

NOTA TÉCNICA

TAXAS DE INDISPONIBILIDADE EM PROJETOS FOTOVOLTAICOS

DEZEMBRO DE 2024

■ Colaboradores

NOTA TÉCNICA EPE/DEE/RE/100/2024

Coordenação Geral

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Reinaldo da Cruz Garcia

Coordenação Executiva

Bernardo Folly de Aguiar

Renato Haddad Simões Machado

Coordenação Técnica

Gustavo Pires da Ponte

Equipe Técnica

Bernardo Albuquerque Domingues da Silva (estagiário)

Bruno Faria Cunha

Leonardo Sanches Lima

Rafaela Veiga Pillar

epe



VALOR PÚBLICO

A EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE TEM POR FINALIDADE PRESTAR SERVIÇOS AO MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) NA ÁREA DE ESTUDOS E PESQUISAS DESTINADAS A SUBSIDIAR O PLANEJAMENTO DO SETOR ENERGÉTICO, COBRINDO ENERGIA ELÉTRICA, PETRÓLEO E GÁS NATURAL E SEUS DERIVADOS E BIOCOMBUSTÍVEIS. SOMOS UMA EMPRESA PÚBLICA FEDERAL, DEPENDENTE DO ORÇAMENTO GERAL DA UNIÃO.

A EPE FOI CRIADA COM O OBJETIVO DE RESGATAR A RESPONSABILIDADE CONSTITUCIONAL DO ESTADO NACIONAL EM ASSEGURAR AS BASES PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA DO PAÍS. A PARTIR DE SUA CRIAÇÃO, A ATUAÇÃO DA EPE CONSOLIDOU-SE COMO PARTE FUNDAMENTAL DE UM CICLO DE ATIVIDADES QUE SE INICIA COM AS DEFINIÇÕES DE POLÍTICAS E DIRETRIZES NO ÂMBITO DO CNPE – CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA E DO MME. A PARTIR DESSAS DEFINIÇÕES MATERIALIZAM-SE OS ESTUDOS E AS PESQUISAS QUE IRÃO EFETIVAMENTE ORIENTAR O DESENVOLVIMENTO DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO.

COM ESTA NOTA TÉCNICA A EPE TRAZ TRANSPARÊNCIA E DIMINUI A ASSIMETRIA DE INFORMAÇÕES SOBRE OS AS ESTIMATIVAS DE TAXA DE INDISPONIBILIDADE FORÇADA E PROGRAMADA, AUXILIANDO OS DESENVOLVEDORES A APRIMORAR SEUS DADOS, MELHORANDO OS CÁLCULOS PARA FINS DE AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE PROJETOS E GARANTIA FÍSICA, POR EXEMPLO.

**MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA**



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário-Executivo

Arthur Cerqueira Valério

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Secretário de Energia Elétrica

Gentil Nogueira de Sá Júnior

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis

Pietro Adamo Sampaio Mendes

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Vítor Eduardo de Almeida Saback



Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e

Ambientais

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

Diretor de Estudos do Petróleo, Gás e

Biocombustíveis

Heloísa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

<http://www.epe.gov.br>

Histórico de Revisões

Rev.	Data	Descrição
0	20/12/2024	Publicação Original

■ Sumário

1. Introdução	5
2. Definições	5
3. Objetivos.....	6
4. Revisão da Literatura.....	6
5. Premissas do Estudo.....	9
6. Impacto do TEIF e IP no cálculo e recálculo da Garantia Física.....	9
7. Valores declarados nos Leilões de Energia Nova	10
8. Valores declarados após alteração de características técnicas	13
9. Valores declarados por projetos com vistas à comercialização no ACL	15
10. Considerações Finais	17
Bibliografia.....	18

1. Introdução

As paradas para manutenção, programada ou forçada, afetam a disponibilidade e a geração das usinas fotovoltaicas e, por isso, devem ser bem estimadas desde a etapa de projeto, dado o impacto na estimativa de produção de energia e na receita do empreendimento, o que denota a importância da elaboração de um estudo para mapear os valores adotados nos projetos cadastrados e habilitados pela EPE nos últimos anos, através das estatísticas fornecidas e da revisão de literatura.

Cabe à Empresa de Pesquisa Energética - EPE aplicar as metodologias de cálculo e recálculo de Garantia Física - GF dos empreendimentos fotovoltaicos, estabelecidas nas Portarias MME nº 101, de 22 de março de 2016, e nº 60, de 20 de fevereiro de 2020. Para tal, considerando que os valores de Taxa de Indisponibilidade Forçada - TEIF e Taxa de Indisponibilidade Programada - IP estimados para calcular a GF são necessários, observa-se que algumas precauções devem ser consideradas.

A presente Nota Técnica registra os valores declarados de TEIF e IP pelos desenvolvedores em projetos habilitados tecnicamente pela EPE nos últimos leilões de energia, nos projetos submetidos a revisão de garantia física resultante de alteração de características técnicas após emissão da outorga ou com fins de comercialização em Ambiente de Contratação Livre - ACL. O documento traz ainda uma revisão da literatura, considerando publicações relevantes sobre o tema.

2. Definições

Para fins de aplicação das metodologias de cálculo e recálculo de garantia física de energia, devem ser observadas as definições apresentadas a seguir:

Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada – TEIF

Percentual que reflete a redução na produção de energia devido à ocorrência de falha ou interrupção de emergência, em condições não programadas.

Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada - IP

Percentual que reflete a redução na produção de energia devido a paradas programadas para manutenção.

Convém pontuar que a indisponibilidade de uma usina pode ser medida também em função do tempo de parada para manutenção, como aponta a revisão da literatura (capítulo 4) mas, para fins deste documento e para cálculo de garantia física, considera-se a o percentual da energia que deixa de ser gerada em função das paradas.

Algumas falhas podem afetar apenas parcialmente a geração, sem resultar da parada de toda a usina. Por exemplo, a troca de um módulo fotovoltaico ou de um inversor deixará indisponível apenas o arranjo ou unidade geradora correspondente, enquanto os demais seguem operando. Já a quebra de um sistema de rastreamento (*tracker*), por exemplo, não impede a geração, ainda que reduzida, o que pode eventualmente ser considerado como uma perda. Nesse sentido, a indisponibilidade ocorreria durante o reparo do equipamento. Estes exemplos reforçam a importância de se considerar o TEIF e o IP em função da energia, e não do tempo.

3. Objetivos

Esta Nota Técnica tem como objetivos apresentar e avaliar os indicadores de indisponibilidade forçada e programada declarados pelos desenvolvedores nos projetos participantes dos últimos Leilões de Energia Nova e através dos pedidos de cálculo de GF em função de alteração de características técnicas ou para fins de comercialização no ACL. Busca-se, assim, facilitar o entendimento sobre o que se espera desses valores e permitir uma análise comparativa.

Não se pretende, porém, impor valores ou restringir o entendimento e metodologias dos desenvolvedores. O conhecimento detalhado das características dos projetos como: localização, acessos, infraestrutura disponível, recurso solar, condições climáticas, terreno, características técnicas que podem influenciar na eficiência de geração, plano de manutenção e aspectos socioambientais são de responsabilidade das empresas que respondem pela correta declaração dos valores de TEIF e IP em seus projetos.

4. Revisão da Literatura

Na pesquisa bibliográfica foram encontrados poucos estudos a nível nacional que apresentassem valores observados de indisponibilidade de usinas fotovoltaicas, sendo que alguns faziam referências a documentos da EPE. No contexto internacional há uma vasta literatura sobre boas práticas na manutenção de usinas, visando aumentar a disponibilidade. A seguir são descritos os principais resultados encontrados.



Figura 1 – Exemplo genérico de “curva da banheira”. Fonte: (Neto, Manito, Zilles, & Pinho, 2022)

Abdulla, Sleptchenko, & Nayfeh (2024) fizeram uma revisão da literatura, de 2010 a 2023, sobre operação e manutenção de usinas fotovoltaicas, alertando para a mentalidade “instale e esqueça”, dominante na indústria fotovoltaica, refletindo a prática de manutenções mínimas, restritas à limpeza periódica, por se acreditar na confiabilidade dos componentes, o que acaba levando a falhas inesperadas, perdas na geração e maiores custos. Os autores afirmam que um programa de manutenção bem-sucedido busca minimizar falhas, maximizar a produção e reduzir perdas por meio de intervenções feitas a tempo. No caso das manutenções corretivas, destaca-se a

importância do tempo de resposta, incluindo a identificação da falha, a intervenção e o reparo. Já a manutenção preventiva inclui inspeções programadas, reparos e conformidade com os manuais de operação. Há ainda as manutenções preditivas, que dependem de sensores para aferir a condição do equipamento e da detecção de anomalias a partir de indicadores. Os autores ressaltam que, até recentemente, a avaliação de confiabilidade era baseada em componentes individuais, sobretudo módulos e inversores, mas que o aumento do número de instalações tem ampliado as abordagens para também considerar condições climáticas, programação de manutenções e desempenho do sistema fotovoltaico. Ainda assim, foi identificada uma lacuna na literatura no que diz respeito à otimização das manutenções, que ainda é focada em componentes individuais, limitando uma perspectiva mais abrangente de toda a usina.

Walker (2018) publicou um guia de boas práticas para operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, visando a redução de custos e melhoria da operação e manutenção. Os dados do estudo apontam um possível aumento do Desempenho Global do Sistema (*Performance Ratio*) de 91,7 para 95% com melhorias das estratégias de O&M. Entre os fatores a se considerar há o tipo de sistema (inversores *string* ou centrais, por exemplo), o terreno, e as condições ambientais (umidade, vento, neve, alagamentos, tempestades, etc). Os sistemas de rastreamento (*trackers*), por sua complexidade e partes móveis, estão mais sujeitos a falhas. Uma forma de aumentar a disponibilidade da usina é por meio do estoque estratégico de peças sobressalentes, reduzindo o tempo de parada. O documento define ainda a **disponibilidade** como o estado em que a unidade pode prover o serviço especificado, independente se está ativa ou do nível de capacidade, e pode ser medida em relação ao tempo ou à energia produzida (em relação à esperada); já **indisponibilidade** é quando o equipamento não é capaz de operar em capacidade total devido a falhas, ineficiência, restrições externas, testes ou manutenção.

Chen et al. (2023) detalham e propõem uma estratégia de manutenção preditiva e substituição de componentes baseada em confiabilidade, definindo e otimizando os intervalos de manutenção de forma não periódica, utilizando a idade de serviço e taxa de falhas como base, enquanto custo e disponibilidade como objetivos da função de otimização, e indicam vantagem em relação aos métodos com períodos definidos entre intervenções.

Rasmussen & Browne (2024) por meio de análises estatísticas dos dados históricos de indisponibilidade em (kWhAnalytics, 2022), apontam para uma evidente discrepância entre os valores declarados em projetos de usinas fotovoltaicas nos EUA e resultados de medições em operação, resultando em geração entre 7 e 13% abaixo da esperada, em relação ao valor de 99% de disponibilidade historicamente adotado como usual. O ponto destacado no estudo aponta para a variabilidade do recurso solar, bem como para incertezas das premissas utilizadas no modelo de previsão, que resultam em valores não determinísticos, e aponta que a correta representação para a situação configura uma distribuição de probabilidades, que por sua vez é caracterizada por assimetria, com leve tendência à esquerda de modo que o sistema atinja sua produção esperada de energia por menos de 50% do tempo considerado no intervalo medido.

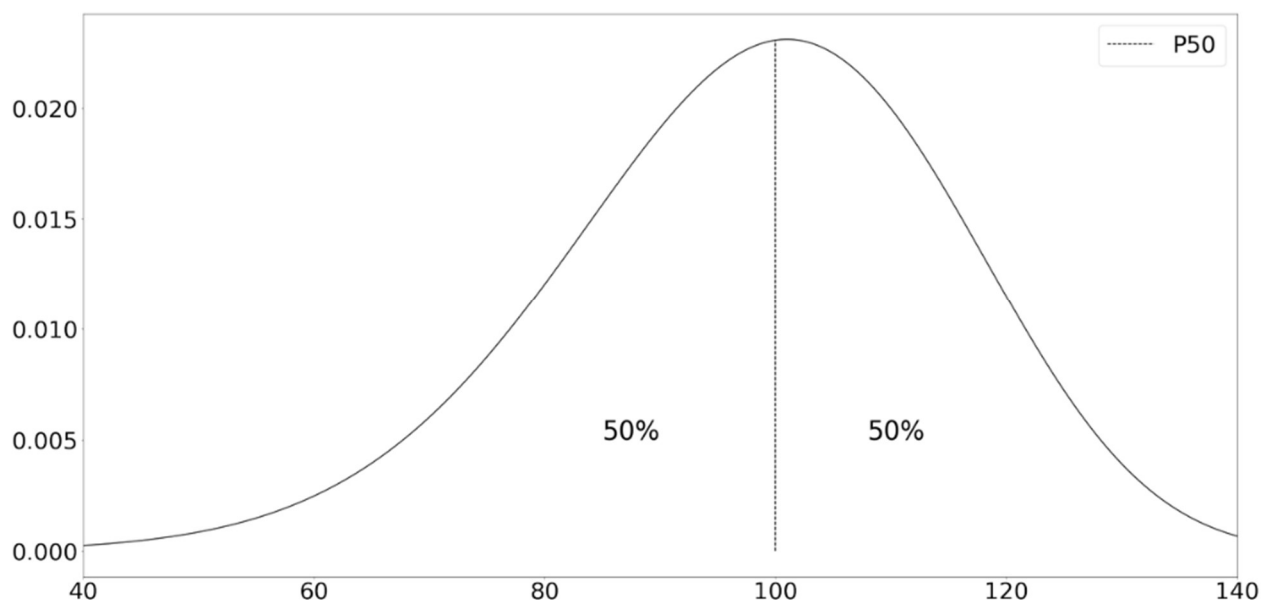


Figura 2 – Distribuição de probabilidades utilizada na modelagem de geração de energia em sistemas fotovoltaicos. Fonte: (Rasmussen & Browne, 2024)

Dessa maneira, os autores ressaltam a criticidade da representação, apontando o risco em não produzir o montante de energia inicialmente esperado, diminuindo a atratividade do investimento e, por este motivo, destacam a importância da precisão acerca dos valores propostos. É também valorizada a importância de padronização na definição de disponibilidade, que pode variar incluindo ou não fatores adversos de interesse específico para diferentes envolvidos, sejam eles fabricantes, instaladores ou investidores. Diferentes metodologias são propostas no intuito de padronizar as definições de disponibilidade. A IEC *Technical Specification* 63019 (IEC, 2019) propõe uma metodologia para padronização baseada em energia, enquanto (Klise & Balfour, 2015) utilizam os períodos de indisponibilidade, destacando a vantagem desta, por permitir uma comparação direta entre sistemas quaisquer, sem a variação inerente à modelagem probabilística utilizada em cada um deles.

Neto et al. (2022) contribuem com uma análise sistemática do mercado fotovoltaico centralizado brasileiro e referenciada em experiências internacionais. Detalham uma proposta de avaliação da indisponibilidade equivalente, caracterizando subsistemas e suas respectivas contribuições na geração de energia com base nos tempos médios de parada (MTTR) e intervalos de operação ativa entre falhas (MTTF), levando em consideração o impacto probabilístico de cada subsistema na geração da usina, servindo como referência bibliográfica aos empreendedores e reforçando a importância da discussão acerca do tema.

Neves (2022) traz um detalhamento do impacto financeiro da indisponibilidade em sistemas de geração fotovoltaica, utilizando como objeto do estudo uma usina na região do planalto central brasileiro, onde analisa a criticidade de cada nível do sistema no retorno do investimento, baseado na correlação de dependência entre sistemas, subsistemas e componentes, apontando a importância de considerar a indisponibilidade durante a fase de análise econômica do empreendimento, levando em conta as rotinas de operação e manutenção da usina. O autor destaca e evidencia a importância do cálculo diferenciado para eventos dentro e fora do período de garantia dos componentes, bem como a relevância da contratação de seguro da operação.

5. Premissas do Estudo

São objetos deste estudo os empreendimentos fotovoltaicos cadastrados e habilitados para participação nos Leilões de Energia Nova, entre os anos de 2017 e 2022, cujos dados foram inseridos no Sistema de Acompanhamento de Empreendimentos de Geração de Energia – AEGE, disponibilizado pela EPE, além dos projetos outorgados que solicitaram revisão de garantia física motivada por alteração de características técnicas aprovadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e de empreendimentos que objetivaram comercializar energia no mercado livre e solicitaram cálculo de garantia física a partir do ano de 2020.

O Leilão de Energia Nova é a modalidade de leilão que visa atender às necessidades de mercado das distribuidoras, mediante contratação antecipada de 3 a 6 anos (A-3, A-4, A-5 ou A-6) em relação à previsão de entrada em operação das usinas. Para este estudo, foram consideradas as últimas versões de todos os empreendimentos cadastrados e habilitados tecnicamente pela (EPE, 2021) para participação nos LENs A-4/2017, A-4/2018, A-4/2019, A-6/2019, A-4/2020- N, A-3/2021-N, A-4/2021-N, A-5/2021-N, A-4/2022 e A-5/2022, sem repetição de projetos.

Os valores considerados neste documento baseiam-se no universo de 1.616 empreendimentos fotovoltaicos habilitados tecnicamente pela EPE nas suas mais recentes versões de cadastramento no Sistema AEGE, abrangendo ao todo 13 estados, além de 65 empreendimentos vendedores em LEN que solicitaram recálculo do montante de garantia física entre 2020 e 2024, por motivo de alteração de características técnicas após a publicação da Portaria MME nº 60/2020, a qual estabeleceu novos procedimentos e metodologias para revisão dos montantes de GF para empreendimentos fotovoltaicos. Por fim, são também considerados 196 projetos que objetivaram comercializar energia no ambiente de contratação livre.

6. Impacto do TEIF e IP no cálculo e recálculo da Garantia Física

A garantia física de um empreendimento de geração é definida como a máxima quantidade de energia que este pode comercializar por meio de contratos no Sistema Interligado Nacional - SIN, segundo o Decreto nº 5.163/2004.

Como mostra a Figura 3, o cálculo da garantia física é realizado considerando o valor de produção de energia certificada, referente ao valor de energia anual com uma probabilidade de ocorrência igual ou maior a cinquenta por cento, constante da Certificação de Dados Solarimétricos e de Produção Anual de Energia (P50ac); as taxas equivalentes de Indisponibilidade Forçada – TEIF e Indisponibilidade Programada – IP; além da estimativa anual de consumo interno, somada à estimativa de perdas elétricas até o ponto de medição individual da usina (ΔP). Os índices de TEIF e IP são adotados a critério do empreendedor sem necessariamente constar no documento de certificação.

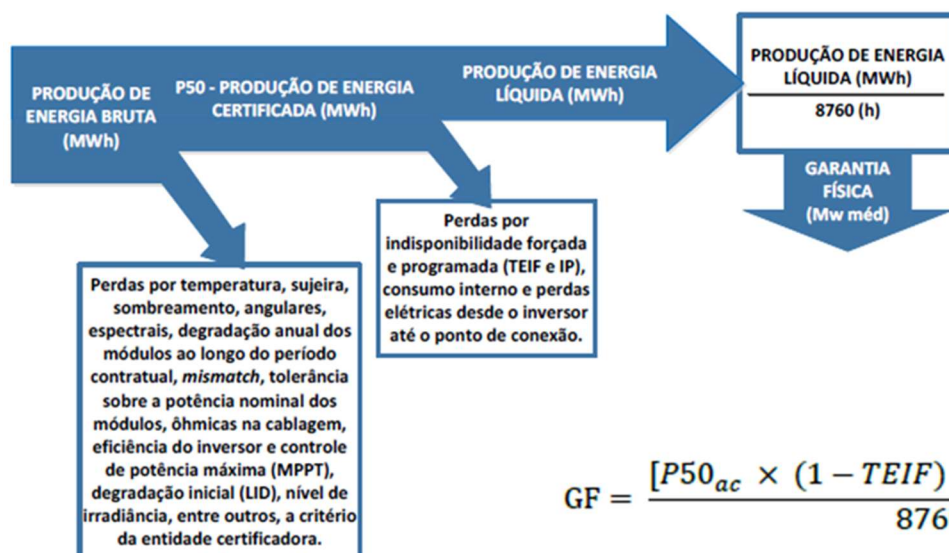


Figura 3 - Decomposição do montante de energia bruta até o cálculo de garantia física. Fonte: (EPE, 2016)

7. Valores declarados nos Leilões de Energia Nova

A declaração dos valores de TEIF e IP utilizados para cálculo de GF dos empreendimentos fotovoltaicos é realizada diretamente nos campos do Sistema AEGE. Esses valores não fazem parte da Certificação de Produção Anual de Energia, documento exigido para fins de habilitação técnica no processo de análise de projetos nos leilões de energia. As justificativas e metodologias para estimativa dos valores de indisponibilidade cabem aos empreendedores, sem necessariamente haver uniformidade de conceitos e entendimentos, podendo resultar em imprecisão e subjetividade nas atribuições desses índices, impactando de forma direta o cálculo do montante de GF da usina, e consequentemente, a expectativa de receita do projeto.

A Figura 4 relaciona as taxas de indisponibilidade com o percentual acumulado de projetos, considerando a última versão de todos os 1.616 empreendimentos habilitados nos Leilões de Energia Nova entre os anos de 2017 e 2022. Para o período considerado, 99,8% dos projetos atribuíram valores de TEIF até o limite de 2%. Entre aqueles que consideraram valores de TEIF em até 1,5%, podem ser incluídos 94,8% dos projetos. Da mesma forma, para valores de IP, 98,7% dos projetos assumiram valores até o limite de 1%, havendo ainda uma parcela significativa de projetos com valores nulos ou próximos de zero, o que por vezes é justificado pela programação de manutenções noturnas, com pouco ou nenhum impacto na geração de energia. Nesse caso, os índices médios observados para TEIF e IP são 0,93% e 0,47% respectivamente.

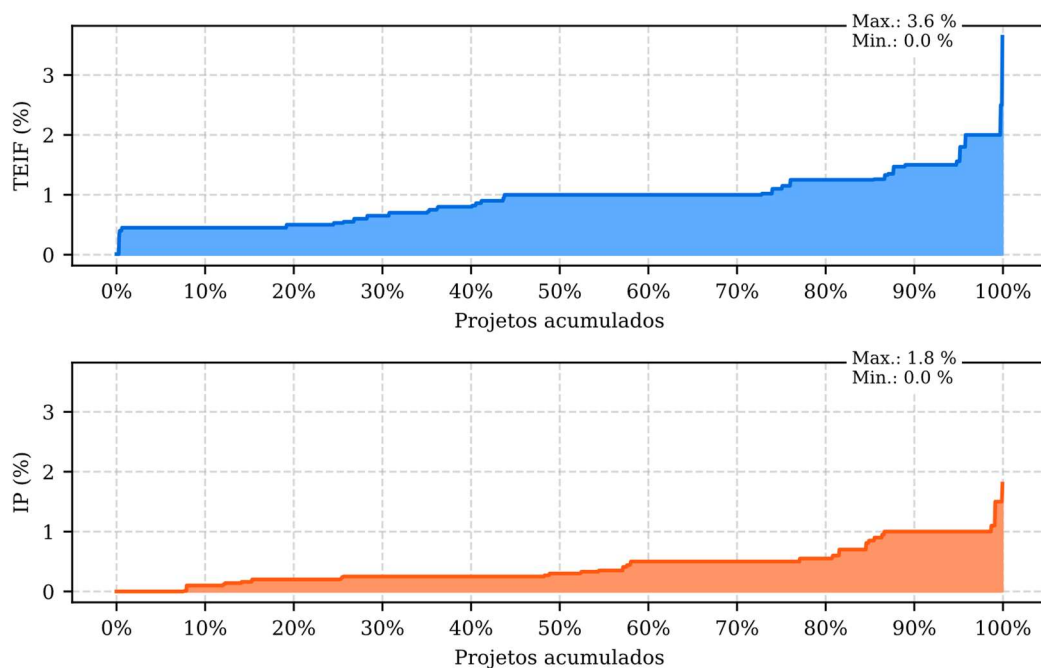


Figura 4 - Percentual acumulado de indisponibilidades em empreendimentos habilitados nos LENs entre 2017 e 2022

A Figura 5 mostra a média das indisponibilidades totais dos projetos cadastrados e habilitados pela EPE nos leilões de energia nova, por ano, além da quantidade de projetos de acordo com o ano de sua última versão habilitada. Como esperado, a maior quantidade de projetos concentra-se em 2022, devido principalmente ao acúmulo de projetos reaproveitados de leilões em anos anteriores e da inserção de projetos novos, o que explica a diferença entre os anos 2021 e 2022 no total de empreendimentos. Os valores médios concentraram-se entre 1,28% e 1,57%, ao longo do período analisado.

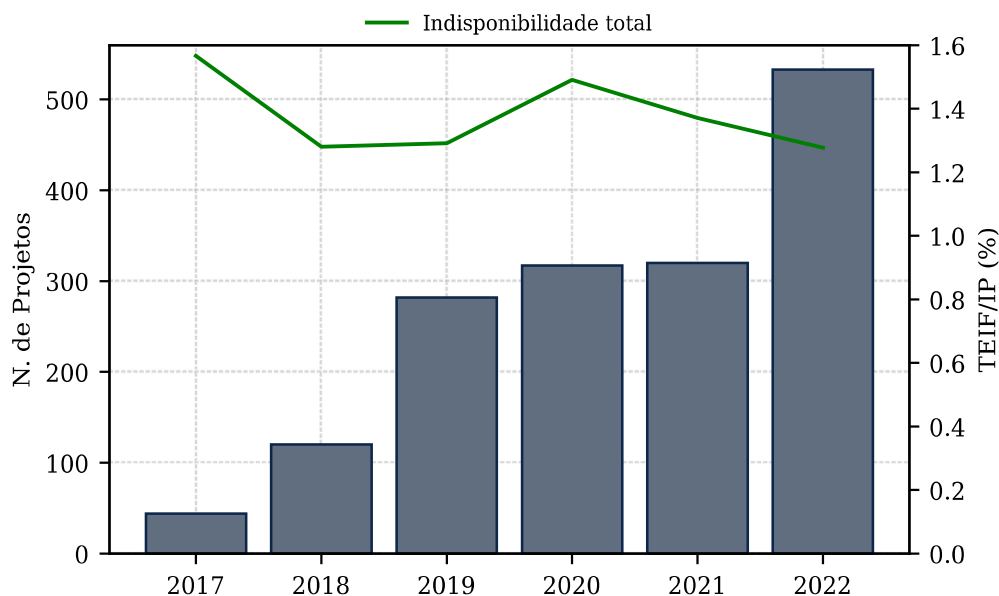


Figura 5 – Quantidade de projetos e valores médios das indisponibilidades por ano para projetos habilitados nos LENs

A Figura 6, em formato boxplot, mostra que a média de TEIF entre 2017 e 2022 apresentou seu menor no último ano (0,88%), com significativa redução em relação ao ano de 2021 (1,00%),

proporcionada pela entrada de novos projetos com valores de TEIF mais baixos que o habitual. Para IP houve mais oscilações, com o ano de 2022 apresentando média de 0,40%, ligeiramente superior aos anos anteriores. Conforme apresentado adiante, a redução nos valores médios de TEIF e elevação nos valores médios de IP são também observadas nos projetos com alteração de características técnicas avaliados entre 2020 e 2024, consolidando tendências desses índices no tempo.

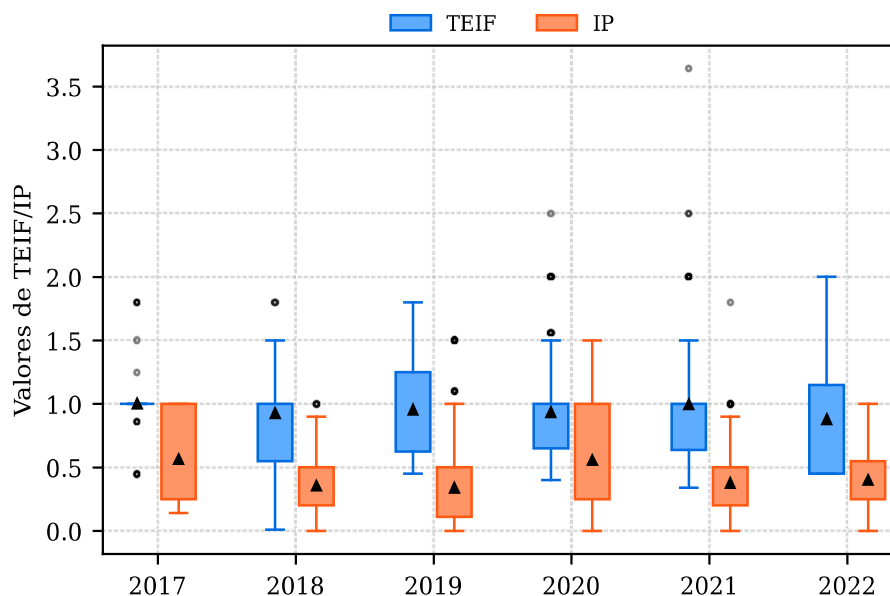


Figura 6 – Diagramas de caixa dos valores de TEIF e IP por ano para em projetos habilitados nos LENs

A Figura 7 apresenta as principais faixas de valores de TEIF e IP adotados nos projetos habilitados nos LENs entre 2017 e 2022. Para TEIF, os valores mais frequentes estão contidos nos intervalos entre 0,40% e 0,60%, com maior contribuição de empreendimentos com índice em 0,45% (300 projetos), e entre 1,00% e 1,20%, com a quase totalidade de valores concentrada em 1,00% (469 projetos). Juntos, esses dois principais índices representam, aproximadamente, 50% de todas as entradas referentes a situações de indisponibilidade forçada. Para IP, os valores mais frequentes referem-se a 0,25%, 0,50% e 1,00%, que somados representam mais da metade dos valores observados para esta indisponibilidade.

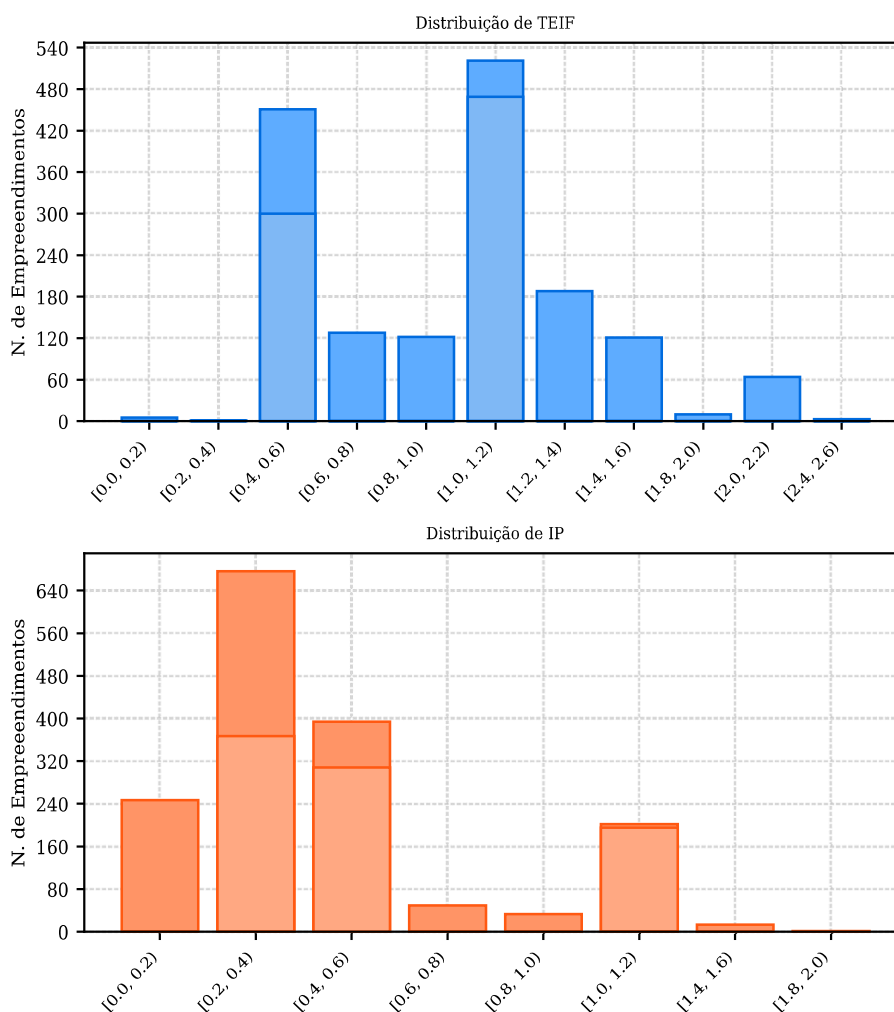


Figura 7 - Faixa de valores de TEIF e IP em empreendimentos habilitados nos LENs entre 2017 e 2022

8. Valores declarados após alteração de características técnicas

De acordo com o artigo 8º - A da Portaria MME nº 514, de 2 de setembro de 2011, os empreendedores cujos projetos tenham sido habilitados tecnicamente pela EPE e que venderam energia em leilões de energia nova ou de fontes alternativas podem solicitar alterações nas características técnicas de suas usinas à ANEEL, após a emissão da outorga.

A Portaria MME nº 60/2020, artigo 3º, estabelece que a revisão dos montantes de garantia física de energia seja realizada na ocorrência de alterações de características técnicas que tenham sido autorizadas pela ANEEL, com consequente alteração da expectativa de produção de energia elétrica. Conforme parágrafo 1º deste artigo, o cálculo é realizado pela EPE, de ofício, em caso de aprovação da alteração de características técnicas. Nesse contexto, foram avaliados os empreendimentos submetidos às revisões de garantia física resultantes de alterações de características técnicas aprovadas a partir da publicação desta Portaria.

A Figura 8 apresenta os valores declarados de TEIF e IP para 65 empreendimentos fotovoltaicos que venderam energia em leilões de energia nova e solicitaram alteração de características técnicas em seus projetos. Nesse caso, os índices médios observados para TEIF e IP

são 0,68% e 0,35%, respectivamente. Na fase de habilitação técnica para os leilões, esses mesmos empreendimentos apresentaram médias de 0,75% e 0,26%, para TEIF e IP, respectivamente. Em geral, observou-se redução dos valores de TEIF e, em sentido oposto, acréscimo nos valores de IP, com somatório das indisponibilidades ainda próximo de 1%.

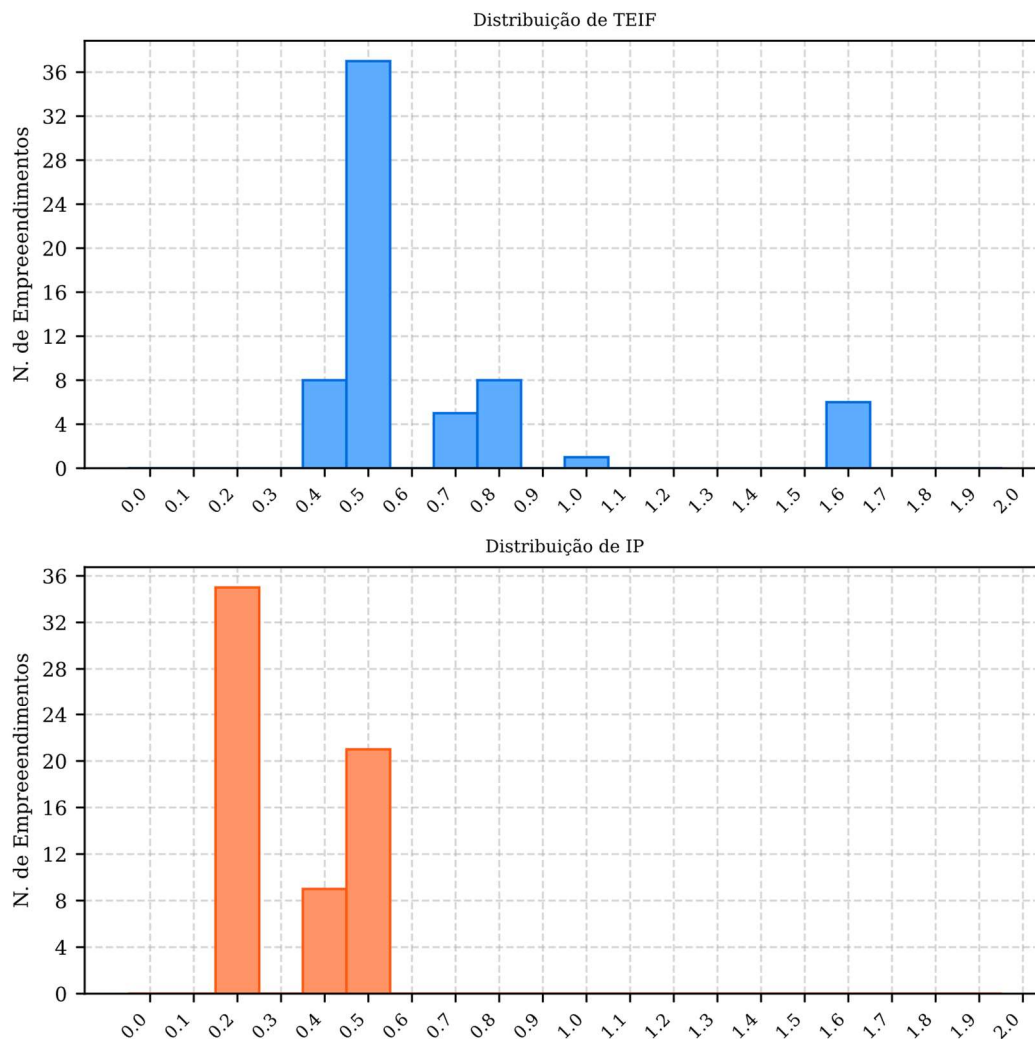


Figura 8 - Distribuição de TEIF e IP em empreendimentos com alteração de características técnicas

A Figura 9 compara a taxa de indisponibilidade total para empreendimentos fotovoltaicos antes e após a realização dos leilões, este último caso contemplado com alterações de características técnicas no projeto. Cerca de 66% dos projetos após alterações de características técnicas passaram a declarar taxa de indisponibilidade total igual 1,0%, quando anteriormente respondiam por 20,1%. Neste caso, fica destacada a tendência dos empreendedores em reduzir os valores inicialmente estipulados para o conjunto das indisponibilidades, o que pode ser explicado pelo maior tempo para amadurecimento dos projetos e na adoção de equipamentos com maior durabilidade ou menor necessidade de manutenção.

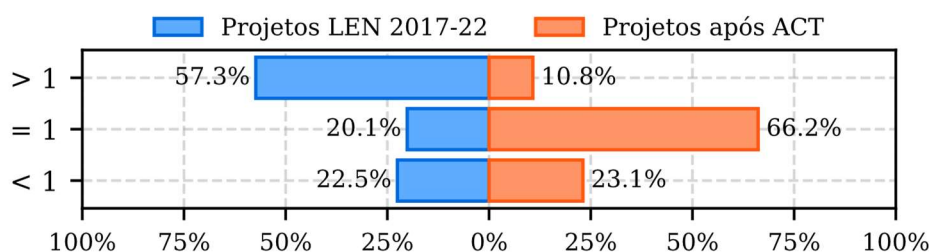


Figura 9 – Quantidade de projetos por faixa de valores de Indisponibilidade Total

Por outro lado, ao analisar os resultados de revisão de garantia física por geração verificada de 2023, registrada na Nota Técnica EPE-DEE-NT-060/2023-r0 (EPE, 2023), verifica-se que a ampla maioria das usinas elegíveis à revisão teve geração abaixo do esperado, o que pode decorrer, dentre vários motivos, da imprecisão da estimativa de produção na etapa de projeto e de indisponibilidades acima do previsto. Devido às especificidades do processo de revisão, como a complementação de registros faltantes com base na garantia física sazonalizada, até o número mínimo de 48 registros, e a faixa de tolerância de 95% em relação à garantia física vigente, aproximadamente 45% das usinas (28 das 62 usinas elegíveis à revisão) tiveram redução de garantia física e aproximadamente 53% das usinas (33 das 62 usinas elegíveis à revisão) não tiveram garantia física revista por estarem dentro das tolerâncias de revisão, mesmo que com geração abaixo do esperado. Essa questão poderá ser discutida em maiores detalhes em outros documentos oportunamente.

Uma análise primordial no sentido de aferir os valores declarados durante a fase de projeto, cálculo e recálculo de garantia física seria possível com dados provenientes do Operador Nacional do Sistema – ONS, que já disponibiliza valores de referência e valores declarados para as usinas hidrelétricas em (ONS, 2023) e atualmente trabalha para expandir a disponibilização também para outras fontes.

9. Valores declarados por projetos com vistas à comercialização no ACL

Além dos projetos habilitados para participação nos leilões de energia nova e daqueles que venderam energia e solicitaram alterações em suas características técnicas após emissão da outorga, foram avaliados outros 196 projetos que, a partir de 2020, solicitaram o cálculo de garantia física ao MME com o intuito de comercialização de energia no Ambiente de Contratação Livre - ACL. Nesse caso, os índices médios observados para TEIF e IP são 0,63% e 0,31%, respectivamente. A Figura 10 apresenta os valores médios declarados das indisponibilidades totais para estes projetos. Os valores médios concentraram-se entre 0,70% e 1,09%, ao longo do período considerado.

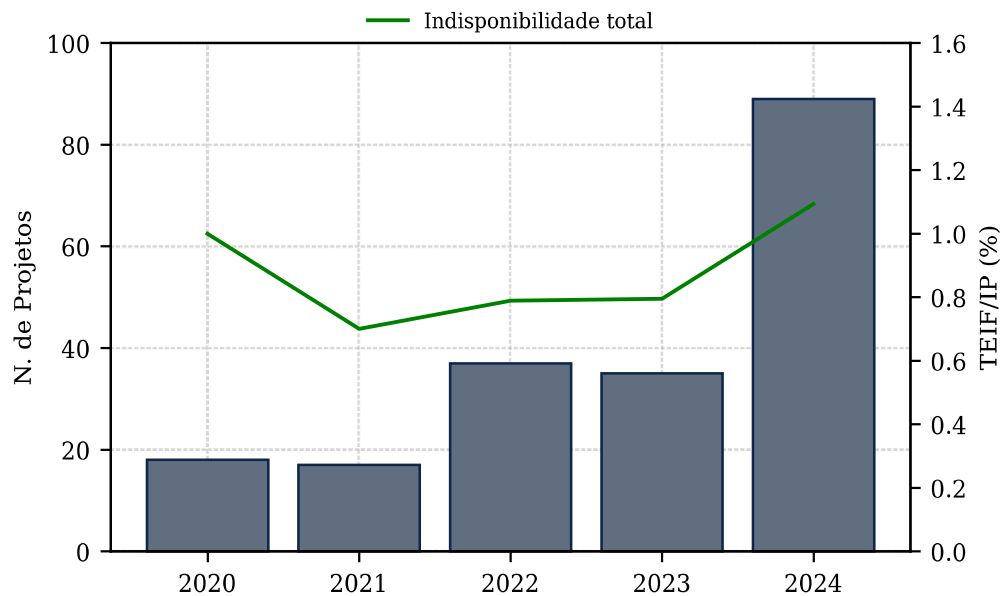


Figura 10 – Quantidade de projetos do ACL e valores médios das indisponibilidades por ano

A Figura 11, em formato *boxplot*, mostra que a média de TEIF entre 2020 e 2024 se manteve dentro de faixa de 0,45% a 0,75%, com o ano de 2024 correspondendo ao maior valor médio (0,75%). Para IP houve menos variação, com os valores médios entre 0,25% e 0,34%. Também para este caso, o ano de 2024 apresentou a maior média do período (0,34%).

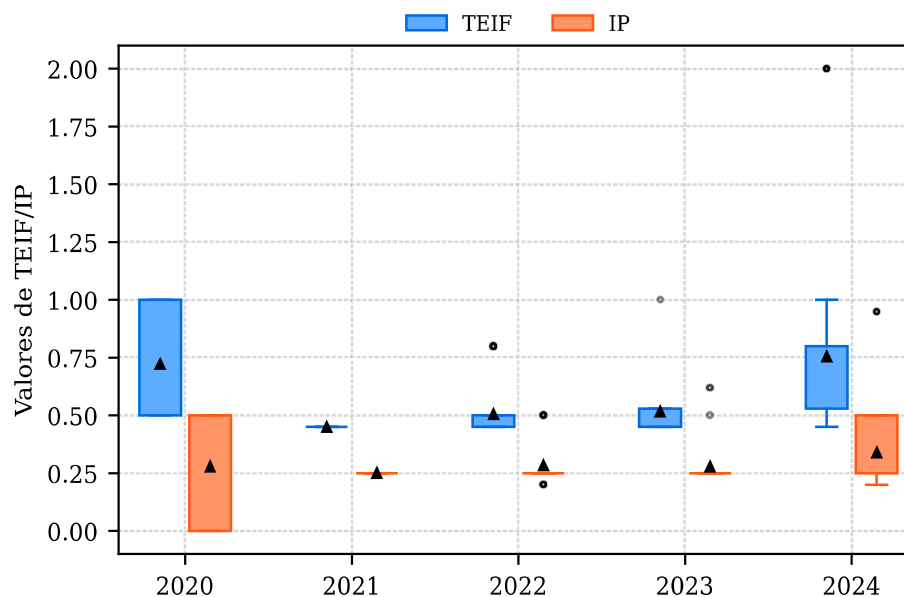


Figura 11 – Diagramas de caixa dos valores de TEIF e IP por ano para projetos do ACL

10. Considerações Finais

A estimativa da perda de produção por indisponibilidades forçada (TEIF) e programada (IP) tem impacto direto na garantia física das usinas fotovoltaicas e no retorno econômico do empreendimento, sendo fundamental uma avaliação adequada ainda na etapa de projeto.

A EPE avalia o montante equivalente de energia não produzida devido aos diversos fatores de indisponibilidade, mas não detalha as causas e correlações específicas inerentes à operação e ao projeto da usina, partindo do entendimento que cada projeto possui características técnicas próprias, e é de responsabilidade do empreendedor dominar as causas, comportamentos e efeitos das perdas na geração equivalente de energia. Desse modo, mantém a abertura necessária a englobar diferentes projetos, tecnologias e modelos operacionais, mas esclarece e reforça a importância em compreender os parâmetros necessários para bem representar as indisponibilidades desde a fase de projeto, até a operação.

Observa-se que, até que se tenham registros mensais de medição de energia elétrica suficientes para aplicação do disposto no inciso II do art. 1º da Portaria MME nº 60/2020 e seja efetivada uma revisão de garantia física com base na geração verificada, considerando assim as indisponibilidades ocorridas refletidas na energia observada, ficam atrelados ao empreendimento fotovoltaico os valores de indisponibilidade declarados para fins de cálculo ou revisão de garantia física com base em alterações de características técnicas.

A revisão da literatura, embora evidencie boas práticas de manutenção e problemas comuns na operação de usinas fotovoltaicas, não traz referências de valores de indisponibilidades forçada e programada.

Ao analisar os dados declarados pelos empreendedores para fins de participação nos leilões de energia encontra-se uma concentração de valores de TEIF entre 0,5% e 1%, enquanto os valores de mais frequentes de IP são de até 0,5%. Em projetos do ACL, a concentração é ainda maior dentro dessas faixas. Já na etapa de alteração de características técnicas, após o leilão, nota-se uma tendência dos desenvolvedores em reduzir o TEIF. Porém, no processo de revisão de garantia física percebe-se que a maioria teve geração verificada abaixo do esperado, o que pode ser explicado por inúmeros fatores, inclusive a possível indisponibilidade acima do previsto.

Vale ressaltar também, o percentual relativamente elevado de empreendedores que trazem valores 0 (zero) para indisponibilidade programada, valendo-se da hipótese de realização dos serviços de manutenção programada durante o período noturno, quando de fato não existe geração de energia. No entanto, são conhecidas as situações em que o reparo de componentes e sistemas específicos pode levar diversos dias, devido à sua complexidade ou disponibilidade, de modo que se espera índices minimamente representativos da programação de paradas e seus respectivos impactos na geração.

Destaca-se a impossibilidade em se definir valores mínimos ou de referência para as taxas de indisponibilidade forçada e programada, uma vez que estas dependem das características técnicas de cada projeto, da estratégia de manutenção da usina, entre outros fatores. Busca-se com este documento evidenciar e analisar os valores comumente encontrados, auxiliando os desenvolvedores a realizar estimativas mais precisas.

- Abdulla, H., Sleptchenko, A., & Nayfeh, A. (2024). Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114342>
- Chen, W., Li, M., Pei, T., Sun, C., & Lei, H. (2023). *Reliability-Based Model for Incomplete Preventive Replacement Maintenance of Photovoltaic Power Systems*. doi:<https://doi.org/10.32604/ee.2023.042812>
- EPE. (2016). *Considerações sobre as taxas de indisponibilidade para cálculo e recálculo de Garantia Física de Projetos Eólicos*.
- EPE. (2021). *Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica*.
- EPE. (2023). *Cálculo e Revisão de Garantia Física de Energia de Empreendimentos Fotovoltaicos com base na Geração de Energia Elétrica Verificada (EPE-DEE-NT-060/2023-r0)*. Fonte: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-523/topico-579/EPE_DEE_RE_060_2023_r0_GV_UFV.pdf
- IEC. (2019). *IEC TS 63019*. Genebra: IEC.
- Klise, G. T., & Balfour, J. R. (2015). *A Best Practice for Developing*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- kWhAnalytics. (2022). *Solar Generation Index*. kWhAnalytics.
- Neto, J. C., Manito, A. R., Zilles, R., & Pinho, J. T. (2022). Proposta de metodologia para avaliação da taxa equivalente de indisponibilidade forçada para sistemas fotovoltaicos. *IX Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Florianópolis. doi:<https://doi.org/10.59627/cbens.2022.1063>
- Neves, D. F. (2022). *Análise do impacto financeiro da indisponibilidade em sistemas fotovoltaicos*. Universidade de São Paulo , Escola Politécnica.
- ONS. (2023). *Relatório de análise estatística de indisponibilidade programadas e forçadas - 2023*.
- Rasmussen, H., & Browne, B. (2024). *Bringing solar availability assumptions back down to earth: the case for adjusting to 97%*. kWhanalytics.
- Walker, H. (2018). *Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems; 3rd Edition*. NREL. doi:<https://doi.org/10.2172/1489002>