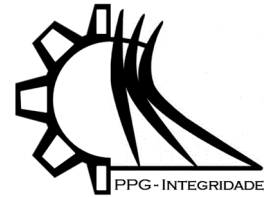


ISSN 2447-6102



Artigo

Metodologia para cálculo de indicador de desempenho operacional de usinas eólicas

Ferreira, A.A.¹, Cormane, J.^{2,*}, Leite, S.R.³

¹ Analista de mercado, RAD Energia no Mercado; rad@radenergianomercado.com.br

² Faculdade de Ciências e Tecnologia em Engenharia (FCTE), Universidade de Brasília; jcormane@unb.br

³ Superintendência de Fiscalização Técnica dos Serviços de Energia Elétrica (SFT), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); sergioleite@aneel.gov.br

* Correspondência: jcormane@unb.br; Tel.: +55 (61)98128-0767

Received: 30/05/2025; Accepted: 03/06/2025; Published: 10/06/2025

Resumo: A expansão exponencial da capacidade instalada de Centrais Geradoras Eólicas no Brasil, impulsionada pela implementação dos leilões de energia renovável, demanda o aperfeiçoamento dos mecanismos de supervisão regulatória (monitoramento, avaliação e fiscalização) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Este estudo propõe uma metodologia estruturada para subsidiar as atividades de fiscalização técnica de parques eólicos conduzidas pela Superintendência de Fiscalização Técnica da ANEEL. A pesquisa fundamentou-se na adaptação da metodologia "Indicadores de Programas - Guia Metodológico" do Ministério do Planejamento, estabelecendo critérios objetivos para seleção e hierarquização de indicadores de desempenho. Implementaram-se os métodos multicritério de Combinação Linear Ponderada (CLP) e Analytic Hierarchy Process (AHP) para desenvolver um Índice Global de Desempenho, permitindo a avaliação quantitativa e comparativa de empreendimentos eólicos. A estrutura metodológica proposto estabelece níveis de satisfação padronizados para cada indicador, alinhados às diretrizes operacionais da ANEEL, culminando na determinação do Índice Global de Desempenho para cada usina eólica analisada. Os resultados demonstram a aplicabilidade da metodologia como ferramenta de apoio à decisão regulatória, proporcionando maior objetividade e transparência nos processos de fiscalização técnica do setor eólico brasileiro. A abordagem desenvolvida contribui para o fortalecimento do arcabouço regulatório nacional e para a otimização da supervisão de ativos de geração eólica em larga escala.

Palavras-chave: Geração Eólica; Indicadores de Desempenho; AHP; Fiscalização; Regulação.

Methodology for Operational Performance Index Calculation in Wind Power Facilities

Abstract: The exponential expansion of installed capacity of Wind Power Generation Plants in Brazil, driven by the implementation of renewable energy auctions, demands the enhancement of regulatory supervision mechanisms (monitoring, evaluation, and inspection) by the National Electric Energy Agency (ANEEL). This study proposes a structured methodology to support technical inspection activities of wind farms conducted by ANEEL's Technical Inspection Superintendence. The research was grounded on the adaptation of the "Program Indicators - Methodological Guide" methodology from the Ministry of Planning, establishing objective criteria for selection and prioritization of performance indicators. Multi-criteria decision-making methods, specifically Weighted Linear Combination (WLC) and Analytic Hierarchy Process (AHP), were implemented to develop a Global Performance Index, enabling quantitative and comparative assessment of wind power projects. The proposed methodological framework establishes standardized satisfaction levels for each indicator, aligned with ANEEL's operational guidelines, culminating

in the determination of the Global Performance Index value for each analyzed wind power plant. Results demonstrate the methodology's applicability as a regulatory decision-support tool, providing enhanced objectivity and transparency in technical inspection processes within the Brazilian wind power sector. The developed approach contributes to strengthening the national regulatory framework and optimizing supervision of large-scale wind generation assets.

Keywords: Wind power generation; Performance Index; AHP; Regulatory supervision; technical compliance.

1. Introdução

A expansão exponencial da capacidade instalada de geração eólica no Brasil demanda o contínuo aperfeiçoamento do arcabouço regulatório e dos mecanismos de fiscalização, visando assegurar o fornecimento energético confiável aos consumidores e garantir segurança jurídica aos agentes setoriais. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão regulador responsável por assegurar a conformidade operacional das usinas de geração com os dispositivos normativos vigentes, exerce papel fundamental nas atividades de supervisão e fiscalização do setor elétrico brasileiro.

O incremento substancial da participação da fonte eólica na matriz energética nacional, conjugado com a limitação de recursos humanos especializados nos setores de fiscalização, impõe desafios significativos ao monitoramento efetivo do extenso parque eólico em operação. Esta limitação compromete a identificação sistematizada de não-conformidades recorrentes entre diferentes empreendimentos, prejudicando a implementação de ações fiscalizatórias integradas e coordenadas. Embora a execução de fiscalizações pontuais seja fundamental em casos específicos, tal abordagem mostra-se impraticável quando aplicada indiscriminadamente ao universo de parques eólicos atualmente em operação no território nacional.

Dados provenientes da Superintendência de Fiscalização Técnica da ANEEL evidenciam que o processo de maturação dos complexos eólicos brasileiros tem sido caracterizado por elevados índices de ocorrências operacionais e indisponibilidades forçadas, quando comparado a outras tecnologias de geração. Esta realidade operacional suscita preocupações quanto à confiabilidade e eficiência do parque gerador eólico nacional.

Neste contexto, a dificuldade de monitoramento sistemático do desempenho operacional constitui obstáculo significativo para a identificação precisa de empreendimentos aptos à operação comercial e aqueles que apresentam restrições temporárias ou permanentes. A ausência de monitoramento contínuo pode resultar em operação subótima dos ativos, com aproveitamento inadequado do recurso eólico disponível, além de gerar custos adicionais decorrentes de manutenções corretivas que poderiam ser mitigadas através de estratégias preventivas.

A implementação de metodologia estruturada para avaliação técnico-operacional de complexos eólicos constitui ferramenta estratégica para subsidiar campanhas de fiscalização direcionadas, possibilitando ações coordenadas em empreendimentos que apresentem desafios similares. Esta abordagem metodológica, além de otimizar os recursos disponíveis para fiscalização, forneceria suporte técnico aos agentes geradores no desenvolvimento de planos de ação corretivos, através da construção de diagnóstico abrangente sobre a qualidade operacional e disponibilidade dos parques eólicos nacionais.

Considerando que a geração eólica se consolidou como uma das principais fontes da matriz elétrica brasileira, com perspectivas de crescimento sustentado para os próximos anos, o presente trabalho fundamenta-se na necessidade de aprimoramento dos processos de fiscalização da geração eólica. O objetivo central consiste em desenvolver subsídios técnicos e instrumentos analíticos para a ANEEL, visando a otimização dos processos de monitoramento e supervisão do parque eólico brasileiro, contribuindo para a melhoria da confiabilidade e eficiência operacional do setor.

2. Materiais e Métodos

O monitoramento e controle de sistemas eólicos é importante para garantir melhor operação e eficiência. A análise dos dados provindos desses sistemas possibilita verificar o desempenho das usinas e comparar características entre sistemas de diferentes tamanhos, configurações e condições climáticas. O monitoramento dos equipamentos das usinas unido à gestão de ativos permite prever a vida útil de equipamentos e possibilita um melhor planejamento de operação e manutenção da planta COSTA et al. (2016). Em GONZALEZ et al. (2018), observa-se que a operação e manutenção de parques eólicos no Brasil, é tratada como um problema de ordem técnica – pela descrição dos tipos de falhas e paradas que ocasionam a perda de geração de eletricidade, ou de ordem contratual – pela descrição dos indicadores de resultado para cumprimento de contratos.

Nesse contexto, verifica-se a importância da coleta, armazenamento, tratamento e posterior análise de dados advindos dos centros de geração eólica. Atualmente, as unidades de operação de usinas eólicas contam com softwares de monitoramento e controle (*Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA*) que auxiliam o agente gerador a gerenciar possíveis falhas, paradas ou quedas no rendimento da turbina eólica SILVA (2016). Assim sendo, entende-se que para garantir o melhor desempenho dos empreendimentos eólicos, o monitoramento dos ativos por meio de Indicadores Chave de Desempenho ou *Key Performance Indicator* (KPI), torna-se um processo da maior relevância COSTA et al. (2016).

O propósito deste trabalho é estabelecer os critérios objetivos para seleção e hierarquização de indicadores de desempenho de usinas eólicas. Para tal, a metodologia do presente trabalho foi desenvolvida a partir da adaptação da metodologia "Indicadores de Programas - Guia Metodológico" do Ministério do Planejamento, em conjunto com os métodos de análise multicritério, "Combinação Linear Ponderada (CLP)" e "Analytic Hierarchy Process (AHP)".

- **Indicadores de Programas - Guia Metodológico**

O método utilizado no presente artigo, visando a seleção de indicadores para a avaliação operacional de complexos eólicos, é uma adaptação do documento intitulado "Indicadores de Programas - Guia Metodológico", publicado em 2010 pelo Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Este documento objetiva orientar gestores na construção de indicadores de Programas de Governo MPO (2010).

- **Combinação Linear Ponderada - CLP**

A avaliação dos indicadores selecionados será realizada a partir da Combinação Linear Ponderada (CLP), um dos métodos mais utilizados na Análise Multicritérios (AMC). Na Combinação Linear Ponderada os fatores são padronizados para uma escala numérica comum, recebem pesos e são combinados por meio de uma média ponderada. Para o presente trabalho, objetiva-se calcular uma Pontuação Final para cada usina eólica em análise, agregando o resultado dos indicadores para, então, comparar o desempenho dos empreendimentos. A Pontuação Final pode ser calculada a partir da Eq. (1):

$$PF = \sum_{i=0} w_i \cdot x_i \quad (1)$$

Onde, PF é a Pontuação Final, w_i é o Peso do Indicador i e x_i é o Nível de Satisfação do Indicador i . Em seguida é calculado o Índice Global (IG) para cada usina, que é o valor normalizado da Pontuação Final para que o resultado se encontre entre 0 e 100 (Equação 2). O valor do IG indicará se o desempenho operacional dos empreendimentos está dentro dos níveis satisfatórios ou não e permitirá a comparação dos ativos eólicos.

$$IG[\%] = \frac{PF - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde, PF é a Pontuação Final, P_{\min} é a Pontuação Mínima e P_{\max} é a Pontuação Máxima. O valor do IG permitirá a avaliação final da central geradora e seguirá a escala estabelecida pela ANEEL na Nota Técnica 075/2014-SFG/ANEEL que trata sobre metodologia de fiscalização de empreendimentos de geração. A conceituação geral de cada usina se dará da seguinte forma:

1. Conceito A: pontuação acima de 90% – Excelente;
2. Conceito B: pontuação de 70% a 90% – Bom;
3. Conceito C: pontuação de 50% a 70% – Regular;
4. Conceito D: pontuação de 30% a 50% – Insuficiente;
5. Conceito E: pontuação abaixo de 30% – Péssimo.

- **Analytic Hierarchy Process – AHP**

O peso de cada indicador (w_i), ou seja, seu nível de importância perante os objetivos do trabalho, será calculado a partir do Processo de Análise Hierárquica (AHP, sigla em inglês). O AHP é um método de tomada de decisão multicritério

fundamentado na avaliação par-a-par de alternativas em termos de importância relativa, de acordo com os critérios estabelecidos, tanto quantitativos quanto qualitativos RODRIGUES et al. (2022).

O AHP é uma ferramenta que consolida as diferentes naturezas, grandezas e importâncias das dimensões de análise, permitindo, inclusive, realizar avaliações com base em comparações múltiplas, nos casos onde medidas individuais não têm significado. A utilização do AHP permite a análise e hierarquização de projetos e programas de forma justificável, é matematicamente consistente e é utilizado quando se pretende analisar a importância relativa de cada um dos critérios pré-estabelecidos, uma vez que os mesmos podem possuir importâncias variáveis para cada decisor SILVA et al. (2009).

Por meio do método AHP, os pesos dos critérios podem ser encontrados através de uma matriz de comparação pareada e com dimensões iguais ao número de critérios. Para o preenchimento da matriz, o intervalo de valores recomendado é de 1 a 9 e é utilizado. Sendo que 1 significa que dois critérios possuem a mesma importância quando comparados, e 9 significa extrema importância de um critério em detrimento de outro. Além disso, apenas metade das comparações podem ser feitas uma vez que a outra metade é composta de comparações recíprocas.

De forma a viabilizar a implementação da metodologia desenvolvida, a mesma é dividida em três etapas (Seleção dos indicadores, Definição dos pesos dos indicadores e Cálculo do Índice Global para cada usina eólica). Cada uma das etapas contém uma quantidade de passos diferentes, como ilustrado na Figura 1.

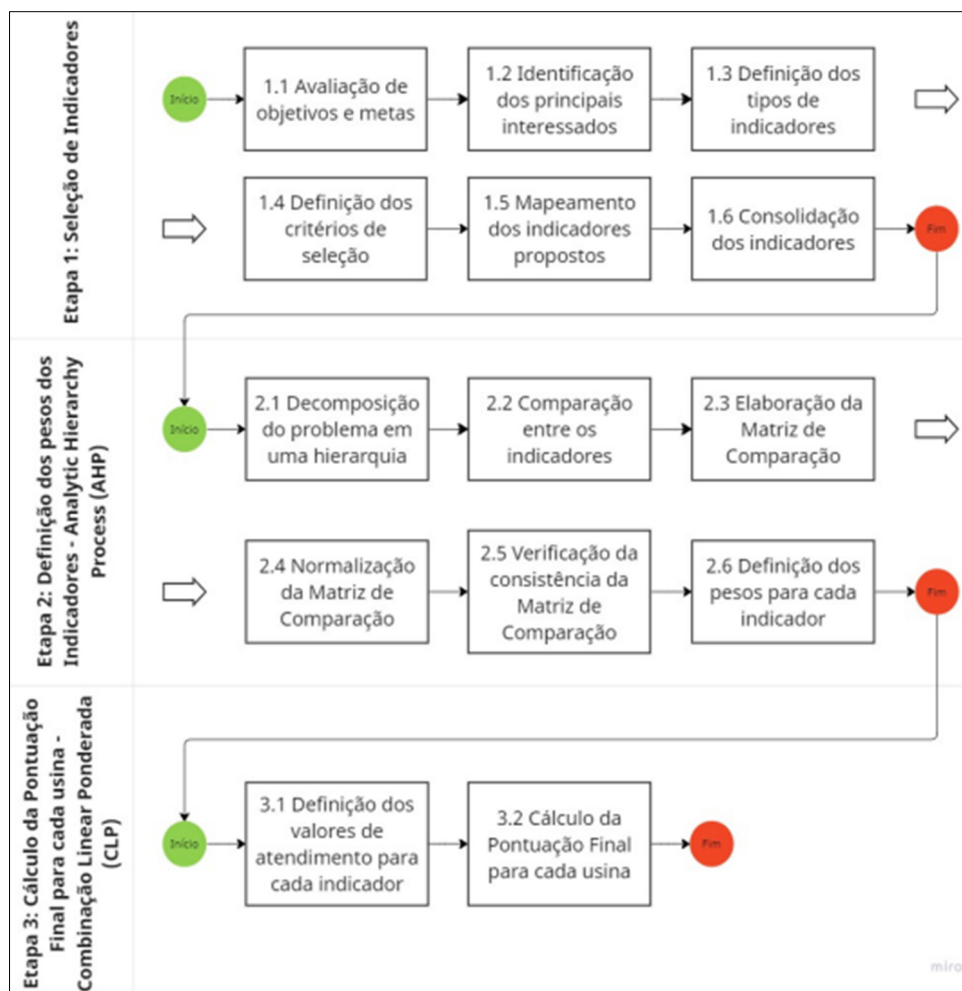


Figura 1. Fluxograma da metodologia desenvolvida.

3. Resultados

Etapa 1: Seleção dos indicadores

Para a seleção dos indicadores, adotaram-se critérios rigorosos que garantem a qualidade e aplicabilidade dos parâmetros selecionados: relevância, especificidade, mensurabilidade, comparabilidade, rastreabilidade, disponibilidade e confiabilidade. O processo de identificação baseou-se em uma revisão bibliográfica da literatura

científica especializada, complementada pela análise de documentos técnicos e normativos produzidos por órgãos reguladores públicos e associações técnicas do setor elétrico brasileiro. A partir deste mapeamento criterioso, foram selecionados sete indicadores fundamentais, descritos e seguidos e resumidos na Tabela 1.

- **Fator de Capacidade Efetivo (FCE)**

O fator de capacidade de uma estação de geração de energia elétrica é a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período. É uma medida adimensional que traduz a “eficiência” da usina eólica em relação ao seu valor nominal e serve como parâmetro para comparar projetos de potência nominal diferentes Dantas (2013).

- **Déficit/Superávit de Geração Eólica (D|S%GF)**

Indicador que demonstra se a usina está gerando energia elétrica acima ou abaixo do valor ideal determinado por meio do cálculo da Garantia Física.

- **Disponibilidade de Tempo (DT)**

Indicador que relaciona o tempo que um parque eólico esteve disponível para operar com o tempo total em que ele deveria ter estado disponível para operar.

- **Taxa de Indisponibilidades (TI)**

Indicador que relaciona o tempo que uma usina eólica esteve indisponível para operar em decorrência de uma indisponibilidade prolongada com o tempo total em que ela deveria ter estado disponível para operar.

- **Tempo Médio de Reparo (TMR)**

Indicador que mostra o tempo médio que uma usina leva para reparar uma falha e voltar a operar em condições normais.

- **Tempo Médio Entre Falhas (TMF)**

Indicador que mostra o tempo médio entre duas indisponibilidades subsequentes em um mesmo empreendimento.

- **Classificação de Ocorrências Graves (COG)**

Indicador qualitativo determinado a partir do maior grau de severidade verificado em uma ou mais indisponibilidades de uma central geradora eólica. O conceito do indicador é determinado a partir da pontuação atribuída pela ANEEL à indisponibilidade comunicada pelo agente de geração.

Tabela 1. Indicadores selecionados.

Indicador	Forma de cálculo	Fonte
Fator de Capacidade Efetivo (FCE)	$FCE = \frac{EEG}{PI \cdot t} 100\%$	ONS (2019), Santos (2016), Mustafa et al. (2021), Varella (2013), Pfaffel et al. (2019), Brilhante et al. (2019) e ANEEL (2019)
Déficit Superávit de Geração Efetiva (D S)	$D S = \frac{EEG - GF}{GF}$	ANEEL (2019)
Disponibilidade de Tempo (DT)	$DT = \frac{T_o}{T_t} 100\%$	Pfaffel et al. (2019), Gonzalez et al. (2017), Santos (2016), Brilhante et al. (2019), Iglesias et al. (2010) e Varella (2013)
Taxa de Indisponibilidades (TI)	$TI = \frac{t_{falha}}{\Delta t} 100$	Mustafa et al. (2021), Varella (2013), Pfaffel et al. (2019) e Brilhante et al. (2019)
Tempo Médio de Reparo (TMR)	$TMR = \frac{\sum_{i=1}^N HIR_i}{\sum_{i=1}^N NDF_i}$	Santos (2016), Mustafa et al. (2021), Pfaffel et al. (2019) e Brilhante et al. (2019)
Tempo Médio entre Falhas (TMF)	$TMF = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} \Delta t_{falhas,i}}{N_f}$	Santos (2016), Pfaffel et al. (2019), Brilhante et al. (2019) e Gonzalez et al. (2017)
Classificação de Ocorrências Graves (COG)	---	Leite et al. (2017)

Etapa 2: Definição dos pesos dos indicadores

O problema foi decomposto hierarquicamente (Passo 1) e os indicadores foram comparados com base no estudo de Pfaffel et al. (2019), que pesquisou 30 especialistas da indústria eólica sobre 34 potenciais indicadores abrangendo desempenho, manutenção, confiabilidade, segurança, saúde, ambiente e finanças (Passo 2). Foi elaborada uma Matriz de Comparação baseada na meta análise do mesmo estudo (Passo 3), seguida pela normalização desta matriz e cálculo do Vetor Prioridade (Passo 4). A consistência da matriz foi verificada (Passo 5). Após confirmação da consistência, o Vetor Prioridade foi utilizado para definir os pesos específicos de cada indicador, estabelecendo sua importância relativa no estudo (Passo 6). O método permitiu transformar o conhecimento especializado em pesos que quantificam a contribuição dos indicadores na gestão de parques eólicos. Os valores de referência para os pesos de cada indicador estão sujeitos a revisão e ajuste. A Tabela 2 apresenta o nível de importância dos indicadores.

Tabela 2. Pesos dos indicadores.

Indicador	Peso
Fator de Capacidade Efetivo (FCE)	35%
Déficit Superávit de Geração Efetiva (D S)	22%
Disponibilidade de Tempo (DT)	18%
Taxa de Indisponibilidades (TI)	7%
Tempo Médio de Reparo (TMR)	7%
Tempo Médio entre Falhas (TMF)	7%
Classificação de Ocorrências Graves (COG)	4%

Etapa 3: Cálculo do Índice Global para cada usina eólica

Os valores de atendimento para cada indicador foram estabelecidos mediante revisão bibliográfica (passo 1), com os resultados organizados na Tabela 3. Em seguida, a partir dos pesos dos indicadores e dos respectivos valores de referência, aplicando a Equação 1 e a Equação 2, foi calculado o IG para cada central geradora eólica (passo 2).

Tabela 3: Pontuação e valores de referência dos indicadores.

Indicador	Pontuação			
	4	3	2	1
FCE	FCE \geq 40% Eficaz	30% \leq FCE < 40% Adequado	20% \leq FCE < 30% Inadequado	FCE < 20% Reprovável
D S	(D S) > -13.4% Eficaz	-19.4% \leq (D S) < -13.4% Adequado	- Inadequado	(D S) < -19,4% Inadequado
DT	DT \geq 95% Desejável	85% \leq DT < 95% Aceitável	75% \leq DT < 85% Razoável	DT < 75% Reprovável
TI	TI \leq 1,8% Desejável	1,8% < TI \leq 2,4% Aceitável	2,4% \leq TI < 3,0% Razoável	TI > 3,0% Reprovável
TMR	TMR < 40 dias Severidade baixa	40 dias \leq TMR < 6 dias Moderada	65 dias \leq TMR < 100 dias Alta	TMR \geq 100 dias Extrema
TMF	TMF \geq 2160 dias Desejável	1440 dias \leq TMF < 2160 dias Aceitável	720 dias \leq TMF < 1440 dias Razoável	TMF < 720 dias Reprovável
COG	Acidente sem danos pessoais	Acidente sem afastamento	Acidente com afastamento	Acidente com mortes

A seleção dos parques eólicos participantes da avaliação deu-se a partir das informações disponibilizadas no Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA ANEEL (2023a). Buscou-se englobar o máximo de centrais geradoras na avaliação para que o panorama de desempenho operacional elaborado reflita a realidade das usinas eólicas brasileiras. Sendo assim, de 976 empreendimentos em operação em 2023 no Brasil, foram selecionados 761

para participar do estudo, isto é, 78% do universo dos parques eólicos. As outras 215 centrais geradoras foram descartadas da avaliação por falta de dados necessários para o cálculo dos indicadores em análise.

Para o cálculo dos indicadores foi utilizada a base de dados de Ocorrências Graves e Indisponibilidades Prolongadas da ANEEL. ANEEL (2023b), a base de dados de Geração de Energia Elétrica da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica CCEE (2023) e a base de dados de Garantia Física da Empresa de Pesquisa Energética EPE (2023).

Foram utilizados os dados de geração de 2022 para calcular o Fator de Capacidade Efetivo (FCE) e o Déficit/Superávit de Geração (D|S%GF). Já para o cálculo da Disponibilidade de Tempo (DT), Taxa de Indisponibilidades (TI), Tempo Médio de Reparo (TMR), Tempo Médio Entre Falhas (TMF) e Classificação de Ocorrências Graves (COG), foram utilizados dados entre 2016 e 2022, uma vez que a ANEEL começou a armazenar os dados referentes a esses indicadores a partir de 2016 e, além disso, verificou-se que informações relacionadas a operação e manutenção (O&M) não fornecem conclusões relevantes em curtos períodos de tempo.

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para cada um dos indicadores por meio de gráficos de dispersão que relacionam a classificação obtida por cada usina com o tempo de operação do respectivo empreendimento.

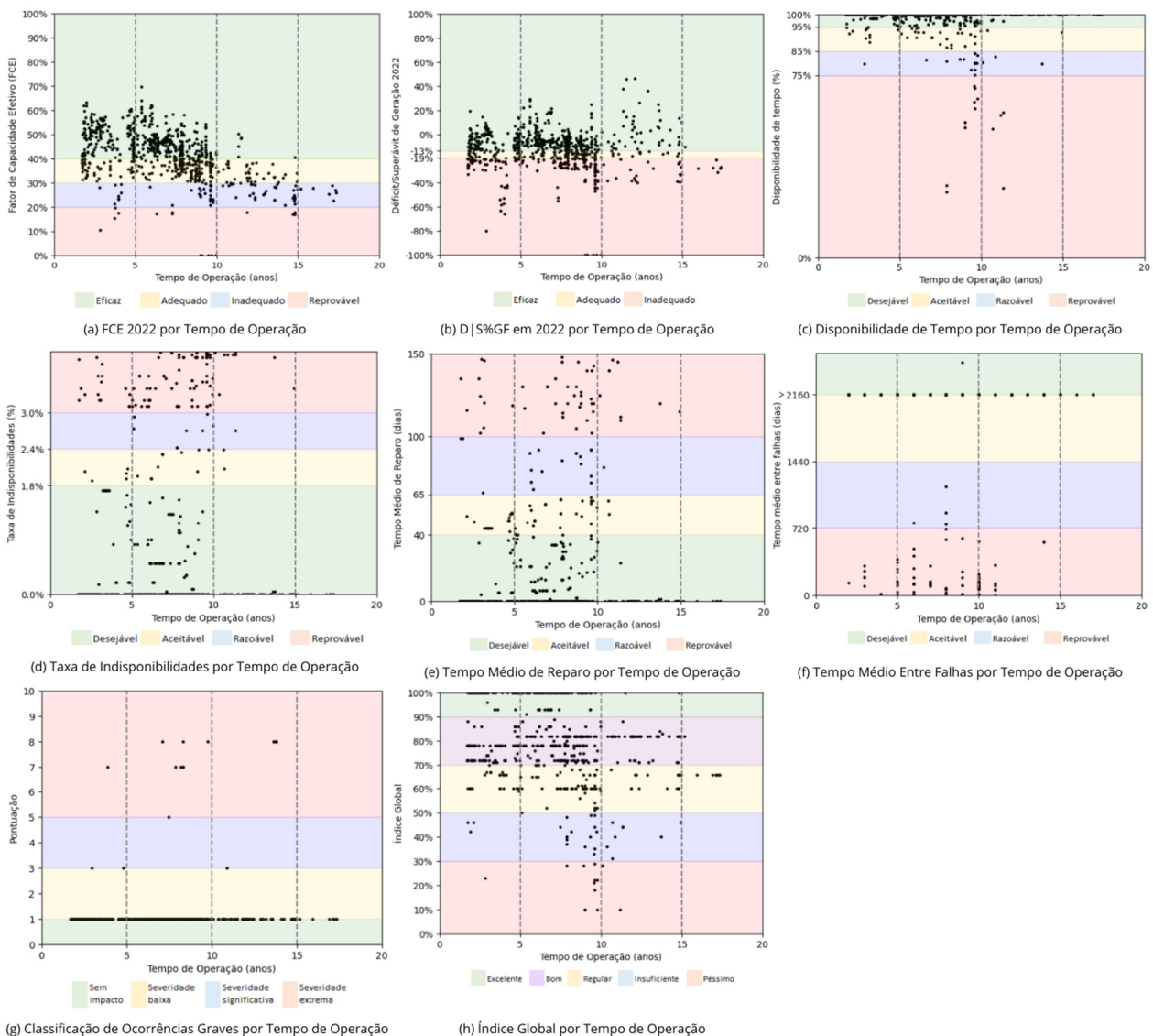


Figura 2. Gráficos de dispersão para cada indicador analisado.

O Fator de Capacidade Efetivo (Figura 2a), observa-se que pouco mais de 50% dos empreendimentos eólicos possuem classificação eficaz, enquanto os outros 50% dividem-se entre as classificações adequada, inadequada e reprovável, sendo a última com apenas 2,3% dos parques. Para o Déficit|Superávit de Geração (Figura 2b), verifica-se que pouco mais de 50% dos empreendimentos eólicos possuem classificação eficaz, enquanto os outros 50% dividem-se entre as classificações adequada e inadequada, sendo a última com cerca de 25% dos parques eólicos. Já para a

Disponibilidade de Tempo (Figura 2c), constata-se que a grande maioria das centrais geradoras brasileiras possuem excelente desempenho. Mais de 90% da amostra apresenta classificação desejável e apenas 1,4% se enquadra como reprovável.

A Taxa de Indisponibilidades (Figura 2d), verifica-se que as centrais geradoras se dividem basicamente entre dois conceitos, 87,9% são classificadas como desejável e 12% são reprováveis. Para o Tempo Médio de Reparo (Figura 2e), infere-se que a classificação que mais aparece entre os empreendimentos em avaliação é a desejável, com 83,4% dos parques. Por outro lado, 12,9% da amostra se enquadra em reprovável, que representa a nota mais baixa. Já para o Tempo Médio Entre Falhas (Figura 2f), constata-se que a classificação que mais aparece entre os empreendimentos em avaliação é a desejável, com 84,5% dos parques, sendo seguida pelos conceitos reprovável e aceitável, cada um com cerca de 6% da amostra. Os resultados obtidos para a Classificação de Ocorrências Graves (Figura 2g), mostraram que 98% das indisponibilidades das usinas eólicas classificam-se como "sem impacto". O conceito que aparece em segundo lugar é a "severidade extrema", com apenas 2,6% da amostra.

Por fim, partir do gráfico da Figura 2h, pode-se verificar que a maioria da amostra está concentrada na faixa de pontuação entre 70% e 90%. Além disso, percebe-se que os empreendimentos com conceito "insuficiente" ou "péssimo" possuem de 5 a 15 anos de operação.

A Figura 3 e a, mostram os resultados obtidos após cálculo do valor de IG para cada usina eólica.

A partir da Tabela 4, constata-se que aproximadamente 80% dos parques eólicos dividem-se entre os conceitos "excelente" e "bom", sendo o conceito "bom" o que mais aparece. O restante das centrais geradoras, cerca de 20%, dividem-se entre as três últimas classificações, "regular", "insuficiente" e "péssimo", sendo o pior conceito com apenas 1,7% das usinas.

Tabela 4: Quantidade de usinas por classificação

Quantidade de Usinas por Classificação [abs %]					
Indicador	Excelente (A)	Bom (B)	Regular (C)	Insuficiente (D)	Péssimo (E)
IG	279 36,7%	323 42,4%	120 15,8%	26 3,4%	13 1,7%

A análise do Índice Global é confirmada pelos parâmetros estatísticos apresentados na tabela 5 e na Figura 3. A partir do intervalo interquartil e da mediana do gráfico boxplot, infere-se que ao menos 50% da amostra avaliada encontra-se entre os dois melhores conceitos, sendo 25% dos empreendimentos com nota entre 70% e 80%, e os outros 25% com nota entre 80% e 100%. Já o gráfico violino, bem como o histograma, fornecem a interpretação visual acerca da concentração da amostra nas faixas de avaliação correspondentes aos conceitos "excelente" e "bom".

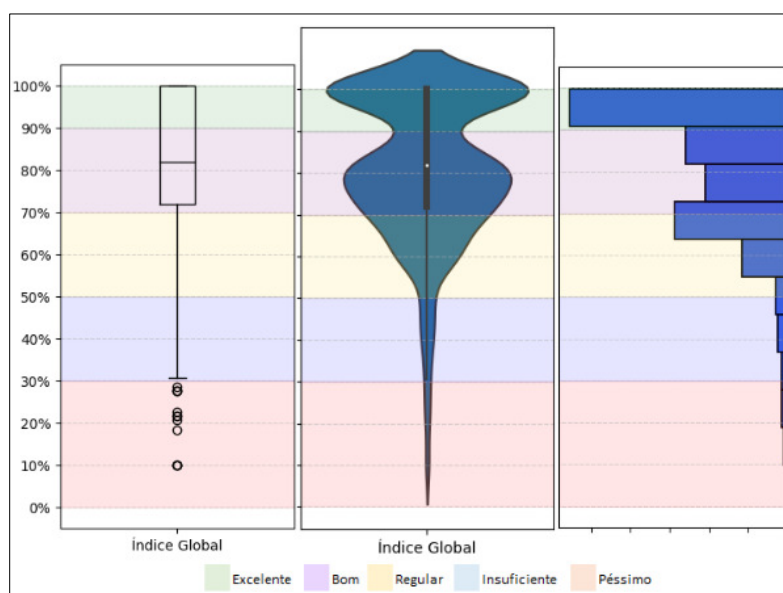


Figura 3. BoxPlot, Gráfico Violino e Histograma, respectivamente, para o IG.

Por fim, verifica-se que todos os outliers do gráfico boxplot são correspondentes aos parques eólicos avaliados como "péssimos", isto é, a parcela de centrais geradoras com desempenho inferior representa casos atípicos quando comparados aos demais.

Tabela 5: Parâmetros Estatísticos para o Índice Global

Indicador	Parâmetros Estatísticos					
	Q1	Q2	Q3	Q3-Q1	Média	Desvio
IG	72%	82%	100%	28%	81%	18%

5. Conclusões

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de metodologia para avaliação do desempenho operacional de usinas eólicas que possa servir como subsídio às ações de monitoramento no âmbito da regulação e fiscalização do setor elétrico. Em suma, os indicadores relacionados à geração de energia, Fator de Capacidade Efetivo, Déficit|Superávit de Geração e Disponibilidade de Tempo, apresentaram resultados satisfatórios para a maioria das usinas em análise, o que vai ao encontro dos valores calculados para os indicadores relacionados à operação e manutenção das usinas, Taxa de Indisponibilidades, Tempo Médio de Reparo, Tempo Médio Entre Falhas e Classificação de Ocorrências Graves, que também apresentaram, em sua maioria, boas classificações.

Em geral, observa-se que o parque eólico brasileiro apresenta bom desempenho. A análise individual dos indicadores, bem como os resultados para o Índice Global, demonstrou a presença de empreendimentos com classificação reprovável. A identificação desses parques eólicos contribui para as atividades de monitoramento e garante celeridade aos processos de fiscalização da ANEEL, uma vez que as ações de fiscalização serão direcionadas às usinas eólicas com classificações desfavoráveis.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- COSTA, F. MENHEM, A. RAFAEL, C. VIANA, S. MIRANDA, M. Otimização da operação e manutenção de usinas eólicas através do monitoramento e gestão integrada de ativos. Brazil Windpower 2016 Conference and Exhibition, 2016.
- GONZALEZ M. GABRIEL, M. AYLLA, M. CASSIMIRO, D. MONTEIRO, R. MEDEIROS, R. CAVALCANTI, E. Operação e manutenção de parques eólicos no brasil: Desafios e oportunidades. Brazil Windpower 2016 Conference and Exhibition, 2018.
- SILVA, L. R. A. PREVCONFI: Confiabilidade aplicada na manutenção preventiva de usinas eólicas, com foco em minimização de custos. 83 p. Dissertação (Mestrado em Energia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- MPO, Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão. Indicadores de Programas - Guia Metodológico; Ministério do Planejamento: Brasília, Brasil, 2010.
- Rodrigues, M.R.; Silva, A.L.; Santos, P.C.; Oliveira, R.F. Procedimento de priorização de indicadores para projetos kaizen baseado em método multicritério. *Exacta* 2022. Disponível online: <https://doi.org/10.5585/exactaep.2022.21661> (acessado em 2022).
- Silva, M.G.; Cândido, G.A.; Martins, M.F.; Delgado, N.A. Método de construção do índice de desenvolvimento local sustentável: Uma proposta metodológica e aplicada. *Rev. Bras. Prod. Agroindustriais* 2009, 11, 55-72.
- Dantas, E.M. Um estudo do fator de capacidade em usinas eólicas. Dissertação de Graduação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2013.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Boletim Mensal de Geração Eólica - Setembro; ONS: Rio de Janeiro, Brasil, 2019.
- Santos, M.A.T.D. Sistema de medição de desempenho para operação e manutenção de parques eólicos no Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2016.
- Mustafa, A.M.; Bass, O.; Aldabbagh, L.B.Y.; Abulifa, A.A.; Zellagui, M. An overall performance index for wind farms: A case study in norway arctic region. *Int J Syst Assur Eng Manag* 2021, 12, 938-950.
- Brilhante, F.P.C.; Silva, M.A.; Santos, R.L.; Oliveira, J.C. Development of methodology and performance indicators for wind farms monitoring. In Proceedings of the 18th World Wind Energy Conference, Brasília, Brasil, 15-17 outubro 2019.
- ANEEL, Nota Técnica nº 135/2019—SFG-SRG/ANEEL; Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, Brasil, 2019.
- Pfaffel, S.; Faulstich, S.; Rohrig, K. Recommended key performance indicators for operational management of wind turbines. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019, 1222, 012035.

14. Gonzalez, E.; Reder, M.; Melero, J.J. Key performance indicators for wind farm operation and maintenance. *Energy Procedia* 2017, 137, 559-570.
15. Iglesias, G.; Castellanos, P.; Seijas, A. Measurement of productive efficiency with frontier methods: A case study for wind farms. *Energy Economics* 2010, 32, 1199-1208.
16. Varella, H.C. Medição de desempenho na cadeia de suprimentos da energia eólica: Proposta de um conjunto de indicadores de desempenho. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2013.
17. Leite, S.R.; Oliveira, E.C. Análise de riscos na atividade de monitoramento vinculada ao processo de fiscalização de ocorrências graves e indisponibilidades prolongadas em usinas de geração de energia elétrica. In Proceedings of the Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
18. ANEEL, Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Disponível online: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel> (acessado em junho de 2023).
19. ANEEL, Planilha de Ocorrências Graves e Indisponibilidades Prolongadas; Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, Brasil, 2023.
20. CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Informações ao mercado - painel de geração. Disponível online: <https://www.ccee.org.br/dados-e-analises/dados-geracao> (acessado em 2023).
21. EPE, Empreendimentos eólicos ao fim da vida útil. 2021.