acordo com Rocha *et al.* (2023) o coeficiente de potência pode ser definido pela relação entre a potência extraída do vento pela turbina eólica e a potência disponível no vento antes da turbina. Têm-se ainda o ângulo de passo β , o ângulo de ataque α , o ângulo de incidência ϕ , e as grandezas velocidade relativa do vento [m/s], e velocidade da ponta das pás [m/s] a serem representados na Figura 4 (Sohn, 2014).

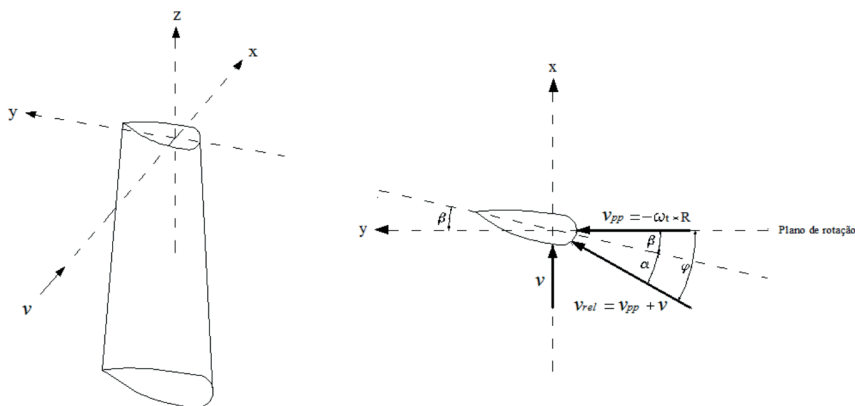


Figura 4 - Representação da seção de uma pá eólica - Grandezas e ângulos

Fonte: (Sohn, 2014).

Por fim, a potência mecânica convertida pelo aerogerador em Watts pode ser apresentada na Equação 1.

$$P_m = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho_{ar} * \pi * r^2 * v^3 \quad (1)$$

Onde:

P_m = Potência mecânica convertida pelo aerogerador [W];

$C_p(\lambda, \beta)$ = Coeficiente de potência em razão da velocidade do rotor e da velocidade do vento;

ρ_{ar} = densidade do ar [kg/m³];

r = raio [m];

v = Velocidade do vento incidente nas pás [m/s].

Parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica e Limites Determinados pela ANEEL

Os parâmetros de qualidade de energia relevantes a esse estudo, selecionados a partir do Módulo 8 do PRODIST, são os relativos a variação de tensão, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão em condições de curto-circuito e afundamentos de tensão.

A análise de tensão em regime permanente é definida pela normativa como comparação da tensão aferida no ponto de conexão -que deve ser a nominal ou a contratada, conforme o nível de tensão no ponto de conexão com a tensão de referência, e pode ser definido como: crítico, precário ou adequado. Nos casos de tensões contratadas entre distribuidoras de energia, caso a tensão contratada seja igual ou maior do que 230kV no ponto de conexão, esta deve ser igual a tensão nominal do sistema naquele ponto, e, nos casos em que a tensão nominal de operação seja abaixo de 230kV, o valor contratado

deve estar entre $\pm 5\%$ da tensão nominal no ponto. Caso a tensão seja contratada junto à distribuidora, e seja superior a 2,3kV, ela deve estar entre $\pm 5\%$ da tensão nominal de operação no ponto e, ser igual à tensão do TAP do transformador utilizado na unidade consumidora (UC) (ANEEL,2021).

O fator de potência é obtido através da relação direta dos valores registrados de potência, ou energia, ativa e reativa, onde para consumidores do Grupo A ou nos pontos de conexão entre distribuidoras de energia, com tensão abaixo de 230kV, o fator de potência deve ser mantido entre 0,92 e 1,00 (capacitivo ou indutivo). No caso de centrais geradoras, o range para este parâmetro é definido pelos procedimentos de rede do ONS (ANEEL, 2021).

O cálculo do fator de potência é representado pelas equações 2 e 3.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \tag{2}$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \tag{3}$$

As distorções harmônicas são definidas como o fenômeno que causa a deformação das ondas de tensão e corrente em relação a sua forma senoidal pura, sendo definidos em Distorção harmônica total de tensão (DTT), Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTTp), Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTTi) e Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT₃). Os limites para os indicadores de distorção harmônica total apresentados na Tabela 1, correspondem ao valor máximo desejável de ser verificado no sistema de distribuição (ANEEL, 2021).

Indicador	Tensão nominal (Vn)		
	Vn ≤ 2,3 kV	2,3 kV < Vn < 69 kV	69 kV ≤ Vn < 230 kV
DTT95%	10,0%	8,00%	5,00%
DTTp95%	2,50%	2,00%	1,0%
DTTi95%	7,50%	6,00%	4,0%
DTT395%	6,50%	5,00%	3,0%

Tabela 1 - Limitações dos parâmetros de distorção harmônica

Fonte: (ANEEL, 2021).

O desequilíbrio de tensão é o critério que analisa uma discrepância entre a amplitude da tensão ou defasagem angular entre as fases de um sistema trifásico, calculado pela Equação 4 (ANEEL, 2021).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} * 100\% \quad (4)$$

Os limites para os indicadores de desequilíbrio de tensão apresentados na Tabela 2, correspondem ao valor máximo desejável de ser verificado no sistema de distribuição (ANEEL, 2021).

Indicador	Tensão nominal (Vn)	
	Vn ≤ 2,3 kV	2,3 kV < Vn < 230 kV
FD95%	3,0%	2,0%

Tabela 2 - Limitação do parâmetro de desequilíbrio de tensão

Fonte: (ANEEL, 2021).

Para calcular o indicador FD95%, determina-se o valor superado em 5% dos registros de FD coletados durante 1 dia, considerando os componentes de sequência positiva e negativa integralizadas a cada 10 minutos. O valor do indicador é o maior obtido em uma base diária ao longo de 7 dias consecutivos. Se a tensão de sequência negativa variar ciclicamente, sua magnitude máxima não deve ultrapassar duas vezes o valor que causaria a violação de 5%, conforme especificado no Quadro 2.

Limite	FD95%
Global instantâneo	FD95% ≤ 4,0%
Global médio	FD95% ≤ 2,0%
Individual instantâneo	FD95% ≤ 3,0%
Individual médio	FD95% ≤ 1,5%

Quadro 2 - Indicadores de limitação de desequilíbrio de tensão

Fonte: (Adaptado de ONS, 2021).

As variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos (ANEEL, 2021). Sendo classificadas em dois tipos: variação momentânea de tensão e variação temporária de tensão, conforme o Quadro 3.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão - IMT	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão - AMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão - EMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão - ITT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporária de Tensão - ATT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão - ETT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

Quadro 3 - Classificação das VTCDs

Fonte: (ANEEL, 2021).

DISCUSSÃO E RESULTADOS

O presente estudo tem como objetivo a análise de dois distúrbios associados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE): os afundamentos de tensão e o desequilíbrio de tensão. Para tal, foram consideradas duas abordagens distintas. A primeira consiste na avaliação dos afundamentos de tensão na barra do ponto de acesso (BAPAC) do parque eólico, por meio da simulação de algumas condições de curto-circuito a uma distância de 25 km da Subestação Touros (SE Touros), ponto de conexão do complexo eólico ao Sistema Interligado Nacional (SIN). A segunda abordagem refere-se à análise do desequilíbrio de tensão, a partir da aplicação de três diferentes variações de tensão na fase C da barra da SE Touros: -2%, +2% e -5%. As simulações têm como finalidade caracterizar a resposta do sistema elétrico frente a tais distúrbios, com foco na avaliação dos impactos nas barras de média (34,5 kV) e alta tensão (230 kV), contribuindo para o diagnóstico de vulnerabilidades e para o aprimoramento da estabilidade e confiabilidade da rede elétrica.

Afundamento de Tensão na Ocorrência de Curto-Circuito

Para a realização das análises de afundamento de tensão, foi utilizado o sistema representado nas Figuras 5, 6 e 7, o qual apresenta a topologia do parque eólico conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) por meio da Subestação Touros (SE Touros). As simulações foram realizadas no software ANAFAS, utilizando-se o arquivo do equivalente do SIN referente ao período de 2023/2024. Foram consideradas três situações distintas de

falta: curto-circuito monofásico para terra, bifásico para terra e trifásico. A distância entre o ponto de ocorrência da falta e a SE Touros foi fixada em 25 km, com o objetivo de avaliar os impactos dessas contingências sobre as barras de 34,5 kV e 230 kV do parque eólico. Essa análise visa identificar a resposta do sistema frente a diferentes tipos de distúrbios, com ênfase nos afundamentos de tensão e nos desequilíbrios provocados, contribuindo para o diagnóstico da resiliência da conexão do parque ao SIN.

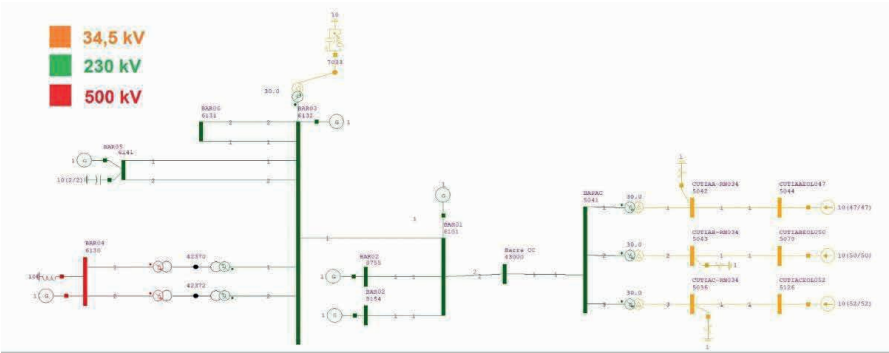


Figura 5 - Sistema equivalente analisado

Fonte: Rodrigues, Pedrosa, Silochi (2023).

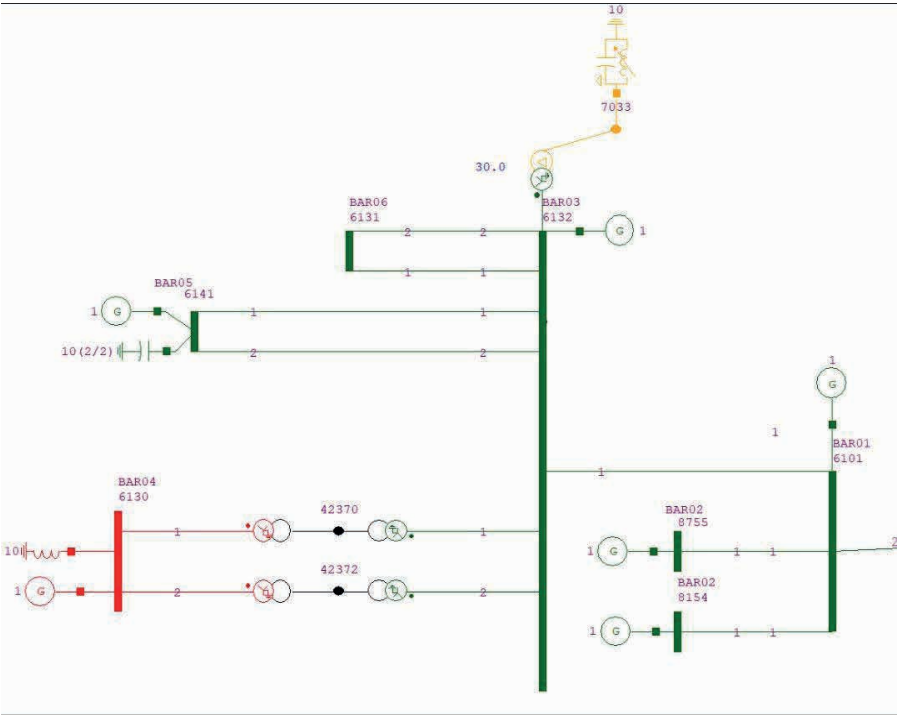


Figura 6 - Sistema equivalente analisado – Parte 1

Fonte: Rodrigues, Pedrosa, Silochi (2023).

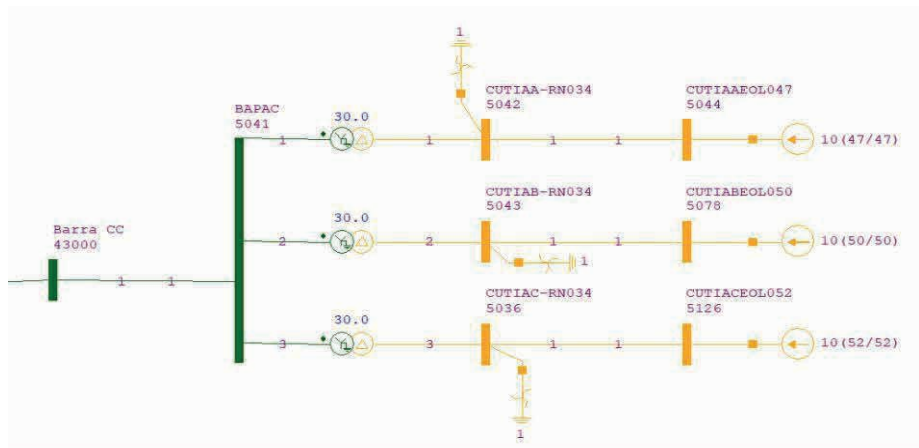


Figura 7 - Sistema equivalente analisado – Parte 2

Fonte: Rodrigues, Pedroso, Silochi (2023).

Considerando que o parque eólico está sujeito a afundamentos de tensão decorrentes de faltas ocorridas em outras barras do sistema ao qual está conectado, a análise foi ampliada para incluir simulações de curto-circuito em todas as barras representadas nas Figuras 5, 6 e 7. Os resultados obtidos por meio dessas simulações são apresentados na Tabela 3.

Local do curto-circuito	Fase-terra (pu)	Bifásico-Terra (pu)	Trifásico (pu)
LT 230 kV BPAC-BAR01	0,249	0,221	0,089
LT 230 kV BAR01-BAR02	0,212	0,200	0,058
LT 230 kV BAR01-BAR03	0,504	0,435	0,316
LT 230 kV BAR01-BAR04	0,629	0,496	0,304
LT 230 kV BAR04-BAR06 C1	0,893	0,760	0,636
LT 230 kV BAR04-BAR06 C2	0,812	0,692	0,556
LT 230 kV BAR04-BAR07 C1	1,019	0,916	0,840
LT 230 kV BAR04-BAR07 C2	1,043	0,917	0,825
BARRA 05 500 kV	0,784	0,685	0,580

Tabela 3 - Resultados de afundamentos de tensão em (pu) adquiridos nas simulações usando software ANAFAS

Fonte: Autoria própria (2024).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 01, observa-se a ocorrência de afundamentos de tensão inferiores a 0,2 pu em determinados pontos do sistema, destacando-se, principalmente, as faltas localizadas nas linhas de transmissão de 230 kV que conectam a barra BAPAC à barra BAR01 e a barra BAR01 à barra BAR02, cujos valores mínimos de tensão ficaram abaixo de 0,2 pu. Para estes casos, conforme os procedimentos do ONS é permitida a desconexão das máquinas.

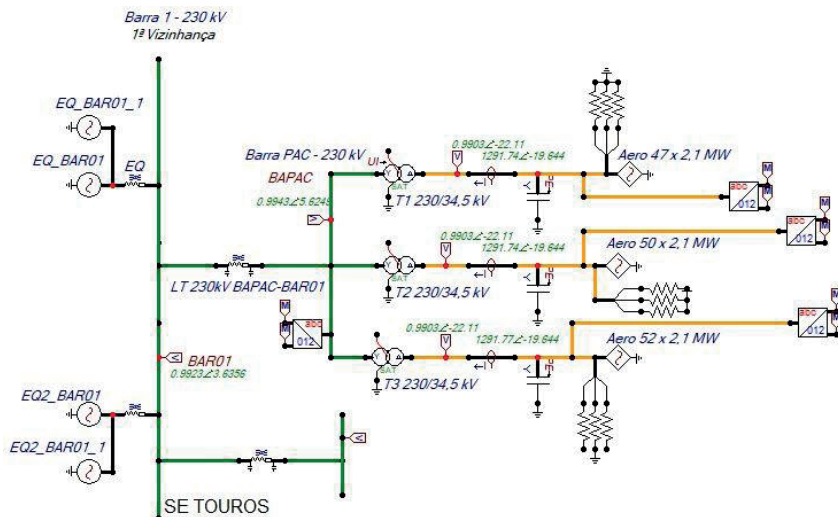


Figura 9 - Sistema equivalente analisado

Fonte: adaptado de Rodrigues, Pedroso, Silochi (2023).

O índice FD95% foi adotado como parâmetro para a quantificação do desequilíbrio de tensão nos cenários analisados. As grandezas de tensão obtidas nas simulações realizadas no software ATPDraw foram exportadas para o ambiente Matlab, onde foram processadas pelos códigos apresentados nas Figuras 10, 11, 12 e 13. Esses códigos realizam o cálculo das componentes de sequência, cujos resultados servem de base para a aplicação da Equação 4, utilizada para determinar os valores do índice FD95% nos três casos simulados.

```

1
2 load 'v_seq_pac.mat'
3
4 v0_1=sqrt(mX0015A.^2+mX0016A.^2);
5 v1_1=sqrt(mX0015B.^2+mX0016B.^2);
6 v2_1=sqrt(mX0015C.^2+mX0016C.^2);

```

Figura 10 - Código no MATLAB para ler os valores das tensões de componentes simétricas na barra BAPAC

Fonte: Autoria própria (2024).

```

1
2      load 'v_seq_bagg1.mat'
3
4      v0_1=sqrt(mX0017A.^2+mX0018A.^2);
5      v1_1=sqrt(mX0017B.^2+mX0018B.^2);
6      v2_1=sqrt(mX0017C.^2+mX0018C.^2);

```

Figura 11 - Código no MATLAB para ler os valores das tensões de componentes simétricas no nó BAGG1

Fonte: Autoria própria (2024).

```

1
2      load 'v_seq_bagg2.mat'
3
4      v0_1=sqrt(mX0019A.^2+mX0020A.^2);
5      v1_1=sqrt(mX0019B.^2+mX0020B.^2);
6      v2_1=sqrt(mX0019C.^2+mX0020C.^2);

```

Figura 12 - Código no MATLAB para ler os valores das tensões de componentes simétricas no nó BAGG2

Fonte: Autoria própria (2024).

```

1
2      load 'v_seq_bagg3.mat'
3
4      v0_1=sqrt(mX0019A.^2+mX0020A.^2);
5      v1_1=sqrt(mX0019B.^2+mX0020B.^2);
6      v2_1=sqrt(mX0019C.^2+mX0020C.^2);

```

Figura 13 - Código no MATLAB para ler os valores das tensões de componentes simétricas no nó BAGG3

Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados provenientes das simulações realizadas são apresentados de forma consolidada na Tabela 4, a qual fornece uma visão detalhada dos valores calculados para o desequilíbrio de tensão em cada um dos cenários estudados.

Caso analisado	Barra	V1 (V)	V2 (V)	FD95%
Caso 01	BAPAC	186440	231	0,1239
	BAGG1	27852	35,2	0,1264
	BAGG2	27852	35,2	0,1264
	BAGG3	27852	35,2	0,1264
Caso 02	BAPAC	186880	217	0,1161
	BAGG1	27919	33	0,1182
	BAGG2	27919	33	0,1182
	BAGG3	27919	33	0,1182
Caso 03	BAPAC	186110	567	0,3047
	BAGG1	27802	86,2	0,3100
	BAGG2	27802	86,2	0,3100
	BAGG3	27802	86,2	0,3100

Tabela 4 - Resultado das tensões de sequência positiva, negativa e cálculo do indicador de desequilíbrio de tensão (FD95%)

Fonte: Autoria própria (2024).

Os valores obtidos nas simulações encontram-se dentro dos limites aceitáveis, indicando que, nas condições analisadas, não foram observadas não conformidades significativas em relação ao desequilíbrio de tensão.

CONDIDERAÇÕES FINAIS

Para avaliar a vulnerabilidade dos aerogeradores, simulações de curto-circuito (ANAFAS) foram realizadas na região do sistema de transmissão, resultando em afundamentos de tensão residual. Conforme os procedimentos do ONS, o complexo eólico deve suportar afundamentos de até 0,2 pu, contribuindo para a recuperação da tensão durante e após falhas.

Os resultados mostraram que certos tipos de falhas, especialmente trifásicas em locais específicos, podem causar afundamentos superiores aos limites normativos, justificando a desconexão das máquinas. Entretanto, isso poderia comprometer a recuperação dos níveis de tensão no sistema interligado nacional.

Diante disso, é fundamental considerar, com o aumento da capacidade instalada desse tipo de geração no sistema, a realização de estudos de planejamento para a expansão das redes de transmissão. Esses estudos devem garantir a confiabilidade do sistema e atender às condições operacionais exigidas.

Complementarmente as simulações de afundamento ocasionadas por curto-circuito, foram simulados afundamentos nas barras de 230kV e 34,5kV do parque eólico decorrentes do desequilíbrio entre as fases da SE Touros, que conecta o complexo eólico ao SIN. Conforme os Procedimentos de Rede do ONS, o desequilíbrio de tensão no ponto estudado, deve ser no máximo 2%.

Conforme as análises feitas, para as três condições operativas propostas, a central geradora operou dentro dos limites pré-estabelecidos, garantido a operacionalidade e segurança do sistema elétrico ao qual está conectada.

Outro ponto relevante foi a dificuldade enfrentada para acessar o software ANAFAS com os equivalentes da rede atualizados para 2024/2025. Apesar de ter sido obtido o arquivo com as informações necessárias para a atualização do equivalente do parque eólico, não foi possível utilizá-lo, já que a versão do ANAFAS disponível na universidade, devido à sua licença acadêmica, não permite abrir arquivos com mais de 120 barras. Essa limitação nos impediu de atualizar o equivalente utilizado, que corresponde ao período de 2023/2024. Contudo, essa restrição não comprometeu a análise realizada no trabalho apresentado.

Ademais, um dos objetivos específicos era a simulação do comportamento do parque eólico durante variações cíclicas de velocidade. Porém, devido à dificuldade em adquirir dados específicos do aerogerador, como dados do gerador e topologia/representação esquemática do circuito inversor que compõe o conversor back-to-back, infelizmente não foi possível fazer a modelagem do sistema e conseqüentemente não foram analisados os impactos das variações de velocidade dos ventos na operação do parque eólico.

Além disso, outro objetivo parcialmente afetado foi o estudo de harmônicos na instalação, devido a equipe não ter tido acesso a licença necessária para utilização do software, de maneira que embora a modelagem tenha sido feita, a simulação não foi exequível.

Vale ressaltar que devido à alta penetração de fontes de energia renovável, principalmente na região Nordeste do país, estudos constantes, que tem por objetivo verificar a segurança e condições operacionais do SIN, perante a penetração massiva dessas fontes, tornam-se essenciais para verificação e análise da condição operacional e de segurança do SIN.

AUTORIZAÇÕES E RECONHECIMENTOS

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Eloi Rufato Junior, pela orientação técnica, apoio constante e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação, experiência e disponibilidade foram fundamentais para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

ABEEólica. **Página inicial**. 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 15 julho 2024.

ABBEólica. **Boletim Anual 2023**. Bela Vista, jul. 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 24 ago. 2024.

ACKERMANN, Thomas (ed.). **Wind power in power systems**. 1. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2005.

PINTO, Milton de Oliveira et al. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, v.1, 2013.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956**. 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodinst_modulo_8_v13.pdf. Acesso em 20 ago 2024.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 26 set. 2024.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Qualidade do fornecimento de energia elétrica**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/qualidade-do-fornecimento-de-energia-eletrica>. Acesso em: 26 set. 2024.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Portaria MME no 187 de 04 de abril de 2019**. 2019. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 05 abr. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias/2019/portaria-n-187-2019.pdf/view>. Acesso em: 24 nov. 2024.

CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica). **Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica**. CRESESB, 2014. Disponível em: http://paje.fe.usp.br/~mefpietro/mef2/app.upload/71_mefmi_003-05.pdf. Acesso em: 21 set. 2024.

CORREA, Felipe P.; DAVID, Matheus E. de B. **Estudo de estratégias para regulação de potência de saída de geradores eólicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional (BEN) 2024**: Ano base 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 15 jul 2024.

GOVEIA, Paulo; MISSIAS, Willian C. **Integração de Geração Eólica e Fotovoltaica: Análise sob aspectos de Fluxo de Potência e Curto-circuito**. 2018. 111 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

GUO, Q. et al. **Hierarchical automatic voltage control for integration of large-scale wind power: Design and implementation**. China: Electric Power Systems Research, 2015. 234-241 p. v. 120.

GWEC (Global Wind Energy Council). **Global Wind Report 2024**. GWEC, 2024. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>. Acesso em 15 jul 2024.

OUYANG, J. *et al.* **Multi-Timescale Active and Reactive Power-Coordinated Control of Large-Scale Wind Integrated Power System for Severe Wind Speed Fluctuation**. IEEE, China, 2019.

PINTO, Milton de Oliveira *et al.* **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, v.1, 2013.

ROCHA, Alexandro V. da; RODRIGUES, Luanda K. de O.; OLIVEIRA, Odailson C. de; JACOMINI, Rogério V. **Fundamentos de Energia Eólica**. Natal: editoraifrn, 2023. Disponível em: https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/2555/Fundamentos_Energia_Eolica.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 nov. 2024.

RODRIGUES, Bruno A; PEDROSO, Édi C; SILOCHI, João G. **Energia Eólica: Análise de desempenho de aerogeradores instalados no Nordeste do Brasil frente a distúrbios na rede de conexão**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023.

SOHN, Alexandre P. **Estudos de estabilidade de sistemas de potência na presença de diferentes modelos de unidades eólicas**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

TORRES, Alonso J. **Crescimento da geração eólica no Brasil: aprendizados para a operação do SIN**. Editora Brasil Energia, 2020. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/cenarioeolica/crescimento-da-geracao-eolica-no-brasil-aprendizados-para-a-operacao-do-sistema-interligado-nacional>. Acesso em: 16 jul 2024.