

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
MBA EM GESTÃO ESTRATÉGICA EM ENERGIAS NATURAIS RENOVÁVEIS

GENISSON SANTOS DA COSTA

OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM USINAS EÓLICAS:
ESTRATÉGIAS PARA MAXIMIZAR O DESEMPENHO E REDUZIR CONSUMO
DESNECESSÁRIO

CURITIBA

2025

GENISSON SANTOS DA COSTA

OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM USINAS EÓLICAS:
ESTRATÉGIAS PARA MAXIMIZAR O DESEMPENHO E REDUZIR CONSUMO
DESNECESSÁRIO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Pós-Graduação em MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA), Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof.Dr. Thiago José da Luz

CURITIBA

2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e pela sabedoria concedida em todos os momentos desta jornada. Pela presença constante que me fortaleceu diante dos desafios e me guiou em cada decisão tomada.

À minha família, minha base e sustentação, que sempre acreditou no meu potencial. Aos meus pais, pelo exemplo de esforço, honestidade e perseverança, que me inspiram diariamente. Aos demais familiares, pelo apoio, incentivo, compreensão e carinho, mesmo nas horas em que estive ausente devido às exigências do percurso acadêmico.

À minha esposa, pela paciência, companheirismo e compreensão em todos os momentos. Seu apoio, amor e incentivo constante foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui, mesmo diante das dificuldades e renúncias que esta trajetória exigiu.

Aos professores da UFPR, que compartilharam não apenas conhecimentos técnicos, mas também experiências, valores e orientações que levarei para minha vida pessoal e profissional. De modo especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago José da Luz, pela paciência, dedicação e comprometimento com este trabalho. Sua orientação atenta, suas contribuições valiosas e sua disponibilidade em acompanhar cada etapa foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu crescimento acadêmico.

Aos colegas e amigos que, de diferentes maneiras, estiveram presentes durante essa caminhada, colaborando com apoio, troca de experiências e palavras de incentivo, minha sincera gratidão.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse realizado, deixo meu mais profundo agradecimento.

RESUMO

Este trabalho propõe estratégias para otimizar a eficiência energética em usinas eólicas, com foco na redução do consumo interno dos aerogeradores e na mitigação de falhas operacionais. A pesquisa foi realizada com base em dados reais coletados do sistema SCADA do Complexo Eólico São Clemente, localizado em Caetés-PE. Foram identificadas cargas internas com alto potencial de impacto, como os sistemas de pitch, yaw, lubrificação e ventilação, especialmente em situações de vento fraco, nas quais ocorrem acionamentos desnecessários que elevam o consumo e aceleram o desgaste dos componentes. A partir disso, o estudo propõe três estratégias principais: ajustes nos parâmetros de controle, modos standby para cargas não essenciais e uso de algoritmos inteligentes com base em dados operacionais. Os resultados indicam que a aplicação dessas estratégias pode reduzir significativamente o consumo interno, aumentar a vida útil dos equipamentos e melhorar a disponibilidade das turbinas, promovendo maior eficiência energética e sustentabilidade para o setor.

Palavras-chave: eficiência energética; aerogeradores; cargas internas; energia eólica; controle inteligente.

ABSTRACT

This study proposes strategies to optimize energy efficiency in wind farms, focusing on reducing the internal consumption of wind turbines and mitigating operational failures. The research was conducted using real operational data from the SCADA system of the São Clemente Wind Complex, located in Caetés, Pernambuco, Brazil. Internal loads with high impact potential—such as pitch, yaw, lubrication, and ventilation systems—were identified, especially during low wind conditions, in which unnecessary activations increase energy consumption and accelerate component wear. Based on this diagnosis, three main strategies are proposed: adjustments to control system parameters, implementation of standby modes for non-essential loads, and the application of intelligent algorithms based on SCADA data. The results demonstrate that implementing these strategies can significantly reduce internal consumption, extend equipment lifespan, and improve turbine availability, thereby promoting greater energy efficiency and sustainability in the wind energy sector.

Keywords: energy efficiency; wind turbines; internal loads; wind power; intelligent control.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVO GERAL.....	7
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 SISTEMA INTERNOS DE AEROGERADORES.....	8
2.2 CONSUMO INTERNO AEROGERADORES	10
2.3 ESTRATÉGIAS DE GESTÃO INTELIGENTE DE CARGAS	12
3. METODOLOGIA	15
3.1 LEVANTAMENTO DE CARGAS – ETAPA 1.....	15
3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CARGAS – ETAPA 2.....	16
3.3 IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES OPERACIONAIS EM BAIXA PRODUÇÃO – ETAPA 3	16
3.4 POSSIBILIDADES DE ESTRATÉGIAS DE DESLIGAMENTO INTELIGENTE -ETAPA 4	16
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	18
4.1 LEVANTAMENTO E MAPEAMENTO DAS CARGAS INTERNAS DOS AEROGERADORES	18
4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CARGAS.....	20
4.3 IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE FUNCIONAMENTO DE CARGAS NÃO ESSENCIASI EM BAIXA PRODUÇÃO.....	21
4.4 ESTRATÉGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA.....	23
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é uma das fontes renováveis de maior crescimento no Brasil e no mundo, destacando-se pela baixa emissão de poluentes e elevado potencial de geração. Impulsionada pela crescente preocupação com as mudanças climáticas, a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e o esforço global pela diversificação da matriz energética, essa fonte tem se consolidado como uma das principais alternativas sustentáveis para a geração de eletricidade (IEA, 2022). No contexto brasileiro, a fonte eólica já representa cerca de 13% da matriz elétrica nacional, com tendência de expansão, especialmente em regiões com alto potencial de vento, como o Nordeste (EPE, 2023). No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, a busca por maior eficiência energética é constante, sendo este um fator-chave para garantir a competitividade e a sustentabilidade do setor.

Nesse cenário de crescimento e amadurecimento tecnológico, ainda persistem desafios operacionais relevantes, especialmente no que diz respeito ao consumo interno dos aerogeradores. De acordo com Pao e Johnson (2009), sistemas auxiliares como yaw, pitch, bombas e sistemas de resfriamento podem consumir entre 3% e 10% da energia bruta gerada, impactando negativamente a eficiência global da turbina. Estudos, como o de Ribrant e Bertling (2007), reforçam que o funcionamento contínuo dessas cargas, principalmente em condições de vento baixo, contribui para o desgaste prematuro de componentes e para o aumento dos custos operacionais. Nesse contexto, a adoção de estratégias de gestão inteligente das cargas auxiliares surge como uma alternativa promissora para elevar a eficiência energética, reduzir falhas operacionais e prolongar a vida útil dos equipamentos (EPRI, 2015; IEA, 2022).

Um exemplo prático que evidencia a relevância desse tema ocorreu durante o apagão nacional de 15 de agosto de 2023. Na ocasião, diversas usinas eólicas, devido à baixa velocidade dos ventos, comportaram-se como carga no momento da religação do sistema. Isso ocorreu porque, para iniciar sua operação, os aerogeradores necessitam energizar seus sistemas auxiliares, como yaw, pitch e bombas, o que exigiu fornecimento de energia da rede elétrica justamente em um momento crítico e de baixo vento. Conforme análise do Operador Nacional do Sistema Elétrico, os equipamentos de controle de tensão de vários parques eólicos e solares apresentaram desempenho inferior ao esperado, contribuindo significativamente para os desligamentos em cascata (ONS, 2023). Esse comportamento contribuiu para a

sobrecarga do Sistema Interligado Nacional (SIN), dificultando a retomada da estabilidade. A adoção de estratégias de desligamentos automático de cargas não essenciais em cenários de vento fraco poderia ter reduzido significativamente o impacto do consumo interno na retomada da operação, tomando o processo mais seguro e eficiente.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo:

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor estratégias para otimizar a eficiência energética em usinas eólicas, por meio da redução do consumo interno e da melhoria do desempenho operacional dos aerogeradores. A partir da compreensão dos sistemas auxiliares e seus impactos no funcionamento da turbina, busca-se desenvolver soluções que contribuam para uma operação mais inteligente e sustentável, alinhada às demandas do setor energético.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

Para atingir esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- 1 Identificar os sistemas auxiliares com maior impacto no consumo interno e na ocorrência de falhas;
- 2 Propor estratégias de desligamentos de cargas não essenciais em condições de baixo vento;
- 3 Minimizar falhas operacionais causadas por acionamentos aleatórios em situações de vento fraco;
- 4 Analisar padrões de operação visando à otimização dos recursos internos e à redução de perdas.

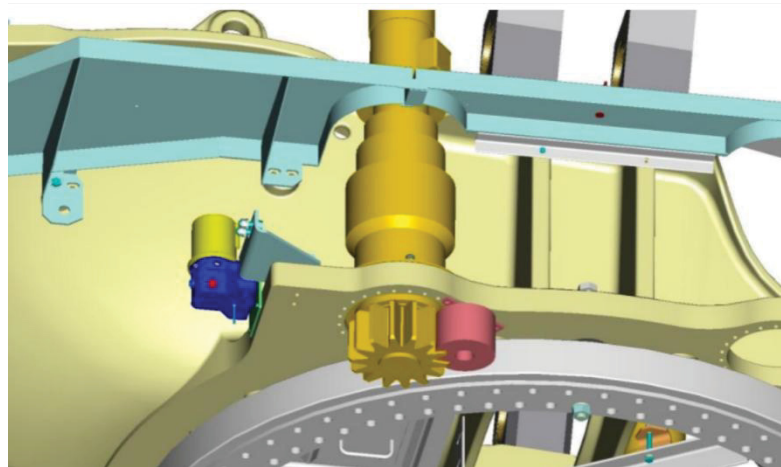
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMA INTERNOS DE AEROGERADORES

Os aerogeradores modernos são compostos por diversos sistemas que garantem seu funcionamento seguro, eficiente e adaptável as condições variáveis do vento. Entre os principais sistema, destacam-se:

- Sistema de orientação (yaw system): Responsável por girar a nacelle (cabeça da turbina) no plano horizontal, alinhando o rotor com a direção do vento predominante, maximizando a captação de energia; em aerogeradores de modelo 1x GE, são utilizados 4 motores AC para realizar o giro da nacelle, conforme ilustrado na FIGURA 1 sistema yaw driver.

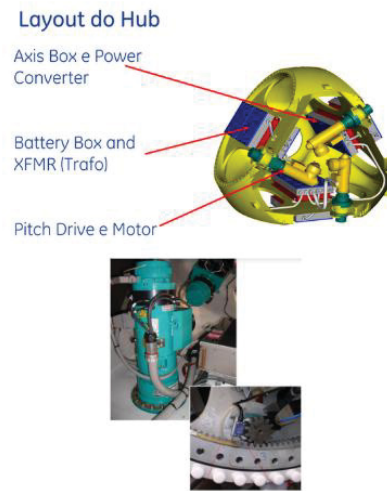
FIGURA 1: SISTEMA YAW DRIVER



FONTE: Manual de manutenção GE(2025)

- Sistema de passo (pitchsystem): Ajusta o ângulo das pás do rotor para controlar a rotação da turbina, protegendo a estrutura em ventos fortes e otimizando a geração em ventos moderados; são utilizados 3 motores CC para realizar a movimentação do pitch que faz parte do componente HUB, conforme FIGURA 2.

FIGURA 2: SISTEMA DE PITCH



FONTE: Manual de manutenção GE (2025)

- Sistema de aquecimento e climatização: Utilizados principalmente em regiões frias, impedem o congelamento de componentes mecânicos e eletrônicos, garantindo a operação em ambientes extremos;
- Bomba de Óleo e lubrificação: Essenciais pra manter a operação segura de componentes como a caixa multiplicadora (gearbox), reduzindo atrito e prevenindo falhas mecânicas; conforme FIGURA 3.

FIGURA 3: SISTEMA DE BOMBA DE ÓLEO

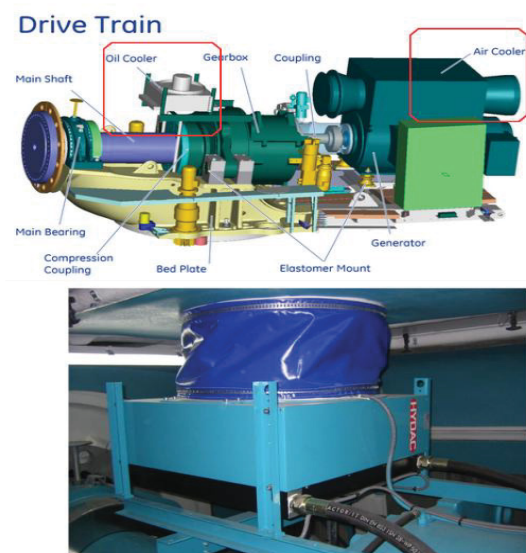


FONTE: Manual de manutenção GE (2025)

- Sistema de ventilação e resfriamento: Garante a dissipação de calor gerador no aerogerador, evitando o superaquecimento dos componentes internos, conforme

FIGURA 4;

FIGURA 4: SISTEMA DE VENTILAÇÃO



FONTE: Manual de Manutenção GE (2025)

2.2 CONSUMO INTERNO AEROGERADORES

O conjunto desses sistemas forma a base do que se convencionou chamar de principais consumos internos de uma turbina eólica, ou seja, a energia elétrica que os próprios aerogeradores consomem para manter seus sistemas auxiliares operacionais. Esse consumo, embora essencial, representa uma fração da energia gerada que não é injetada na rede, impactando diretamente a eficiência líquida do sistema, além de causar desgastes prematuros em componentes que necessita de tempo maior que 4 horas para manutenção. De acordo com PAO e JOHNSON (2009), o consumo interno pode variar entre 3% e 10% da energia bruta gerada, dependendo do modelo da turbina, das condições ambientais e da estratégia de controle empregada.

Em condições de vento baixo, geralmente consideradas na faixa de 1 m/s a 3 m/s, abaixo da velocidade mínima de corte para geração, muitos desses sistemas continuam operando mesmo sem necessidade plena, o que eleva o consumo interno e contribui para o desgaste prematuro de componentes, como os motores de yaw, bombas de óleo, motores de pitch, engrenagens do sistema de pitch e yaw e motores para sistema de refrigeração. Este cenário de operação em condições de vento baixo,

no qual os sistemas auxiliares continuam ativos mesmo sem demanda real, não apenas eleva o consumo interno, como também potencializa falhas operacionais recorrentes. Um exemplo relevante ocorre no sistema de lubrificação da caixa multiplicadora, com falhas como a **Gearbox oil Pressure Too Low**, geralmente associadas à operação prolongada da bomba de óleo em condições inadequadas de pressão e danos no acoplamento da bomba devido acionamentos involuntários em vários momentos.

No sistema de pitch, são comuns alarmes como Pitch Control Desviation axis 1, 2 e 3, Blade Angle Asymmetry e Cable Supervison conforme ilustrado na TABELA 1, que indicam desvio de controle, assimetria no ângulo das pás ou falhas referentes aos motores de pitch, frequentemente causadas por desgaste prematuro dos atuadores, sensores e engrenagens. Já no sistema de yaw, falhas como yaw Runaway, que indicam descontrole na orientação da nacelle, esse comportamento não apenas acelera o desgaste das engrenagens e motores, como também pode levar a situações críticas: se o movimento persistir por tempo excessivo, os cabos internos que conectam o gerado à base da torre, incluindo cabos de energia e controle, podem começar a se enrolar. Para evitar danos, o sistema possui sensores e atuadores de segurança que emitem alarmes e forçam a parada da turbina (como o alarme de Yaw Runaway e Safety chain), exigindo intervenção técnicas (GENERAL ELETRIC,2020).

TABELA 1:FALHAS – DURAÇÃO - PERCA DE PRODUÇÃO

Event	Event ID	Count	Duration (hh:mm:ss)	Lost Production (kWh)
Blade angle asymmetry	EVENT_144	13	02:05:14	1,075.11
Pitch control deviation axis 1	EVENT_145	7	01:37:14	1,813.73
Repair	EVENT_156	3	11:38:04	9,483.53
Pitch system setup test abort for axis 3	EVENT_439	2	17:27:49	20,502.77
Event	Event ID	Count	Duration (hh:mm:ss)	Lost Production (kWh)
Yaw runaway	EVENT_222	29	58:51:24	80,001.48
Repair	EVENT_156	3	17:47:53	20,343.64
Total		32	76:39:17	100,345.12
Event	Event ID	Count	Duration (hh:mm:ss)	Lost Production (kWh)
Pitch control deviation axis 1	EVENT_145	13	01:44:13	1,450.17
Blade angle asymmetry	EVENT_144	3	22:54:01	30,454.07
Pitch motor overtemperature alarm	EVENT_139	1	00:11:27	293.31
Pitch control deviation Axis 3	EVENT_341	1	00:30:30	470.38
Pitch system setup test abort for axis 1	EVENT_437	1	01:25:39	914.93

FONTE: O autor (2025)

Cada uma dessas falhas pode demandar um tempo mínimo de quatros horas

para correção, considerando o tempo necessário para subida e descida do aerogerador, além dos procedimentos de liberação e inspeção. Em casos mais críticos, como desgaste severo nas engrenagens dos sistema de pitch e yaw conforme a FIGURA 5, é necessário a mobilização de guindaste e equipes especializadas, resultando em parada superiores a cinco dias, o que impacta diretamente na disponibilidade da turbina e nos custos operacionais da usina.

FIGURA 5: DESGASTES ENGRENAGEM PITCH BEARING



FONTE: Inspeção Manutenção GE 2025

Portanto, o consumo interno não deve ser avaliado apenas sob a ótica energética, mas também como um vetor de desgastes e falhas, exigindo estratégias inteligentes de controle que considerem a condição do vento e a criticidade dos sistemas. Isso justifica a busca por soluções automatizadas de gestão de cargas não essenciais, como proposta neste trabalho. Um exemplo claro de desgaste gerado pelo uso contínuo de sistemas auxiliares, mesmo em condições de baixa produção, pode ser observado na FIGURA 5 que apresenta o estado comprometido da engrenagem do sistema pitch bearing de uma turbina eólica. A imagem evidencia o desgaste acentuado nos dentes da engrenagem, resultado de esforços mecânicos repetitivos e acionamentos frequentes, mesmo quando não há produção de energia significativa. Esse tipo de falha reforça a importância de estratégias que coloquem em modo de espera (standby) os sistemas não essenciais, contribuindo para a preservação dos componentes e a ampliação da vida útil do equipamento.

2.3 ESTRATÉGIAS DE GESTÃO INTELIGENTE DE CARGAS

Diante dos desafios relacionados ao consumo interno em aerogeradores e ao desgaste prematuro de seus componentes, diversas pesquisas e desenvolvimentos

industriais têm apontado a gestão inteligente de cargas auxiliares como uma estratégia promissora para otimizar a eficiência energética e aumentar a confiabilidade operacional das turbinas eólicas (EPRI, 2015; IEA, 2022). Esse conceito envolve o uso de sistemas de controle capazes de monitorar em tempo real as condições de vento, temperatura, pressão e vibração, entre outros parâmetros operacionais, para acionar ou desligar automaticamente cargas não essenciais em momentos de baixa demanda. A ideia central é que sistemas auxiliares, como bombas de óleo, resistências de aquecimento, ventiladores e motores de yaw, operem apenas quando realmente necessários, com base em condições pré-definidas ou algoritmos adaptativos.

Entre os principais benefícios da adoção dessa abordagem, destacam-se:

- Redução do consumo interno de energia: ao desligar cargas não críticas durante períodos de vento fraco, evita-se o uso desnecessário da energia gerada ou consumida da rede, melhorando a eficiência líquida da turbina;
- Diminuição do desgaste mecânico dos sistemas: reduz-se o tempo de operação contínua de motores, engrenagens e atuadores, como os do yaw e pitch, prolongando a vida útil dos componentes e reduzindo o número de falhas;
- Aumento da disponibilidade da turbina: menos falhas e menor necessidade de manutenção corretiva significam maior tempo de operação contínua e melhoria dos indicadores operacionais;
- Menores custos com manutenção e reposição de peças: ao evitar acionamentos desnecessários, também se evitam intervenções complexas e caras, como uso de guindastes ou troca de engrenagens danificadas;
- Melhor resposta em situações de contingência: como no apagão de 15 de agosto de 2023, turbinas com gestão inteligente teriam menor carga a ser reinicializada, contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico;

Além disso, a aplicação de técnicas de automação e inteligência artificial pode levar a estratégias ainda mais eficazes, permitindo que o sistema "aprenda" com padrões anteriores de operação e falha, e otimize continuamente as decisões de controle. Essa abordagem está alinhada com os princípios da manutenção preditiva e da indústria 4.0, que buscam maximizar a performance dos ativos com base em dados

e diagnósticos em tempo real (WANG et al., 2021).

A implementação da gestão inteligente de cargas auxiliares, portanto, representa um avanço não apenas tecnológico, mas também estratégico para a sustentabilidade das usinas eólicas, ao mesmo tempo em que contribui para a segurança do sistema interligado nacional.

3. METODOLOGIA

Este trabalho será realizado com base nos dados coletados do sistema SCADA de aerogeradores em operação no complexo eólico São Clemente, localizado na região de Caetes, no estado de Pernambuco, durante o período de 2016 até 2025. O autor atua profissionalmente na manutenção e operação de turbinas eólicas neste local desde 2016, o que lhe garante acesso direto aos dados operacionais e históricos do sistema SCADA, além de proporcionar uma compreensão aprofundada dos eventos, falhas e padrões de desempenho registrados ao longo dos anos. Essa vivência prática permite uma análise mais precisa, contextualizada e alinhada à realidade do setor.

O estudo será dividido em quatro etapas principais, conforme apresentado na TABELA 2 abaixo:

TABELA 2: ETAPAS DA PESQUISA

ETAPAS PRINCIPAIS			
ETAPA	DESCRIÇÃO	INICIO	TÉRMINO
1	Levantamento e mapeamento das cargas internas dos aerogeradores	03/06/2025	14/06/2025
2	Classificação das cargas quanto à criticidade, frequência e impacto energético	15/06/2025	25/06/2025
3	Identificação de padrões de funcionamento de cargas não essenciais em baixa produção	26/06/2025	06/07/2025
4	Proposição de estratégias de desligamento inteligente com base nas condições operacionais reais	07/07/2025	20/07/2025

FONTE: O autor (2025)

3.1 LEVANTAMENTO DE CARGAS – ETAPA 1

Nesta primeira etapa, será realizado um levantamento técnico dos principais sistemas auxiliares presentes nos aerogeradores, como os sistema de yaw, pitch, bombas de óleo da gearbox, sistema de aquecimento e ventilação. A identificação será realizada por meio da análise de:

- Identificação na placa do equipamento;
- Relatórios de manutenção e falhas recorrentes;

- Manual do Aerogerador.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CARGAS – ETAPA 2

Após o mapeamento, as cargas serão classificadas segundo três critérios:

- Criticidade operacional: Se a carga é essencial ou não durante o período de vento baixo;
- Frequência de acionamento: obtida por meio do sistema supervisório;
- Impacto energético: estimado com base nos dados de potência do equipamento.

Essa análise permitirá identificar quais cargas representam maior potencial de economia e podem ser gerenciadas de forma mais eficiente.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES OPERACIONAIS EM BAIXA PRODUÇÃO – ETAPA 3

Nesta fase, será feita a análise de dados históricos de operação em condições de vento fraco (entre 1m/s e 3m/s), nas quais a turbina não esta produzindo energia, mas manteve seus sistemas auxiliares ativos. Serão utilizados:

- Gráficos de tendências extraídos do SCADA;
- Logs de eventos e alarmes relacionados às cargas internas;
- Históricos de falhas vinculadas ao uso prolongado de sistemas em momentos sem geração.

O objetivo é identificar padrões de falhas em momentos de vento baixo.

3.4 POSSIBILIDADES DE ESTRATÉGIAS DE DESLIGAMENTO INTELIGENTE - ETAPA 4

Com base nas informações das etapas anteriores, serão propostas estratégias de desligamento automático de cargas não essenciais, baseadas em condições

operacionais reais observadas no SCADA. As estratégias considerarão:

- Limiares de velocidade de vento;
- Comportamento repetitivo de acionamento desnecessário.

Essas propostas serão utilizadas para indicar possíveis correções no sistema de programação operacional da turbina, de modo a obter uma melhor eficiência do aerogerador.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

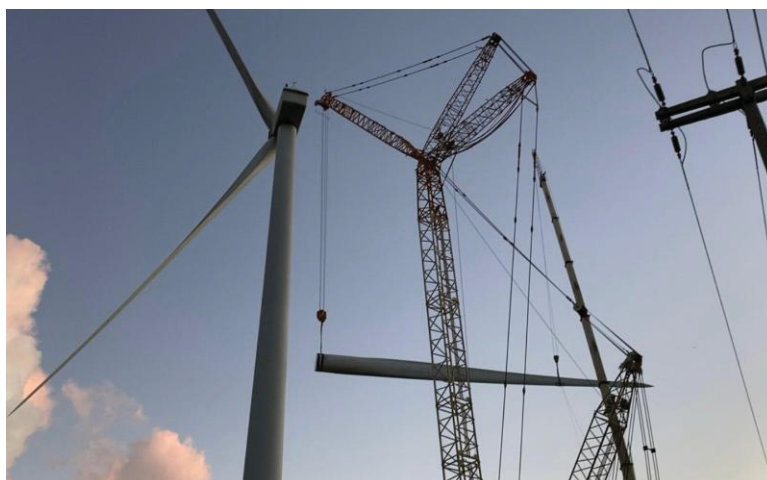
4.1 LEVANTAMENTO E MAPEAMENTO DAS CARGAS INTERNAS DOS AEROGERADORES

A primeira etapa da pesquisa teve como objetivo identificar e caracterizar as principais cargas internas dos aerogeradores do complexo Eólico São Clemente, localizado em Caetés-PE. O levantamento foi realizado com base em manuais técnicos, relatórios de manutenção, dados do Sistema SCADA e inspeção de campo, focando nos sistemas que consomem energia elétrica e se mantem em funcionamento, mesmo em momentos de baixo vento.

As principais cargas internas mapeadas foram:

1. Sistema de Pitch: Durante o levantamento das cargas internas dos aerogeradores, identificou-se o sistema de pitch como um dos principais componentes consumidores de energia elétrica. Cada turbina é equipada com três motores elétricos de 86 VDC e corrente nominal de 80 A, responsáveis por ajustar o ângulo das pás. Esses motores operam em um intervalo de posicionamento que vai de -3° até 85° em funcionamento normal. A atuação do sistema de pitch ocorre com base nas condições de vento, sendo essencial para o controle aerodinâmico da turbina. A FIGURA 6 apresenta uma operação de manutenção no sistema de pitch, envolvendo a substituição de componentes internos.

FIGURA 6: SUBSTITUIÇÃO PITCH BEARING DEVIDO DESGASTES



FONTE: O autor (2025)

2. Sistema de yaw: Outro componente identificado no levantamento das cargas internas foi o sistema de yaw, responsável por manter a nacelle da turbina orientada corretamente em relação à direção do vento. Cada aerogerador é equipado com quatro motores trifásicos de 690 VCA, com corrente nominal de 4 A, acoplados a redutores mecânicos que realizam o giro da nacelle. O sistema opera com base em sensores de direção do vento, ajustando a posição da nacelle conforme necessário. A FIGURA 7 apresenta os cabos de alimentação e controle na base da nacelle, evidenciando o caminho que esses condutores percorrem durante a operação do sistema de yaw.

FIGURA 7: CABOS DOS SISTEMA DO YAW ENROLADOS



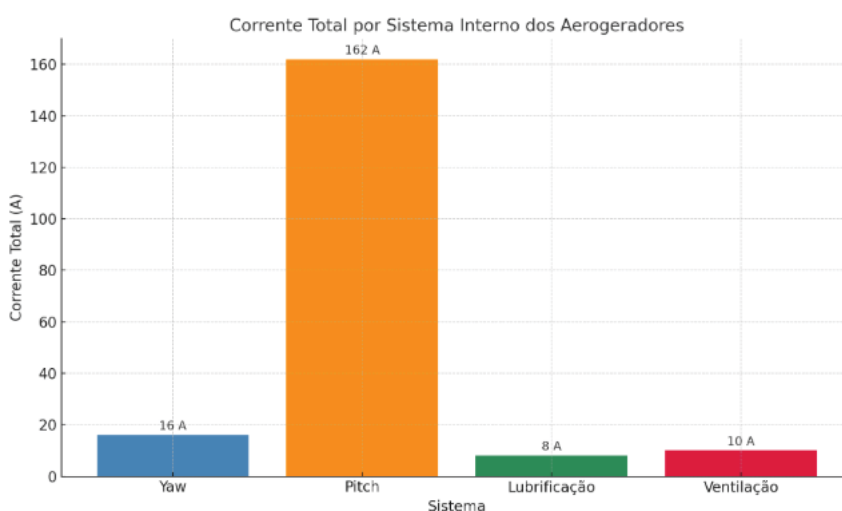
FONTE: O autor (2025)

3. Sistema de lubrificação da Gearbox: O sistema de lubrificação da gearbox é composto por dois motores trifásicos de 690 VCA, com corrente nominal de 4 A cada, responsáveis por acionar as bombas de óleo utilizadas na lubrificação da multiplicadora de velocidade. Esse sistema opera continuamente durante o funcionamento da turbina, garantindo a circulação de óleo sob pressão adequada para os componentes internos da gearbox.
4. Sistema de refrigeração: O sistema de refrigeração é responsável pela dissipação do calor gerado no interior da nacelle. Ele é composto por dois motores trifásicos de 690 VCA, com corrente nominal de 5 A cada. Os ventiladores são distribuídos em

pontos estratégicos para manter a temperatura interna em níveis adequados ao funcionamento dos principais componentes eletromecânicos da turbina, incluindo gearbox, gerador e painéis de potência.

A FIGURA 8 apresenta um comparativo da corrente total consumida por cada sistema interno dos aerogeradores levantados neste estudo: yaw, pitch, lubrificação e ventilação. Observa-se que o sistema de pitch é o que apresenta maior corrente total nominal por turbina, com 162 A, seguido pelos sistemas de yaw (16 A), ventilação (10 A) e lubrificação (8 A). Esses valores foram obtidos com base na quantidade de motores e nas correntes nominais informadas pelos fabricantes dos equipamentos.

FIGURA 8: LEVANTAMENTO DE CARGAS



FONTE: O autor (2025)

4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CARGAS

A TABELA 3 apresenta o levantamento técnico das cargas internas dos aerogeradores com potencial para otimização na gestão de eficiência. Foram catalogadas as principais características elétricas e operacionais dos sistemas de yaw, pitch, lubrificação e ventilação/refrigeração, considerando parâmetros como tensão, corrente, quantidade de motores por turbina, criticidade operacional e funcionamento em condições de vento fraco. A tabela também traz observações técnicas baseadas em dados de campo e registros do sistema SCADA, indicando o comportamento típico de cada sistema durante a operação.

TABELA 3: LEVANTAMENTO TÉCNICO DAS CARGAS INTERNAS DOS AEROGERADORES COM POSSIBILIDADE DE MELHOR GESTÃO DE EFICIÊNCIA

Tabela 3 – Levantamento Técnico das Cargas Internas dos Aero geradores com possibilidade de melhor gestao de eficiência						
Sistema	Tensão	Corrente	Quantidade por turbina	Criticidade	Funcionamento em vento fraco	Observações Técnicas
Yaw	690 VCA trifásico	4A	4 motores	Alta	Sim	Engrenagens acopladas apresentam desgaste; alarmes <i>Yaw Runaway</i> e <i>Safety Chain</i> frequentes.
Pitch	86 VDC	54 A	3 motores (1 por pá)	Alta	Sim	Alto desgaste nas engrenagens; alarmes como <i>Pitch Control Deviation</i> e <i>Angle Asymmetry</i> .
Lubrificação	690 VCA trifásico	4A	2 motores	Média	Sim	Alarmes recorrentes de <i>Low Oil Pressure</i> ; desgaste no acoplamento das bombas.
Ventilação/Refrigeração	690 VCA trifásico	5A	2 motores	Baixa	Sim	Funcionamento contínuo mesmo sem geração; contribui para consumo interno.

FONTE: O autor (2025)

4.3 IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE FUNCIONAMENTO DE CARGAS NÃO ESSENCIAIS EM BAIXA PRODUÇÃO

A análise dos dados operacionais registrado pelo sistema SCADA entre os dias 5 e 7 de fevereiro de 2025 conforme a TABELA 4, revela um padrão relevante no funcionamento de cargas internas, especialmente do sistema de pitch. Conforme a TABELA 4 apresentada, observa-se que, mesmo com velocidade de vento em torno de 3,3 a 3,5 m/s, ou seja, abaixo da velocidade de corte típica para início da geração de energia, o sistema de pitch continua operando de forma ativa.

A coluna que apresenta os valores reais das posições das pás (Blade 1, Blade 2 e Blade 3) mostra variações significativas, indicando movimentações contínuas do sistema de pitch. Essas alterações ocorrem mesmo quando a turbina apresenta potência ativa negativa, como é o caso do registro de -11,29 kW no dia 05/02/2025 às 18:00, evidenciando que a máquina está consumindo energia ao invés de gerar.

Esse comportamento caracteriza o funcionamento de uma carga interna não essencial naquele momento em condições de inatividade da turbina, contribuindo para o consumo interno desnecessário e desgaste mecânico precoce. Além disso, observa-se a movimentação do yaw, com mudanças na posição da nacelle de 314,25° para 328,83°, reforçando a atuação de sistema eletromecânicos mesmo sem geração.

Esses padrões demonstram a necessidade de aprimorar a lógica de controle das turbinas, permitindo que o sistema como Pitch e yaw operem em modo standby

inteligente durante períodos em que a produção é inviável. Essa estratégia evitaria o consumo energético interno elevado e reduziria o desgaste de componentes sensíveis, como motores, engrenagens e sensores de posicionamento.

TABELA 4: DADOS OPERACIONAIS

Meter**Reading\Operational Data****Wind Turbines**

Start Time: 2/3/2025 End Time: 2/28/2025

System Name	Time Stamp	Power(kW)	Generator speed (CCU)(rpm)	Rotor speed (PLC)(rpm)	Blade 1 actual value(°)	Wind speed(m/s)	Blade 2 actual value A(°)	Blade 3 actual value A(°)
CLE6-002	2/5/2025 6:00:00 PM	-11,29	560,02	6,23	18,47	3,39	17,77	16,57
	2/7/2025 8:00:00 AM	-8,58	620,61	6,93	14,76	3,58	14,13	13,05

FONTE: O autor (2025)

Além dos registros operacionais, também foi analisado o histórico de paradas das turbinas, conforme apresentado no relatório Downtime Analysis (TABELA 5), referente ao período de 11 a 18 de setembro de 2022. Neste intervalo, foram contabilizados 466 eventos de parada, totalizando 547 horas e 55 minutos, resultando em uma perda acumulada de 664.340,22 kWh de energia não produzida.

Dentre as categorias de falhas, os sistemas de Pitch e Azimuth (Yaw) se destacam com impactos significativos. O sistema de Pitch aparece como o segundo maior causador de perdas, com 40 eventos que totalizaram 115 horas e 51 minutos de indisponibilidade, resultando em 153.248,32 kWh de energia não gerada. Já o sistema de Azimuth, mesmo com um número menor de ocorrências (32 eventos), também representou 10 horas e 44 minutos de downtime, com 10.233,06 kWh de energia não produzida.

Considerando que esses valores se referem a apenas 7 dias de operação, é possível projetar que, em um ano, perdas dessa ordem poderiam alcançar cerca de 34,6 GWh (equivalente a ~4,2% da produção anual estimada do parque, de 816,8 GWh). Para efeito de comparação prática, apenas as falhas de Pitch registradas nessa semana — 153.248,32 kWh — seriam suficientes para abastecer aproximadamente 80 residências por um ano inteiro (≈ 1.920 kWh/ano por residência). Já as perdas do sistema de Azimuth poderiam suprir cerca de 5 residências anuais. Essas falhas podem estar diretamente associadas ao comportamento observado nos dados anteriores, onde

os sistemas de pitch e yaw operam em situações de vento fraco, promovendo acionamentos desnecessários que aceleram o desgaste dos componentes internos. Como resultado, são geradas falhas como Pitch Control Deviation, Blade Angle Asymmetry e Yaw Runaway, levando a paradas automáticas por segurança.

Esses dados reforçam a necessidade de estratégias de controle mais refinadas, capazes de identificar condições de vento abaixo da geração mínima e, a partir disso, inibir ou otimizar o funcionamento de cargas internas não essenciais como pitch e yaw. A implementação de modos de operação em standby inteligente pode reduzir drasticamente tanto o número de falhas quanto o tempo de parada, além de evitar perdas expressivas de produção energética.

TABELA 5: DADOS OPERACIONAIS

Downtime Analysis

Start Time:9/11/2022

End Time:9/18/2022

Event Summary by Category			
Category	Count	Duration(hh:mm:ss)	Unproduced Energy (kWh)
User	74	223:34:05	253,052.72
Pitch	40	115:51:06	153,248.32
Frequency Converter	186	93:38:21	119,629.24
Gearbox	12	55:10:21	62,423.28
Multiple	33	28:28:42	44,080.68
Azimuth	32	10:44:04	10,233.06
Grid	8	09:12:16	8,198.62
Generator	4	04:38:56	3,819.29
Brake	4	03:10:06	2,117.92
Misc	4	02:54:08	2,507.18
No Fault	69	00:33:18	5,029.91
Total	466	547:55:23	664,340.22

FONTE: O autor (2025)

4.4 ESTRATÉGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA

A partir das análises realizadas ao longo deste trabalho, este estudo propõe três estratégias principais para otimizar a eficiência dos aerogeradores frente ao consumo interno de energia e às falhas operacionais associadas às cargas internas. As estratégias são:

- I. ajustes nos parâmetros de operação dos sistemas de controle, de forma a reduzir

- acionamento desnecessários em regimes de vento fraco;
- II. implementação de modos standby para cargas não essenciais durante períodos de baixa produção energética;
- III. aplicação de algoritmos inteligentes baseados em dados SCADA para tomada de decisão preditiva quanto ao funcionamento dos sistemas internos.

i) Ajustes nos parâmetros de operação dos sistemas de controle

Essa estratégia consiste na redefinição de critérios de acionamento dos sistemas de pitch e yaw em situações de vento abaixo da velocidade de corte. O objetivo é evitar acionamentos desnecessários durante períodos de baixa ou nenhuma produção de energia, o que contribui para o desgaste prematuro dos componentes e aumento do consumo interno.

A FIGURA 9 apresenta um exemplo de simulação desenvolvida no software Scilab, que implementa uma lógica simples de controle para colocar os sistemas em standby quando a velocidade do vento estiver abaixo de 3,5 m/s e o gerador estiver desligado. No caso do sistema de pitch, o algoritmo mantém o último valor de ângulo registrado, evitando movimentações desnecessárias. Já para o sistema de yaw, a lógica considera o desvio angular entre a direção do vento e a posição da nacelle, liberando ou travando o sistema conforme a necessidade operacional.

FIGURA 9: PROGRAMAÇÃO UTILIZANDO SCILAB

```

--> // Estratégia de Standby Inteligente para Aerogeradores

--> // Simulação lógica para controle de Pitch e Yaw com base na velocidade do vento

-->

--> // Definindo valores simulados de entrada

--> vento = 3.2;                // m/s - velocidade do vento

--> status_gerador = "OFF";    // status atual do gerador

--> desvio_vento = 5;          // graus - diferença entre direção do vento e posição da nacelle

-->

--> // Controle do Sistema de Pitch

--> if vento < 3.5 then
>   if status_gerador == "OFF" then
>     disp("Sistema de PITCH em standby");
>     disp("Último valor de ângulo mantido");
>   else
>     disp("Sistema de PITCH ativo");
>   end
> else
>   disp("Sistema de PITCH ativo - vento suficiente");
> end

" Sistema de PITCH em standby"

" Último valor de ângulo mantido"

-->

--> // Controle do Sistema de YAW (Azimuth)

--> if vento < 3.5 then
>   if desvio_vento < 10 then
>     disp("Sistema de YAW travado - desvio pequeno e vento fraco");
>   else
>     disp("Sistema de YAW liberado - desvio elevado");
>   end
> else
>   disp("Sistema de YAW ativo - vento operacional");
> end

" Sistema de YAW travado - desvio pequeno e vento fraco"

-->

```

FONTE: O autor (2025)

A proposta inicial é que esses ajustes sejam aplicados em um aerogerador piloto, sob monitoramento da equipe de engenharia e operação e manutenção (O&M). Com base na análise de desempenho e validação do comportamento em campo, as configurações poderão ser replicadas nos demais aerogeradores da planta por meio dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) interligados em rede.

Essa disseminação pode ser feita de forma rápida e segura com o apoio de plataformas modernas já utilizadas pelas equipes de O&M, como o LiveSpan, que integra inteligência artificial para detectar padrões de falha e comportamentos anômalos a partir de dados históricos e operacionais.

A implementação dessas rotinas no software de controle da turbina viabiliza modos de operação em standby inteligente, desativando cargas em momentos de baixa utilidade sem comprometer a segurança operacional, além de contribuir para o aumento da vida útil dos componentes.

É importante que qualquer alteração de algoritmo passe por etapas de simulação, homologação e auditoria técnica, assegurando compatibilidade com os sistemas de proteção da turbina, bem como resposta adequada em cenários críticos, como retomada do vento após calmaria ou falhas temporárias de sensores.

Para quantificar o potencial de benefício, partimos dos dados observados entre 11 e 18/09/2022: perdas associadas a *pitch* e *yaw* somaram 126,6 h de *downtime* (115,9 h de *pitch* + 10,7 h de *yaw*) e 163.481 kWh de energia não gerada nessa semana. Considerando a estratégia proposta (standby inteligente < 3,5 m/s e redução de acionamentos desnecessários), uma redução conservadora de 30% nas ocorrências ligadas a *pitch/yaw* implicaria em ~38,0 h a menos de *downtime* por semana e ~49.044 kWh recuperados por semana. Se esse desempenho se mantiver ao longo do ano, isso representa ~2,55 GWh/ano, o que equivale a ~0,31% da produção anual estimada do parque ($\approx 816,8$ GWh/ano) ou ao consumo anual de ~1.330 residências (≈ 1.920 kWh/ano por residência).¹

ii) Implementação de modos standby para cargas não essenciais

A segunda estratégia consiste na criação de modos de operação em standby para cargas internas que não são essenciais em momentos de baixa ou nenhuma geração de energia. Essa abordagem visa evitar o acionamento contínuo de sistemas como lubrificação da gearbox e ventilação da nacelle durante períodos em que a turbina encontra-se desligada ou operando abaixo da velocidade de corte.

Embora esses sistemas sejam fundamentais para o funcionamento da turbina em regime normal, seu funcionamento contínuo em condições de vento fraco

¹ Nota: os valores acima são uma projeção a partir dos 7 dias analisados e podem variar com o regime de ventos e o perfil operacional

representa um consumo interno desnecessário e pode contribuir para o desgaste antecipado de motores, sensores e componentes mecânicos. A proposta é que o sistema de supervisão da turbina, integrado ao CLP, identifique automaticamente essas condições e coloque as cargas em standby de forma segura, sem comprometer os limites operacionais definidos pelo fabricante.

Essa lógica pode ser implementada por meio de ajustes no tempo de resposta, limites de atuação e parametrizações específicas que desabilitem temporariamente os motores em determinadas faixas de operação. Além disso, o controle pode ser configurado para retomar o funcionamento normal assim que as condições de geração sejam restabelecidas, garantindo segurança e confiabilidade operacional.

Com essa medida, espera-se uma redução significativa no consumo interno de energia e um aumento da disponibilidade dos sistemas, com menor frequência de manutenções corretivas e maior vida útil dos componentes internos.

iii) Aplicação de algoritmos inteligentes baseados em dados SCADA

A terceira estratégia proposta está relacionada ao uso de algoritmos inteligentes, baseados em dados históricos e em tempo real do sistema SCADA, para tomada de decisão preditiva sobre o acionamento dos sistemas internos dos aerogeradores. Por meio da análise de variáveis como velocidade do vento, status do gerador, temperatura de componentes e desvio angular, esses algoritmos podem antecipar situações de baixa eficiência e adotar medidas preventivas de forma autônoma.

A integração com plataformas que utilizam inteligência artificial, como o LiveSpan, permite identificar padrões de falhas recorrentes, prever comportamentos anômalos e ajustar os parâmetros de controle de forma contínua. Essa inteligência embarcada é capaz de reconhecer, por exemplo, que determinado aerogerador apresenta acionamentos excessivos do yaw em horários específicos, propondo ajustes automáticos na lógica de controle para evitar o problema.

Além disso, esses algoritmos podem gerar relatórios técnicos para a equipe de O&M, indicando ações corretivas, comparações de desempenho entre turbinas da mesma planta e tendências de falha, otimizando o processo de manutenção preditiva e contribuindo para a gestão eficiente dos ativos.

Ao aliar tecnologia, automação e análise de dados, essa estratégia amplia a

capacidade de resposta das turbinas a condições variáveis de operação, promovendo não apenas a redução do consumo interno, mas também o aumento da disponibilidade e da confiabilidade da planta eólica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do levantamento e análise dos sistemas internos dos aerogeradores do Complexo Eólico São Clemente, foi possível identificar que cargas como pitch, yaw, lubrificação e ventilação possuem papel significativo no consumo interno de energia, especialmente em períodos de baixa produção. Esses sistemas, embora essenciais para a operação segura da turbina, demonstraram funcionamento contínuo mesmo em situações de vento abaixo da velocidade de corte, contribuindo para desgaste prematuro de componentes e aumento do número de falhas operacionais.

Entre os problemas verificados, destaca-se o enrolamento dos cabos do sistema de yaw, ocasionado por acionamentos frequentes em momentos de baixa utilidade, além do elevado número de alarmes relacionados ao sistema de pitch, como Pitch Control Deviation e Blade Angle Asymmetry. Tais falhas geram paradas técnicas, perda de disponibilidade e aumento dos custos de manutenção.

Com base nessas observações, foram propostas três estratégias principais para otimização da eficiência energética das turbinas: i) ajustes nos parâmetros de operação dos sistemas de controle; ii) implementação de modos standby para cargas não essenciais e; iii) aplicação de algoritmos inteligentes baseados em dados SCADA.

Essas estratégias visam reduzir o consumo interno desnecessário, prolongar a vida útil dos componentes e aumentar a confiabilidade da planta. A aplicação inicial em um aerogerador piloto, com posterior replicação por meio dos CLPs, permite escalabilidade e baixo risco operacional. A integração com ferramentas de inteligência artificial, como o LiveSpan, reforça ainda mais a capacidade de resposta da usina frente a condições variáveis de operação.

Portanto, conclui-se que a gestão inteligente das cargas internas representa uma solução eficaz e economicamente viável para maximizar o desempenho dos aerogeradores, contribuindo para a sustentabilidade do setor eólico e a resiliência do sistema elétrico nacional.

REFERÊNCIAS

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2022. Global Status Report**. Paris: IEA, 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

PAO, L. Y.; JOHNSON, K. E. **A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms**. In: **AMERICAN CONTROL CONFERENCE**, 2009, [S.l.]. Proceedings [...]. [S.l.: s.n.], 2009.

RIBRANT, J.; BERTLING, L. **Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005**. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 22, n. 1, p. 167-173, 2007.

EPRI – ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Wind Turbine Auxiliary Loads Optimization. Technical Report**. Palo Alto: EPRI, 2015.

EPRI – ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Wind Turbine Auxiliary Systems: Energy Consumption and Reliability Considerations**. Palo Alto: EPRI, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281747309_Wind_Turbine_Auxiliary_Systems_Energy_Consumption_and_Reliability_Considerations. Acesso em: 19 jul. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>. Acesso em: 19 jul. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Relatório de análise da perturbação de 15 de agosto de 2023. Rio de Janeiro: ONS, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br>. Acesso em: 31 jul. 2025.

GE RENEWABLE ENERGY. **Manual de manutenção de aerogeradores 1X. Rev. 21-04-2023**. [S.l.]: GE Renewable Energy, 2023. 236 p.