

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

LUCAS NEVES GOBBO

**AVALIAÇÃO DAS ESCALAS DE LIMPEZA DOS MÓDULOS
DE UMA USINA FOTOVOLTAICA LOCALIZADA EM
GOIÂNIA EMPREGANDO SUA TAXA DE DESEMPENHO**

VITÓRIA
2022

LUCAS NEVES GOBBO

**AVALIAÇÃO DAS ESCALAS DE LIMPEZA DOS MÓDULOS DE UMA
USINA FOTOVOLTAICA LOCALIZADA EM GOIÂNIA
EMPREGANDO SUA TAXA DE DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Coorientador: Bel. Daniel Campos Pompermayer

VITÓRIA
2022

LUCAS NEVES GOBBO

**AVALIAÇÃO DAS ESCALAS DE LIMPEZA DOS MÓDULOS DE UMA
USINA FOTOVOLTAICA LOCALIZADA EM GOIÂNIA
EMPREGANDO SUA TAXA DE DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica do Centro
Tecnológico da Universidade
Federal do Espírito Santo, como
requisito parcial para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Aprovada em 29 de março de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:


Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
govbr DANIEL CAMPOS POMPERMSYER
BRAS: 03/94/2022 00013949000
POR: 0304 em 03/04/2022 09:03:03

Bel. Daniel Campos Pompermsyer
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Documento assinado digitalmente
govbr PAULO JOSÉ MELLO MENEGAZ
BRAS: 03/94/2022 00013949000
POR: 0304 em 03/04/2022 09:03:03

Dr. Paulo José Mello Menegaz
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador


Eng. Carlos Felipe da Cunha Faria
AEVO Solar Service
Examinador

Aos meus avós e meus pais. Obrigado por acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós, que foram pessoas que me apoiaram desde sempre e fizeram o máximo possível para me ensinar a ser uma pessoa humilde e simples. Eles são meus exemplos de vida. Agradeço aos meus pais por estarem comigo nesta caminhada e por garantirem o suporte de ensino que precisei nessa jornada. Agradeço à minha namorada por me apoiar e por compreender a falta de tempo disponível.

Agradeço à professora Jussara e ao meu coorientador Daniel por me apoiarem neste grande projeto e por todo suporte dado.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da AEVO Solar, que contribuíram na minha formação profissional durante a fase final do meu curso. Agradeço, principalmente, ao Café, por todo o ensinamento compartilhado e a oportunidade de aprender cada dia mais sobre a energia solar.

Agradeço ao Instituto Federal do Espírito Santo e à Universidade Federal do Espírito Santo por me proporcionarem um ensino público de qualidade e excelência.

E, por fim, agradeço aos meus amigos que compartilharam comigo os momentos bons e ruins da vida, que sempre me apoiaram e que são pessoas com quem eu posso contar. A presença de vocês na minha vida a torna mais fácil e feliz.

RESUMO

A geração de energia elétrica, tem sido alvo de debates em todo o mundo devido ao fato de as matrizes energéticas tradicionalmente utilizadas apresentarem um nível de agressividade preocupante ao meio ambiente. Tal fato, favoreceu a utilização de energias alternativas. A energia fotovoltaica é apresentada como uma possível solução para esse problema, já que é uma tecnologia que utiliza a energia oriunda do sol, ou seja, é uma fonte energética inesgotável, além de ser menos agressiva ao meio ambiente. Apesar de tamanhas vantagens, usinas fotovoltaicas apresentam perdas que devem ser levadas em consideração. Entre elas, encontra-se a perda de eficiência causada pela sujidade. A sujidade caracteriza-se pela deposição de partículas sólidas na superfície dos módulos fotovoltaicos de forma a diminuir a incidência da radiação solar, reduzindo a geração de energia. Utilizando a Taxa de Desempenho, um indicador que normaliza os valores de geração com a irradiância medida no plano do módulo fotovoltaico, encontra-se a função que representa a perda de eficiência de um sistema devido aos dias sem limpar a usina. Conhecendo o custo da lavagem, encontra-se um modelo matemático para otimização do intervalo de tempo entre as limpezas de módulos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia solar. Taxa de Desempenho. Otimização. Sujidade.

ABSTRACT

The generation of electric energy has been the subject of debates around the world due to the fact that the energy matrices traditionally used present a worrying level of aggressiveness to the environment. This fact favored the use of alternative energies. Photovoltaic energy is presented as a possible solution to this problem, since it is a technology that uses energy from the sun, that is, it is an inexhaustible energy source, in addition to possibly being less aggressive to the environment. Despite such advantages, photovoltaic plants have losses that must be taken into account. Among them is the loss of efficiency caused by dirt. Dirt is characterized by the deposition of solid particles on the surface of photovoltaic modules in order to reduce the incidence of solar radiation, reducing energy generation. Using the Performance Ratio, an indicator that normalizes the generation values with the irradiance measured in the photovoltaic module plane, there is a function that represents the loss of efficiency of a system with the days without cleaning the plant. Knowing the cost of washing, a mathematical model is found to optimize the time interval between cleaning of photovoltaic modules.

Keywords: Solar energy. Performance Ratio. Optimization. Dirt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento de uma usina fotovoltaica	19
Figura 2 – Módulos fotovoltaicos com sujeira não homogênea	22
Figura 3 – Curvas I-V de um módulo limpo (azul) e um módulo com sujeira não homogênea (laranja).....	23
Figura 4 – Área sob a curva normal entre min e max.....	24
Figura 5 – Taxa de desempenho do sistema fotovoltaico entre julho de 2020 até dezembro de 2021	34
Figura 6 – Taxa de desempenho do sistema fotovoltaico com filtro aplicado	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Irradiância solar - célula de referência suja(G_{DC}) e limpa(G_{CC}).	22
Gráfico 2 – Box Plot.....	24
Gráfico 3 – Energia (azul), irradiação (amarelo) e temperatura (laranja) da usina fotovoltaica de Goiânia.....	26
Gráfico 4 – Comportamento da taxa de desempenho ao longo do experimento mental para determinação da equação da perda de energia.....	30
Gráfico 5 – Primeiro intervalo entre limpezas.....	36
Gráfico 6 – Segundo intervalo entre limpezas.....	37
Gráfico 7 - Terceiro intervalo entre limpezas.....	37
Gráfico 8 - Quarto intervalo entre limpezas	38
Gráfico 9 – Quinto intervalo entre limpezas	38
Gráfico 10 – Segundo intervalo entre limpezas com período de 60 dias.	39
Gráfico 11 – Taxa de desempenho média do sistema	39
Gráfico 12 – Custo de operação em função do número de dias entre limpezas.	46
Gráfico 13 – Comparação entre os custos de operação das limpezas realizadas na usina e o custo ótimo.	46
Gráfico 14 – Comparação entre os custos de operação ótimo e de Kalogirou, Agathokleous e Panayiotou (2013).	47
Gráfico 15 – Comparação entre os custos de operação de limpezas ótimo e caso a perda alcance 5% em relação ao módulo limpo	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de desempenho em cada uma das cinco observações.....	36
Tabela 2 - Energia total perdida nos intervalos de n.	40
Tabela 2 - Energia total perdida nos intervalos de n.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 2 - Energia total perdida nos intervalos de n.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3 – Valor da Energia Perdida em Reais	42
Tabela 3 – Valor da Energia Perdida em Reais	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4 – Valor total do custo de lavagem com a perda de energia.	44
Tabela 4 – Valor total do custo de lavagem com a perda de energia.	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Limpezas realizadas na usina fotovoltaica de Goiânia entre o período de 1º de agosto de 2020 à 31 de dezembro de 2021.....	28
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
FV	Fotovoltaica
GW	Gigawatt
h	Horas
kW	QuiloWatt
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
m ²	Metro ao quadrado
O&M	Operação e Manutenção
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TD	Taxa de desempenho
W	Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

E_t	Energia gerada em um intervalo de tempo t
G	Irradiação utilizada no STC
P_o	Potência total dos módulos fotovoltaicos
H_t	Irradiação incidente em um intervalo de tempo t
$T_{cell_{stc}}$	Temperatura utilizada no STC
T_{cell_t}	Temperatura do módulo em um intervalo de tempo t
t	Instante de tempo
$S(i)$	Energia em um instante i
$S_{teorica}(i)$	Energia teórica em um instante i
$S_{loss}(i)$	Energia perdida em um instante i
$R\$_{S_{loss}}$	Valor monetário da energia perdida
TE	Tarifa de energia elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	USINA FOTOVOLTAICA	18
2.2	TAXA DE DESEMPENHO.....	20
2.3	SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	21
2.4	FILTRAGEM DE PONTOS EXTERIORES	23
3	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO.....	25
3.1	CÁLCULO DA TD ENTRE LIMPEZAS DA USINA FOTOVOLTAICA	27
3.2	DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE TD E TEMPO SEM LIMPAR A USINA	28
3.3	CÁLCULO DO CUSTO DA PERDA DE ENERGIA CAUSADA PELA REDUÇÃO DA TD_0	29
3.4	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA A ESCALA DE LIMPEZA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	TAXA DE DESEMPENHO ENTRE LIMPEZAS DA USINA FOTOVOLTAICA ..	34
4.2	DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE TD E TEMPO SEM LIMPAR A USINA	39
4.3	CUSTO DA PERDA DE ENERGIA CAUSA DA PELA REDUÇÃO DA TD.....	40
4.4	INTERVALO ÓTIMO ENTRE LAVAGENS.....	43
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS DE LIMPEZAS	46
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A partir da segunda Revolução Industrial, a energia elétrica tornou-se um insumo fundamental. Associada a isso, nas últimas décadas, a preservação do meio ambiente vem destacando-se como prioridade na exploração dos recursos energéticos. Por esse motivo, as energias alternativas são alvos de investimento em massa na grande maioria dos países (REN21, 2021).

Com o avanço tecnológico, o custo da geração de energia elétrica a partir de fontes de energia alternativas foi reduzido. Dentre as fontes alternativas, a matriz fotovoltaica se destaca, pois utiliza como fonte para a geração energética o Sol, um recurso inesgotável de energia. Esta fonte é uma das possíveis soluções para os problemas ambientais relacionados à geração de energia elétrica, já que, comparada a outras matrizes energéticas, é menos agressiva (PEREIRA et al., 2017). Sem equipamentos com partes móveis e manutenção facilitada, a energia solar também possibilita a geração de energia elétrica para pequenos consumidores, utilizando reduzidos espaços disponíveis em residências e centros comerciais (PEREIRA et al., 2017).

No Brasil, a principal fonte de energia elétrica é a fonte hídrica. Contudo, uma redução na participação dessa fonte pode ser observada, o que ocasionou um aumento no preço da energia elétrica devido a ativação de usinas termoeletricas, cujo custo operacional é maior (COMERIO, 2019). Este cenário, contribui para um aumento da integração de usinas fotovoltaicas no Brasil. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar (2019), a capacidade de geração fotovoltaica instalada no Brasil é de 176 GW e pode atingir 251 GW nos próximos 10 anos.

Sistemas FV podem ser avaliados de diversas maneiras, principalmente em relação à geração de energia elétrica. Um dos indicadores da eficiência do sistema fotovoltaico é a taxa de desempenho (TD), mais conhecida pela expressão em inglês *Performance Ratio*. A taxa de desempenho é um indicador muito utilizado para análise do desempenho de sistemas FV, pois emprega para a normalização dos registros de produtividade os valores de irradiância medidos no plano do módulo fotovoltaico. Isso possibilita a comparação de sistemas em diferentes

localidades e com configurações diversas. O valor ideal para a taxa de desempenho é 100%, valor que na prática, não é possível atingir devido a perdas de energia elétrica inevitáveis no funcionamento de um sistema FV.

Existem vários fatores que podem afetar a taxa de desempenho dos sistemas fotovoltaicos. A suspensão de partículas sólidas no ar, além de um grande problema para a saúde humana, também pode promover uma redução do rendimento dos módulos fotovoltaicos. Isso acontece, pois, a deposição de poeira sobre a superfície do módulo gera um efeito de sombreamento suave (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013). A intensidade da perda causada pela sujidade está relacionada às características ambientais do local e à frequência de Operação e Manutenção (O&M) no sistema fotovoltaico (NASCIMENTO, 2019). Em alguns casos, o depósito de sujidade pode acarretar uma redução de mais de 1% no rendimento diário do sistema.

Embora o material particulado depositado sobre os módulos possa ser removido naturalmente pela chuva ou outros eventos naturais, as usinas solares necessitam de um plano de manutenção preventiva, que inclua, principalmente, a limpeza manual ou automática dos módulos fotovoltaicos (HICKEL, 2017). A realização da limpeza dos módulos também é, muitas vezes, desconsiderada por acreditar-se que a deposição de sujidade não apresenta riscos para as usinas. Contudo, o efeito de sombreamento suave pode gerar pontos quentes que produzem calor intenso nas células afetadas (AYRÃO, 2018).

Uma boa estratégia de limpeza pode melhorar a rentabilidade, devendo haver equilíbrio entre o custo da limpeza dos módulos fotovoltaicos e o ganho de produção na geração de energia elétrica da planta. Este é um objeto de estudo muito crítico, especialmente em usinas com grande capacidade instalada, nas quais pequenas perdas de energia ocasionam uma perda econômica considerável e onde se faz necessária uma grande mobilização de equipes de manutenção (CONCEIÇÃO et al., 2019). Por isso, a fim de minimizar os gastos e aumentar o aproveitamento da radiação incidente nos módulos, é necessária a otimização do intervalo entre as limpezas dos módulos fotovoltaicos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho, é avaliar a escala de limpeza de uma usina fotovoltaica localizada em Goiânia, sob a ótica do equilíbrio entre os gastos utilizados na ação de manutenção preventiva e o custo das perdas causadas pela redução da Taxa de Desempenho da planta com o efeito de deposição de sujeira.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Calcular a TD entre as limpezas em usina fotovoltaica;
- Descrever matematicamente a relação entre TD e tempo sem limpeza da usina;
- Calcular o custo da perda de energia causada pela redução da Taxa de Desempenho na planta devido a sujeira;
- Formular e resolver um problema de otimização para a escala de limpeza dos módulos fotovoltaicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

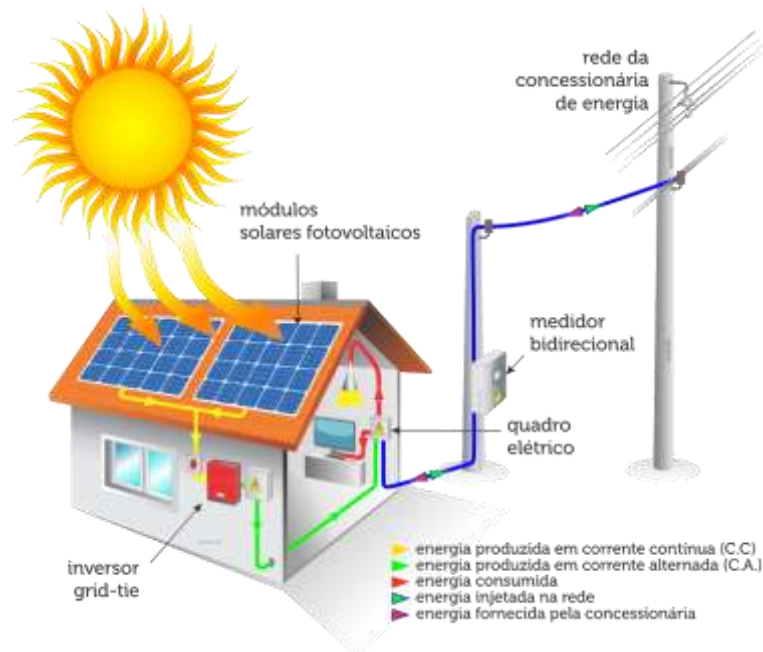
Nesta seção são apresentados os fundamentos teóricos que embasaram o presente trabalho. Discorre-se brevemente sobre o princípio de funcionamento de uma usina fotovoltaica, sobre sua taxa de desempenho, e sobre o efeito da deposição de sujidade sobre os módulos fotovoltaicos.

2.1 USINA FOTOVOLTAICA

Uma usina fotovoltaica é um empreendimento composto por um conjunto de equipamentos que objetivam gerar energia elétrica a partir da luz solar, empregando o efeito fotovoltaico. Os principais equipamentos utilizados são os módulos fotovoltaicos e os inversores de frequência. As usinas podem ser instaladas em terra, telhados ou mesmo sobre rios e mares.

A Figura 1 apresenta o funcionamento básico de uma usina fotovoltaica. O processo tem início com a captação da luz do sol pelas células fotovoltaicas, elementos que compõem os módulos fotovoltaicos e possuem a capacidade de gerar energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico (AYRÃO, 2018). Essas células fazem circular uma corrente elétrica contínua, tornando necessário o emprego de inversores de frequência, equipamentos capazes de converter a corrente contínua em corrente alternada, a corrente elétrica presente na maior parte das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Figura 1 - Funcionamento de uma usina fotovoltaica



Fonte: BLUESOL (2018).

A capacidade de geração de energia elétrica das usinas fotovoltaicas é afetada por alguns fatores. O sombreamento dos módulos, por exemplo, é um dos fatores que limitam a capacidade de geração do sistema por diminuir a incidência de radiação solar nas células fotovoltaicas. Outro fator é o nível de irradiância solar que varia de acordo com a localização da planta geradora, estação do ano, clima do local e posição do sol. Uma parcela da radiação solar irradiada sobre o módulo é refletida por sua superfície, sendo este outro fator que afeta a capacidade de geração fotovoltaica. A principal perda num sistema fotovoltaico se dá devido ao fato de grande parte da radiação solar ser convertida em calor, elevando substancialmente a temperatura de operação do módulo e reduzindo a sua eficiência.

Em meio a todas essas perdas relevantes, a deposição de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos tem sido tratada com destaque na literatura científica. A deposição de particulados na superfície dos módulos fotovoltaicos impede, parcialmente, a incidência da luz solar nas células fotovoltaicas, como um efeito de sombreamento, afetando diretamente a produção de energia elétrica.

2.2 TAXA DE DESEMPENHO

A eficiência de um sistema fotovoltaico é tipicamente analisada pela Taxa de Desempenho (TD). A análise utilizando a TD quantifica as perdas do sistema, perdas que podem ter origem no inversor, na temperatura de operação, na perda de irradiação por sombreamento e sujidade, ou em desligamentos e falhas (MARION, 2005).

A TD pode ser calculada através da equação (1) e configura-se, em suma, na razão entre a energia elétrica efetivamente gerada, E_{gerada} , em um intervalo de tempo, t , e a energia elétrica teórica, $E_{teorica}$, referente aquele intervalo.

$$TD(t) = \frac{E_{gerada}(t)}{E_{teorica}(t)} \quad (1)$$

Onde t é o intervalo de tempo.

A energia teórica pode ser obtida da equação (2) empregando a radiação solar, a potência nominal do sistema e um valor de radiação solar de referência, radiação sob a qual a potência nominal do sistema é aferida.

$$E_{teorica}(t) = \frac{P_0 \cdot H(t)}{G} \quad (2)$$

Onde, P_0 é a potência nominal do sistema FV em kWp, G é o valor de radiação solar de referência (1 kWh/m²) e $H(t)$ é a radiação solar incidente sobre o plano dos módulos FV no intervalo t em kWh/m² (HICKEL, 2017).

Como a temperatura tem uma influência forte no desempenho de um sistema fotovoltaico, esse parâmetro climático deve ser levado em consideração. Isso pode ser feito empregando a temperatura de superfície do módulo no cálculo da estimativa da energia teórica (DIERAUF et al., 2013). A equação (3) mostra a fórmula usada para estimar a energia teórica empregando a temperatura de operação do módulo.

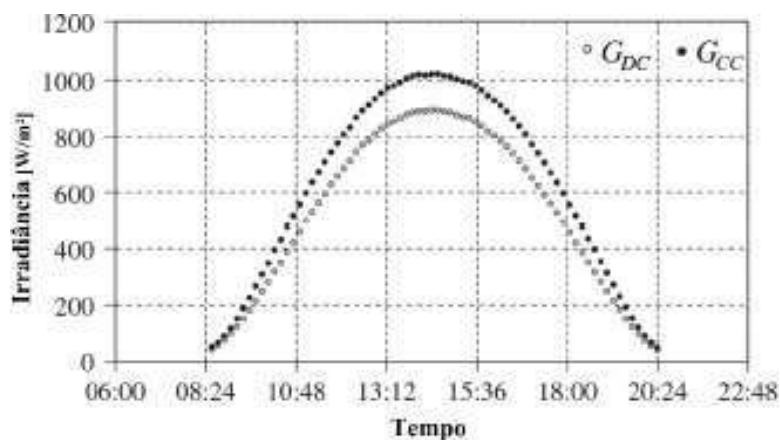
$$E_{teorica}(t) = \frac{P_0 \cdot H(t)}{G} \cdot \gamma(T_{cell_{stc}} - T_{cell_t}) \quad (3)$$

Onde, γ é o coeficiente de perda por temperatura da potência máxima do módulo, $T_{cell_{stc}}$ é a temperatura nominal da célula no *datasheet* em °C e $T_{cell}(t)$ temperatura da célula em °C no intervalo t (HICKEL, 2017).

O emprego de módulos e inversores de maior eficiência tem permitido um aumento nos valores de TD usualmente observados, alcançando valores entre 80-90%. Em regiões com clima ameno, os valores de TD são mais altos, enquanto em regiões de clima tropical, como o Brasil, são esperados valores de TD menores, principalmente devido às temperaturas operacionais mais altas (NASCIMENTO, 2019).

2.3 SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A distribuição uniforme de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos, resulta em uma atenuação da radiação solar incidente nas células fotovoltaicas. Por conta desta redução da energia solar recebida, o dispositivo apresenta uma taxa de desempenho menor do que o esperado, como é apresentado no Gráfico 1. A perda de desempenho proporciona uma perda de energia, que é ainda mais significativa quando há módulos empoeirados conectados a módulos limpos em um mesmo Rastreador de Ponto de Potência Máxima (MPPT). O MPPT é o dispositivo responsável por levar os módulos fotovoltaicos a um ponto ótimo de operação. Para isso, o equipamento aplica um valor de tensão sobre os terminais de um conjunto de módulos fotovoltaicos conectados em série. Quando existem módulos sujos e limpos conectados em série a um mesmo MPPT, o equipamento aplicará sobre os módulos uma tensão de operação menor, fazendo com que os módulos limpos não operem no seu ponto de potência máxima. Isso acontece devido ao efeito dos módulos sujos sobre a estratégia de controle do equipamento.

Gráfico 1 - Irradiância solar - célula de referência suja(G_{DC}) e limpa(G_{CC}).

Fonte: Zorrilla-Casanova et al. (2013).

O acúmulo de poeira na superfície dos módulos está relacionado com o seu ângulo de inclinação. Uma inclinação de pelo menos 5° já é capaz de proporcionar que a superfície do módulo seja limpa nos períodos de chuvas, recuperando parte do seu desempenho. Entretanto, em períodos em que não há chuva, o acúmulo de sujeira pode ocasionar perdas de até 30% (ZORRILLA- CASANOVA et al., 2011).

Em regiões com predominância de fortes ventos, como em regiões litorâneas, parques eólicos, etc. a sujeira pode ser depositada de forma não homogênea (HICKEL et al., 2016; Nascimento et al., 2016), conforme o exemplo da Figura 2. Além da atenuação da irradiância, essa sujeira não homogênea afeta diferentes parâmetros elétricos nos módulos fotovoltaicos, como a corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto e o formato da curva I-V, reduzindo, significativamente, a geração dos demais módulos sem sujeira (LORENZO et al., 2013).

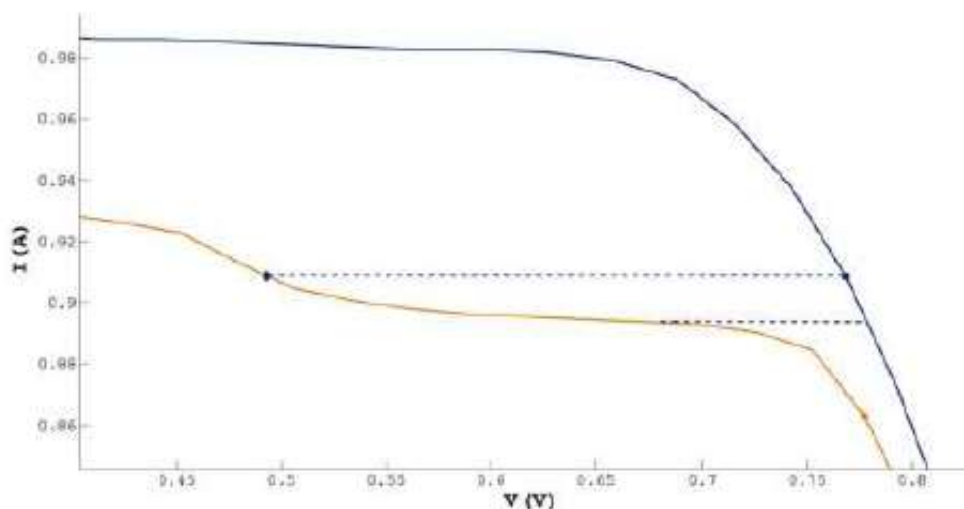
Figura 2 – Módulos fotovoltaicos com sujeira não homogênea



Fonte: Hickel et al. (2016).

A Figura 3 demonstra o impacto da sujeira não homogênea sobre a operação de um módulo fotovoltaico, apresentando a curva I-V de um módulo fotovoltaico limpo em comparação com a curva I-V de um módulo fotovoltaico sujo.

Figura 3 – Curvas I-V de um módulo limpo (azul) e um módulo com sujeira não homogênea (laranja).



Fonte: Lorenzo et al. (2013).

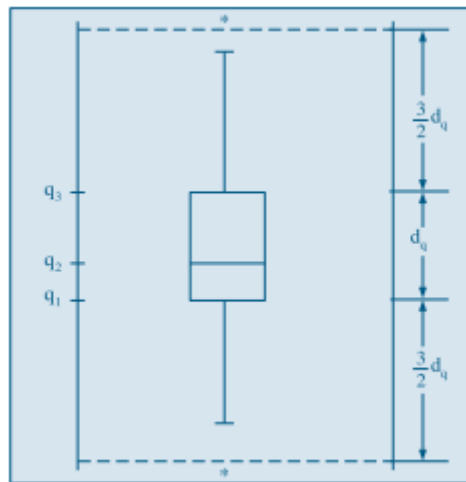
Baseando-se em dados experimentais, alguns autores recomendam limpar os sistemas a cada duas ou três semanas durante a estação seca (KALOGIROU, AGATHOKLEOUS e PANAYIOTOU, 2013). Outros, recomendam que a limpeza seja realizada quando a perda de eficiência devido à sujidade alcançar 5% em relação a eficiência do módulo limpo (JIANG et al., 2016). Existem, também, modelos destinados a calcular a quantidade de radiação solar que efetivamente chega às células fotovoltaicas sob as partículas de poeira comparando-a com quantidade absorvida em uma superfície limpa (CONCEIÇÃO et al., 2019).

2.4 FILTRAGEM DE PONTOS EXTERIORES

Esse método é normalmente empregado para traçar os limites de um diagrama de caixa, ou *boxplot*, conforme apresenta o Gráfico 2. Os valores superiores e inferiores aos valores determinados pelos pontos exteriores. O fator de 1,5 aplicado à distância entre quartis é empregado pois, quando o filtro é aplicado em uma variável aleatória normal, os limites máximos e mínimos definidos circunscrevem 99,3% dos valores legítimos da variável aleatória, conforme representado na Figura 4 (BUSSAN, MORETIN, 2010).

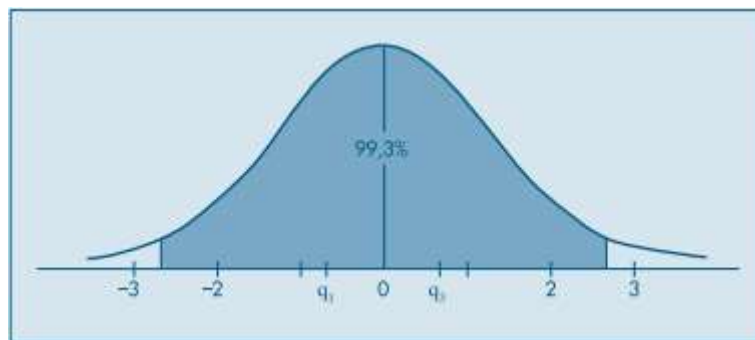
Um quartil de ordem p é uma medida de dispersão tal que, sendo p uma proporção qualquer, $p\%$ dos registros de um conjunto de dados são inferiores ao seu valor. Ao quartil de ordem 25% dá-se o nome especial de primeiro quartil (q_1), enquanto ao quartil de ordem 75% dá-se o nome especial de terceiro quartil (q_3) (MORETTIN E BUSSAB, 2010).

Gráfico 2 – Box Plot.



Fonte: Bussan, Moretin (2010).

Figura 4 – Área sob a curva normal entre min e max.



Fonte: Bussan, Moretin (2010).

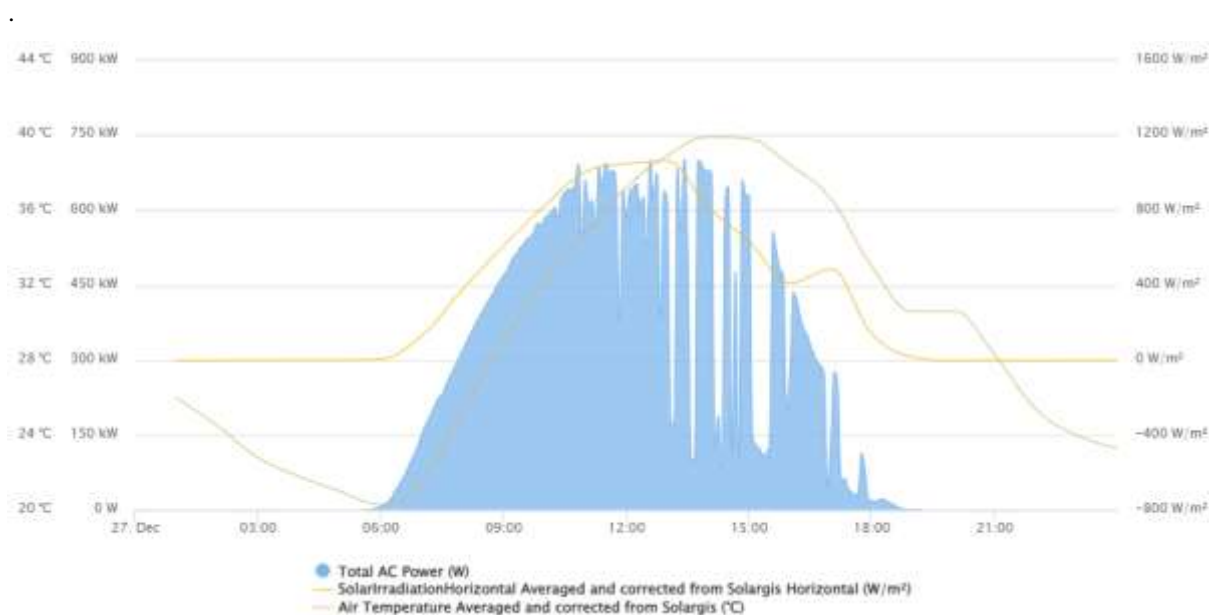
3 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

A pesquisa desse trabalho classifica-se, quanto à sua natureza, como aplicada, já que os resultados obtidos contribuem para o conhecimento sobre uma solução específica: a influência da sujidade sobre o desempenho dos módulos fotovoltaicos. Do ponto de vista de abordagem, esta é uma pesquisa quantitativa, pois emprega métodos e instrumentos matemáticos, a partir de simulações e coleta de dados de usinas fotovoltaicas. Em relação aos objetivos, é uma pesquisa exploratória, já que ela procura proporcionar maior familiaridade com o fenômeno da limpeza e da influência da sujidade no retorno financeiro de uma usina fotovoltaica. Em relação aos procedimentos adotados na coleta de dados, este é uma pesquisa ex-post-facto, uma vez que os dados coletados foram após a ocorrência dos eventos.

Foi empregado como objeto de estudo uma usina fotovoltaica localizada em Goiânia, onde há acesso a uma grande quantidade de dados. A usina é composta por 2880 módulos fotovoltaicos do modelo JAP6-72-320/4BB de 320 W de potência nominal, totalizando 992 kWp de potência elétrica em corrente contínua. A usina contém 15 inversores ABB de 50 kW de potência nominal, totalizando uma capacidade instalada de 750 kW.

Foram mapeadas as limpezas realizadas nos módulos fotovoltaicos da usina de forma a permitir o estudo da taxa de desempenho do sistema. Para obter os dados foi utilizado o *software* de monitoramento do sistema QOS Energy. Os dados utilizados são referentes ao período de tempo compreendido entre julho de 2020 e dezembro de 2021.

Gráfico 3 – Energia (azul), irradiação (amarelo) e temperatura (laranja) da usina fotovoltaica de Goiânia.



Fonte: QOS Energy (2022).

Foram extraídos do sistema dados de: Energia gerada (kWh), radiação solar (kWh/m²) e Temperatura do módulo (°C). Os dados foram extraídos em intervalos de uma hora, em que a energia gerada e radiação solar incidente são referentes ao acumulado em uma hora, enquanto a temperatura do módulo é a temperatura média do intervalo. O Gráfico 3 apresenta os dados extraídos do sistema.

No Gráfico 3, é possível observar que, ao longo do dia, os valores relevantes de energia elétrica gerada concentram-se no horário produtivo da usina, isto é: das 7 horas às 17 horas. Por isso, foram utilizados apenas os dados referentes a este intervalo do dia. Os valores fora do horário produtivo não influenciam o desempenho da usina e poderiam introduzir ruídos na análise do estudo.

Os dados coletados e as informações dos módulos fotovoltaicos encontradas no *datasheet* do equipamento, como o coeficiente de temperatura para potência máxima e a temperatura de operação nas condições padrões de teste, são suficientes para calcular a taxa de desempenho da usina.

3.1 CÁLCULO DA TD ENTRE LIMPEZAS DA USINA FOTOVOLTAICA

Utilizando uma rotina programada em linguagem Python, os dados extraídos foram importados em formato .csv e a energia teórica de cada intervalo foi calculada empregando a equação (3).

Os dados de energia elétrica gerada e teórica obtidos foram agrupados por dia, sendo obtido um valor de taxa de desempenho para cada dia no intervalo sob estudo. Isso para analisar a variação da taxa de desempenho a cada dia transcorrido.

Devido a intercorrências na operação da usina, como indisponibilidade da rede de distribuição de energia elétrica, queimas de componentes dos equipamentos e ensaios diversos, entre outros, alguns valores da taxa de desempenho apresentam valores muito destoantes dos demais. Por isso, os valores de taxa de desempenho obtidos foram submetidos a um processo de filtragem por meio do qual foram retirados os valores localizados acima de um dado limite máximo ou abaixo de um dado limite mínimo. Os limites máximo e mínimo foram obtidos a partir das equações (7), (8) e (9), respectivamente.

$$\max = q3 + 1,5 \cdot Iqr \quad (7)$$

$$\min = q1 - 1,5 \cdot Iqr \quad (8)$$

$$Iqr = q3 - q1 \quad (9)$$

Onde $q1$ é o primeiro quartil do conjunto dos dados de TD, $q3$ é o terceiro quartil e Iqr é a distância entre quartis.

3.2 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE TD E TEMPO SEM LIMPAR A USINA

A fim de se obter uma descrição matemática da relação entre a TD e o tempo sem limpar a usina, foram separados os intervalos entre limpezas realizadas no período de estudo. A data de cada limpeza é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Limpezas realizadas na usina fotovoltaica de Goiânia entre o período de 1º de agosto de 2020 a 31 de dezembro de 2021.

Limpeza	Data
1	03/08/2020
2	14/09/2020
3	12/04/2021
4	07/06/2021
5	08/08/2021
6	28/09/2021

Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Por simplificação, considerou-se que apenas um único dia foi necessário para realizar a limpeza da usina inteira. Assim, há disponibilidade de dados referentes a 5 intervalos entre limpezas no período estudado. Esses intervalos foram empregados para a descrição matemática da perda de desempenho do sistema com o passar dos dias sem limpar.

Os cinco intervalos foram tratados como cinco repetições da observação do comportamento do desempenho da usina. Assim, foram obtidos cinco valores de taxa de desempenho para cada dia sem limpar. Foi obtida a média diária das TD das cinco repetições. Com isso, foi

obtido o comportamento médio da taxa de desempenho do sistema fotovoltaico.

Utilizando-se o método dos mínimos quadrados, uma função linear de primeira ordem foi ajustada aos valores médios de TD, sendo encontrados os repressores que melhor se ajustam ao comportamento da taxa de desempenho médio na usina fotovoltaica de Goiânia no intervalo de tempo estudado. A equação (10) apresenta o valor da TD em função do número de dias transcorridos desde a última limpeza.

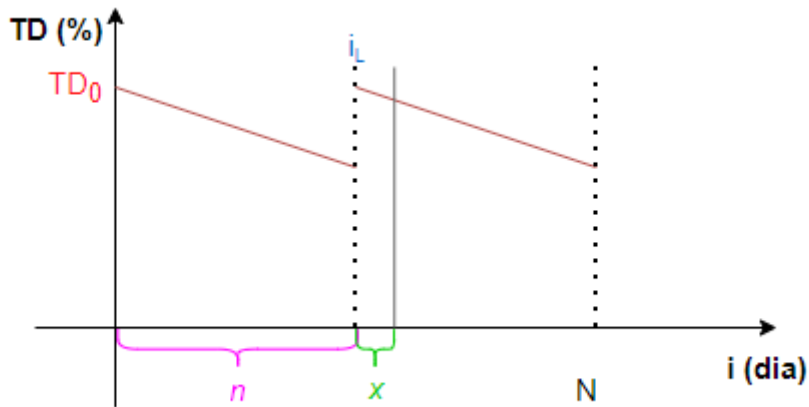
$$TD(x) = k \cdot x + TD_0 \quad (10)$$

Onde, k é a perda de desempenho por cada dia sem limpar em %/dia e TD_0 é a taxa de desempenho do módulo limpo em %.

3.3 CÁLCULO DO CUSTO DA PERDA DE ENERGIA CAUSADA PELA REDUÇÃO DA TD_0

Para encontrar uma equação que represente a perda de energia no sistema, realizou-se um experimento mental que consiste em aplicar a equação (10) em intervalos entre limpezas de duração n dias. O Gráfico 4 apresenta o comportamento da taxa de desempenho neste experimento.

Gráfico 4 – Comportamento da taxa de desempenho ao longo do experimento mental para determinação da equação da perda de energia.



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

No Gráfico 4, TD_0 é a taxa de desempenho do sistema quando a usina está totalmente limpa, i_L é o dia em que se realiza uma limpeza dos módulos fotovoltaicos, n o intervalo de dias entre limpezas, x o número de dias desde a última limpeza, i o número de dias desde a primeira limpeza e N o total de dias em que se realizou o experimento.

Sendo x o dia após a última limpeza dos módulos, seu valor pode ser obtido pela equação (11):

$$x = \text{mod}(i, n) \quad (11)$$

Onde $\text{mod}(i, n)$ é o operador que extrai o resto da divisão de i por n .

Inserindo a equação (11) na equação (10), tem-se a equação (12).

$$TD(i) = k \cdot (\text{mod}(i, n)) + TD_0 \quad (12)$$

Da equação (1) tem-se que a energia gerada em um sistema fotovoltaico pode ser calculada a partir da energia teórica e da taxa de desempenho empregando a equação (13).

$$E_{gerada}(i) = E_{teorica}(i) \cdot TD(i) \quad (13)$$

A energia perdida por conta da sujidade é a diferença entre a energia que deveria ter sido gerada com a usina limpa e a energia efetivamente gerada. O montante perdido pode ser obtido pela equação (14).

$$E_{perdida}(i) = E_{teorica}(i) \cdot TD_0 - E_{gerada}(i) \quad (14)$$

Substituindo a energia gerada na equação (14), tem-se a equação (15).

$$E_{perdida}(i) = E_{teorica}(i)[TD_0 - TD(i)] \quad (15)$$

Substituindo a equação (12) para a TD na equação (15), tem-se finalmente que a TD do módulo limpo é cancelada, ficando a energia perdida descrita na forma de (16).

$$E_{perdida}(i) = E_{teorica}(i) \cdot k \cdot (mod(i, n)) \quad (16)$$

A equação (17) representa o total da energia perdida.

$$E_{perdida} = \sum_{i=0}^N E_{teorica}(i) \cdot k \cdot (mod(i, n)) \quad (17)$$

3.4 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA A ESCALA DE LIMPEZA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para encontrar o intervalo ótimo entre limpezas, necessita-se encontrar qual o número n de dias entre limpezas proporciona o menor custo de operação da usina. Uma primeira parcela a ser obtida quanto ao custo operacional pode ser calculada pela equação (18), por meio da qual calcula-se o custo de energia elétrica que se deixou de gerar por influência da sujidade.

$$C_{perdido} = E_{perdida} \cdot TE \quad (18)$$

Onde, $C_{perdido}$ é o valor financeiro do custo da energia elétrica que se deixou de gerar por influência da sujidade e TE é a tarifa de energia elétrica.

Além da perda de energia no sistema, deve ser considerado o custo de se realizar a limpeza nos módulos fotovoltaicos. Esse valor pode ser obtido a partir do gasto médio das limpezas realizadas no complexo fotovoltaico. A equação (19) representa o custo da limpeza em função do número n de dias entre as limpezas em um intervalo de N dias.

$$C_{limpezas} = \frac{N}{n} \cdot C_{limpeza} \quad (19)$$

Observa-se que a razão entre N e n pode resultar em um valor com casas decimais. Neste caso, é necessário truncar o resultado da razão de maneira a mantê-lo sempre como número inteiro, já que não existem meias limpezas.

Da soma do custo da energia elétrica que se deixou de gerar por influência da sujidade com o custo da realização das limpezas, obtém-se finalmente a função de custo de um problema de otimização. O problema sujeita-se a três restrições: o tamanho n do intervalo entre limpezas deve ser inteiro, além de ser maior do que zero e menor do que 80. O limite superior de n

decorre do tamanho dos intervalos entre limpezas nos dados. A equação (20) apresenta a formulação do problema de otimização.

$$\min: \frac{N}{n} \cdot C_{limpeza} + \left(\sum_{i=0}^N E_{teorica}(i) \cdot k \cdot (\text{mod}(i, n)) \right) \cdot TE \quad (20)$$

s. a. :

$$\begin{aligned} n &> 0 \\ n &< 80 \\ n &\in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

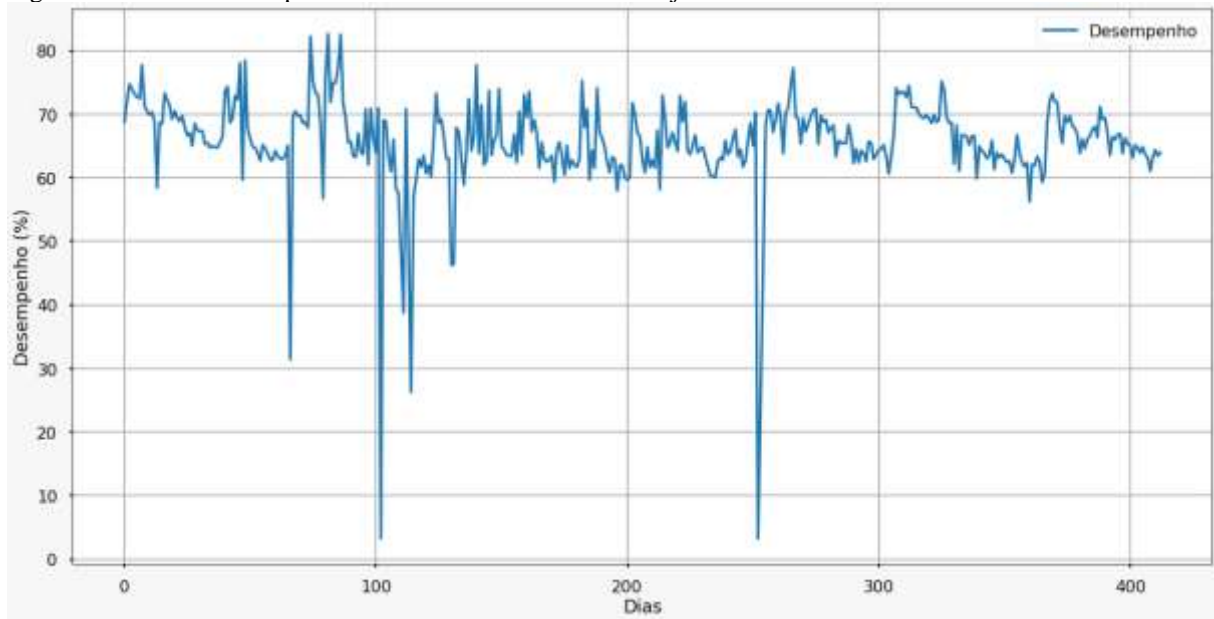
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação da metodologia descrita na seção 3.

4.1 TAXA DE DESEMPENHO ENTRE LIMPEZAS DA USINA FOTOVOLTAICA

O comportamento da TD obtido da aplicação do método descrito na seção 3.1 é apresentado na Figura 5.

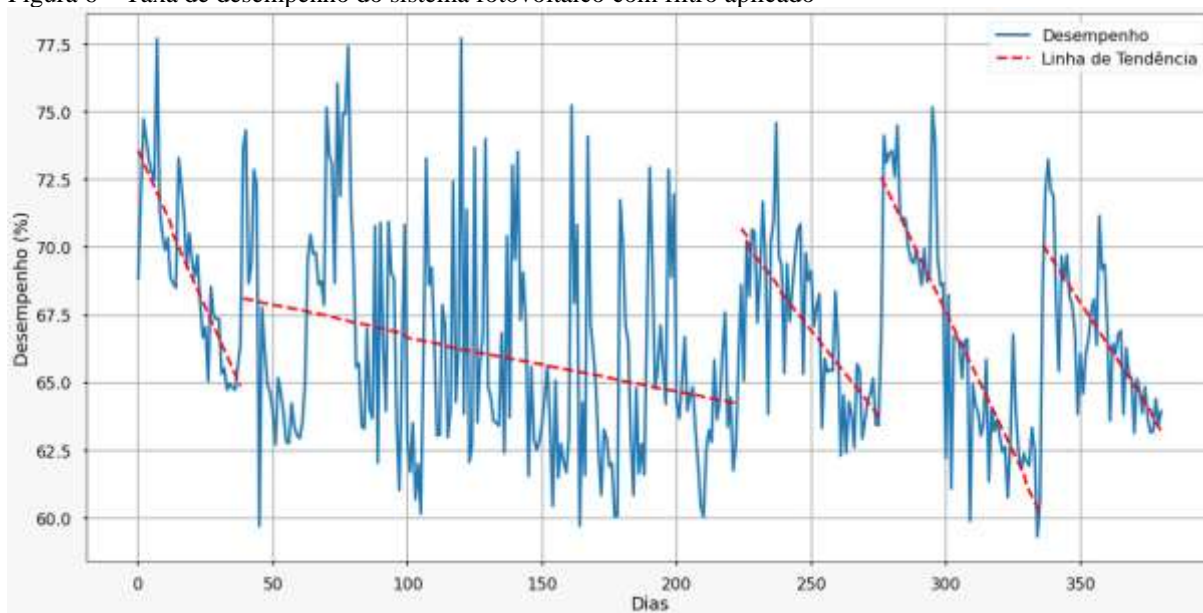
Figura 5 – Taxa de desempenho do sistema fotovoltaico entre julho de 2020 até dezembro de 2021



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Conforme apresentado na seção 3.1, os valores obtidos de TD foram filtrados utilizando um filtro geométrico baseado na posição de seus quartis. Os limites superior e inferior encontrados para o filtro foram de 79,91% e 59,91%. A Figura 6 apresenta os valores de TD filtrados. Os trechos de reta tracejados são as linhas de tendências dos intervalos entre limpezas realizadas na usina fotovoltaica.

Figura 6 – Taxa de desempenho do sistema fotovoltaico com filtro aplicado



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Pode ser observado na Figura 6 que há um ganho de desempenho no sistema quando realiza a lavagem dos módulos. Mesmo após a aplicação do filtro, ainda há presente uma oscilação nos valores registrados. Contudo, é possível observar que, com o passar dos dias sem limpar, a TD diminui segundo um comportamento que pode ser ajustado com razoável fidelidade a uma função linear do primeiro grau, conforme apresentado na seção 3.2.

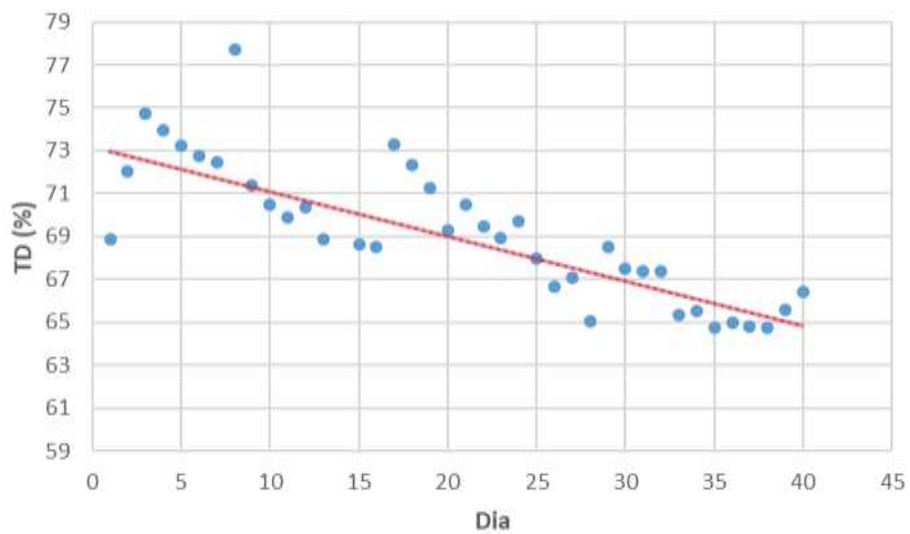
Empregando os diversos intervalos entre limpezas como distintas repetições do experimento de observar o desempenho da usina com o passar dos dias sem limpar, obtém-se a Tabela 1 e os Gráficos 5, 6, 7, 8 e 9.

Tabela 1 – Taxa de desempenho em cada uma das cinco observações.

Dia após a lavagem	Intervalo de lavagem				
	1	2	3	4	5
0	68,85	73,65	68,62	66,69	68,65
1	72,02	74,32	65,08	74,13	72,02
2	74,73	68,67	70,25	73,13	73,24
3	73,98	69,37	68,19	73,46	72,07
4	73,22	72,87	70,67	73,56	71,93
...

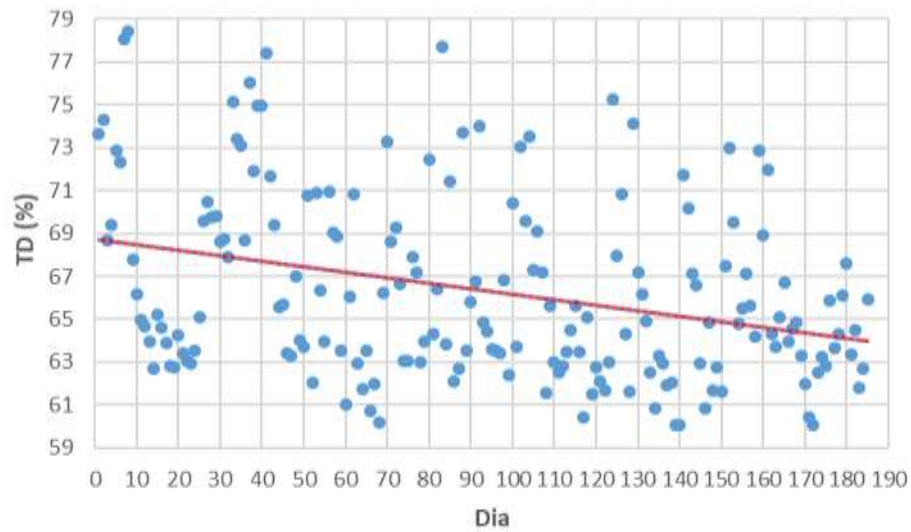
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 5 – Primeiro intervalo entre limpezas



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

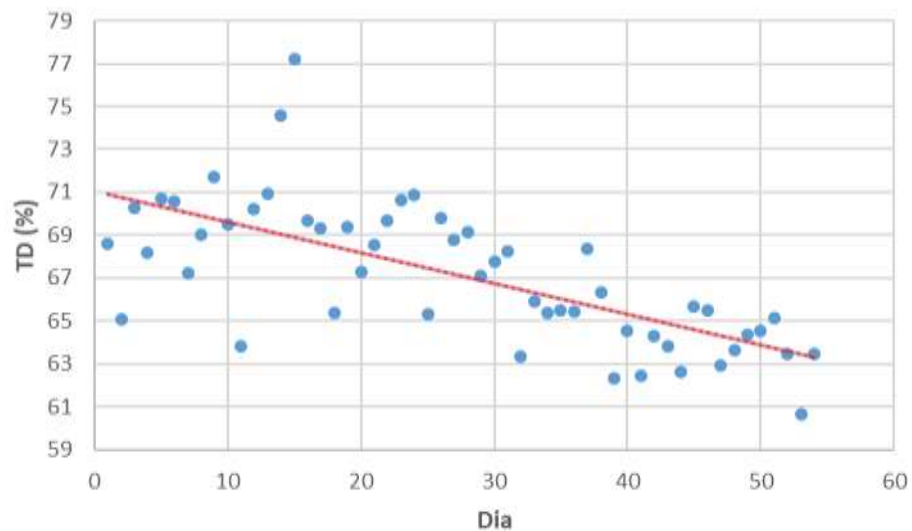
Gráfico 6 – Segundo intervalo entre limpezas



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

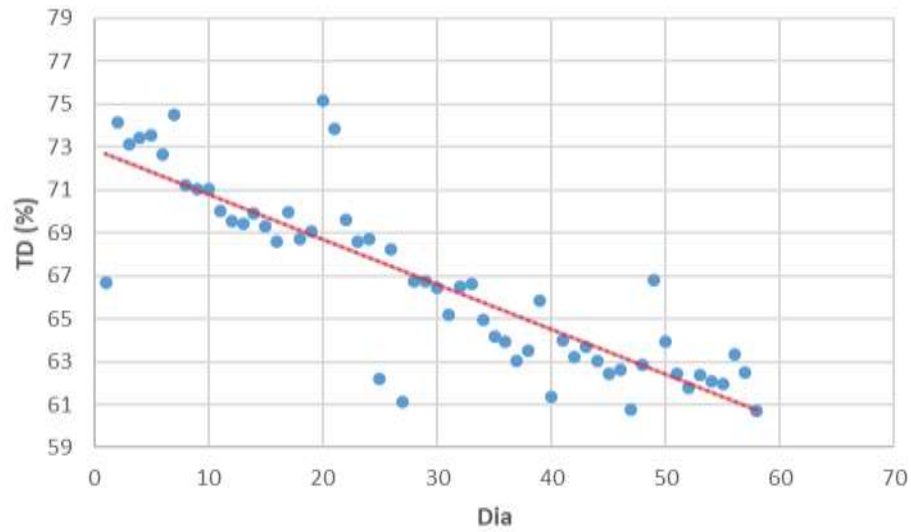
O segundo intervalo por ser mais longo, em algum momento sofre uma saturação do efeito da sujidade. Neste caso, haveria uma inflexão da reta que se ajusta aos dados do intervalo. Como, na elaboração da figura, todo o intervalo, foi considerado para o ajuste da reta de tendência, ao invés de duas retas com um ponto de inflexão, a linha de tendência acabou se conformando como uma única reta com uma inclinação menor.

Gráfico 7 - Terceiro intervalo entre limpezas



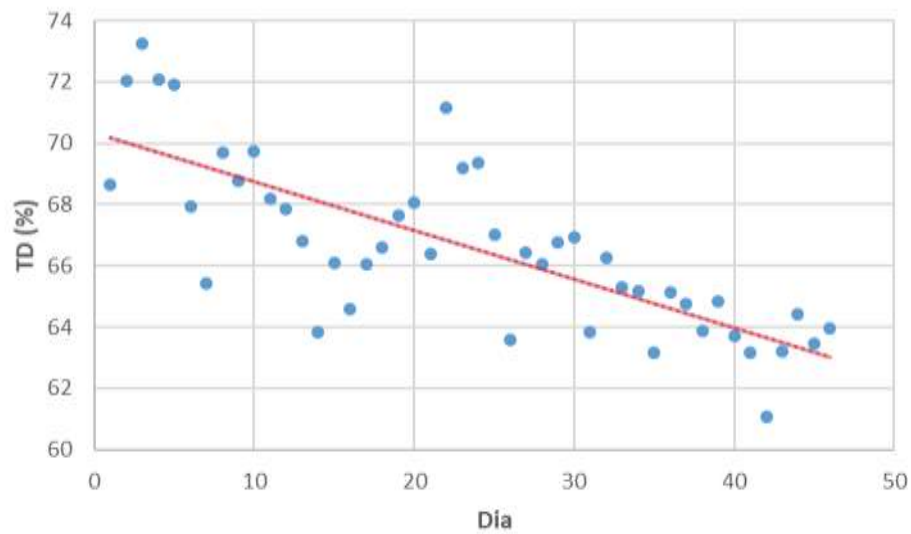
Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Gráfico 8 - Quarto intervalo entre limpezas



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

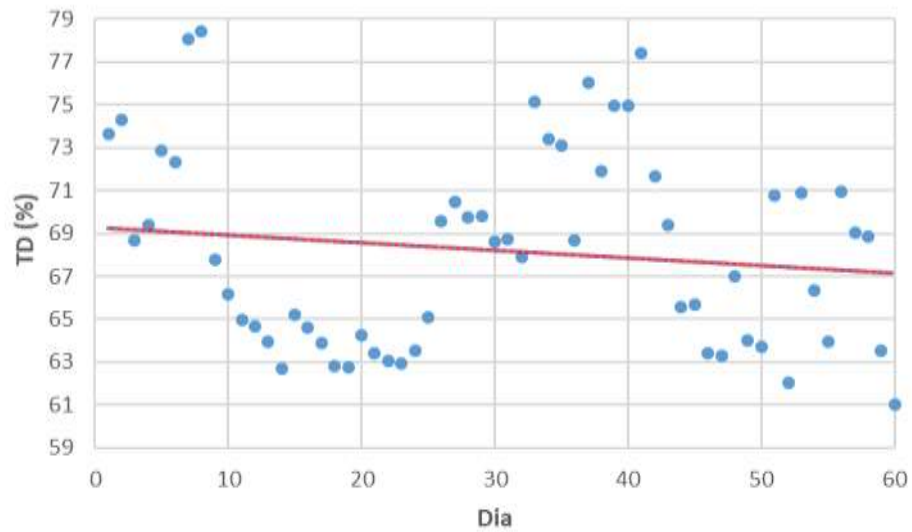
Gráfico 9 – Quinto intervalo entre limpezas



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

O segundo intervalo entre limpezas possui um número maior de dias, sofrendo o efeito da saturação da influência da sujeira sobre o desempenho. Por isso, a avaliação do intervalo foi limitada a até 60 dias após a limpeza. O Gráfico 10 apresenta o intervalo considerado.

Gráfico 10 – Segundo intervalo entre limpezas com período de 60 dias.

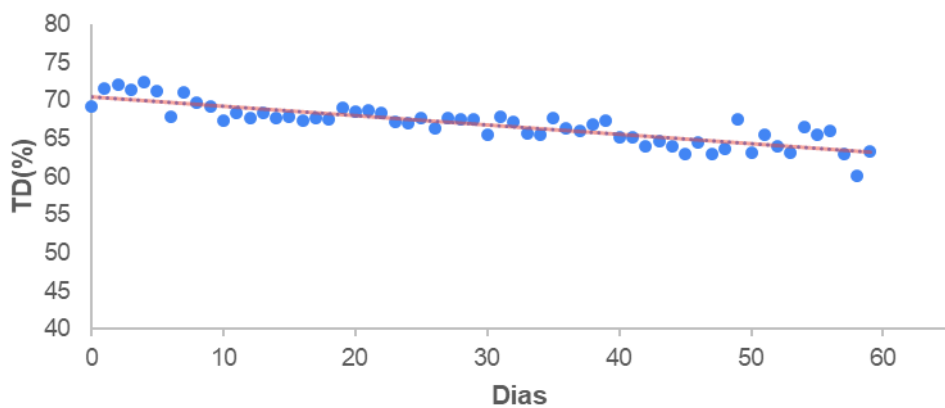


Fonte: Produção do próprio autor (2022).

4.2 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE TD E TEMPO SEM LIMPAR A USINA

A partir da média da TD dos cinco intervalos entre limpezas foi obtido o comportamento médio da TD do sistema apresentado no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Taxa de desempenho média do sistema



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Empregando o método dos mínimos quadrados foram encontrados os parâmetros da função linear de primeiro grau que modela o comportamento médio da TD do sistema descrita pela equação (21).

$$TD(x) = -0,1242x + 70,538 \quad (21)$$

Onde x é o dia após a última limpeza realizada.

O valor de 70,538% é referente à TD dos módulos limpos e o valor de -0,1242%/dia é a perda de desempenho diária.

4.3 CUSTO DA PERDA DE ENERGIA CAUSA DA PELA REDUÇÃO DA TD

Aplicando os valores obtidos do comportamento médio do desempenho da usina na equação (17), encontra-se a energia total perdida com o número de dias entre limpezas variando de 1 dia a 80 dias para um intervalo de 256 dias. Na Tabela 2, encontra-se a energia total perdida para cada valor n de dias entre limpezas.

Tabela 2 - Energia total perdida nos intervalos de n .

n	Total de Energia Perdida (kWh)
1	0
2	871
3	1716
4	2570
5	3420
6	4268
7	5063
8	6075
9	6773
10	7433
11	8384
12	9257
13	10035
14	10926
15	11876
16	13106
17	13581
18	14165
19	15162
20	15988

Tabela 3 - Energia total perdida nos intervalos de n.

21	16654
22	17705
23	18702
24	19477
25	20081
26	20867
27	21471
28	22059
29	23269
30	24004
31	25434
32	27118
33	26618
34	27726
35	28344
36	29740
37	31050
38	31149
39	31435
40	31947
41	33336
42	34107
43	35750
44	35631
45	35923
46	36781
47	37710
48	38924
49	39310
50	40630
51	42720
52	43020
53	43356
54	43301
55	43387
56	43861
57	44466
58	45381
59	46524
60	47791
61	49471
62	50912
63	52350
64	54496
65	54139
66	54420
67	54858
68	55089
69	55556
70	55892
71	56576
72	57235
73	57577
74	58407
75	59175
76	59592

Tabela 4 - Energia total perdida nos intervalos de n.

77	60604
78	61745
79	63089
80	64045

Fonte: Produção do próprio autor (2022).

A concessionária de Goiânia aplica uma tarifa de energia (TE) de R\$ 0,55 por kWh de energia gerada. Aplicando essa TE na equação (18), calcula-se o valor em reais da perda de energia do sistema para cada valor n de dias entre limpezas. Na Tabela 3 encontram-se os valores da perda em reais.

Tabela 3 – Valor da Energia Perdida em Reais

n	Valor da Energia Perdida
1	R\$ -
2	R\$ 482,20
3	R\$ 950,26
4	R\$ 1.422,80
5	R\$ 1.893,80
6	R\$ 2.363,37
7	R\$ 2.803,42
8	R\$ 3.363,63
9	R\$ 3.750,19
10	R\$ 4.115,72
11	R\$ 4.642,47
12	R\$ 5.125,55
13	R\$ 5.556,59
14	R\$ 6.049,49
15	R\$ 6.575,80
16	R\$ 7.256,71
17	R\$ 7.519,75
18	R\$ 7.842,88
19	R\$ 8.394,99
20	R\$ 8.852,67
21	R\$ 9.221,31
22	R\$ 9.803,28
23	R\$ 10.355,57
24	R\$ 10.784,31
25	R\$ 11.118,80
26	R\$ 11.553,87
27	R\$ 11.888,41
28	R\$ 12.214,13
29	R\$ 12.883,79
30	R\$ 13.291,07
31	R\$ 14.082,60
32	R\$ 15.015,40
33	R\$ 14.738,44
34	R\$ 15.351,98
35	R\$ 15.694,25
36	R\$ 16.467,22
37	R\$ 17.192,29
38	R\$ 17.247,47
39	R\$ 17.405,67

Tabela 3 – Valor da Energia Perdida em Reais

40	R\$	17.689,07
41	R\$	18.457,96
42	R\$	18.884,97
43	R\$	19.794,64
44	R\$	19.729,06
45	R\$	19.890,65
46	R\$	20.365,38
47	R\$	20.880,02
48	R\$	21.552,41
49	R\$	21.765,94
50	R\$	22.497,05
51	R\$	23.653,95
52	R\$	23.820,24
53	R\$	24.006,11
54	R\$	23.975,79
55	R\$	24.023,33
56	R\$	24.285,96
57	R\$	24.621,04
58	R\$	25.127,36
59	R\$	25.760,44
60	R\$	26.461,69
61	R\$	27.392,28
62	R\$	28.189,74
63	R\$	28.986,43
64	R\$	30.174,27
65	R\$	29.976,69
66	R\$	30.132,57
67	R\$	30.374,90
68	R\$	30.502,86
69	R\$	30.761,56
70	R\$	30.947,13
71	R\$	31.326,18
72	R\$	31.690,81
73	R\$	31.880,42
74	R\$	32.340,02
75	R\$	32.765,10
76	R\$	32.995,81
77	R\$	33.556,70
78	R\$	34.187,97
79	R\$	34.932,16
80	R\$	35.461,61

Fonte: Produção do próprio autor (2022).

4.4 INTERVALO ÓTIMO ENTRE LAVAGENS

O custo para lavar a usina de Goiânia é de R\$ 9.000,00. Aplicando esse custo à equação (20), obteve-se o custo total de operação do intervalo de 256 dias para cada valor n de dias entre limpezas. Na Tabela 4, encontram-se os valores de custo total em reais.

Tabela 4 – Valor total do custo de lavagem com a perda de energia.

<i>n</i>	Valor do Custo Total
1	R\$ 2.304.004,06
2	R\$ 1.152.482,20
3	R\$ 765.950,26
4	R\$ 577.422,80
5	R\$ 460.893,80
6	R\$ 380.363,37
7	R\$ 326.803,42
8	R\$ 291.363,63
9	R\$ 255.750,19
10	R\$ 229.115,72
11	R\$ 211.642,47
12	R\$ 194.125,55
13	R\$ 176.556,59
14	R\$ 168.049,49
15	R\$ 159.575,80
16	R\$ 151.256,71
17	R\$ 142.519,75
18	R\$ 133.842,88
19	R\$ 125.394,99
20	R\$ 116.852,67
21	R\$ 117.221,31
22	R\$ 108.803,28
23	R\$ 109.355,57
24	R\$ 100.784,31
25	R\$ 101.118,80
26	R\$ 92.553,87
27	R\$ 92.888,41
28	R\$ 93.214,13
29	R\$ 84.883,79
30	R\$ 85.291,07
31	R\$ 86.082,60
32	R\$ 87.015,40
33	R\$ 77.738,44
34	R\$ 78.351,98
35	R\$ 78.694,25
36	R\$ 79.467,22
37	R\$ 71.192,29
38	R\$ 71.247,47
39	R\$ 71.405,67
40	R\$ 71.689,07
41	R\$ 72.457,96
42	R\$ 72.884,97
43	R\$ 64.794,64
44	R\$ 64.729,06
45	R\$ 64.890,65
46	R\$ 65.365,38
47	R\$ 65.880,02
48	R\$ 66.552,41
49	R\$ 66.765,94
50	R\$ 67.497,05
51	R\$ 68.653,95
52	R\$ 59.820,24
53	R\$ 60.006,11
54	R\$ 59.975,79
55	R\$ 60.023,33

Tabela 4 – Valor total do custo de lavagem com a perda de energia.

56	R\$	60.285,96
57	R\$	60.621,04
58	R\$	61.127,36
59	R\$	61.760,44
60	R\$	62.461,69
61	R\$	63.392,28
62	R\$	64.189,74
63	R\$	64.986,43
64	R\$	66.174,27
65	R\$	56.976,69
66	R\$	57.132,57
67	R\$	57.374,90
68	R\$	57.502,86
69	R\$	57.761,56
70	R\$	57.947,13
71	R\$	58.326,18
72	R\$	58.690,81
73	R\$	58.880,42
74	R\$	59.340,02
75	R\$	59.765,10
76	R\$	59.995,81
77	R\$	60.556,70
78	R\$	61.187,97
79	R\$	61.932,16
80	R\$	62.461,61

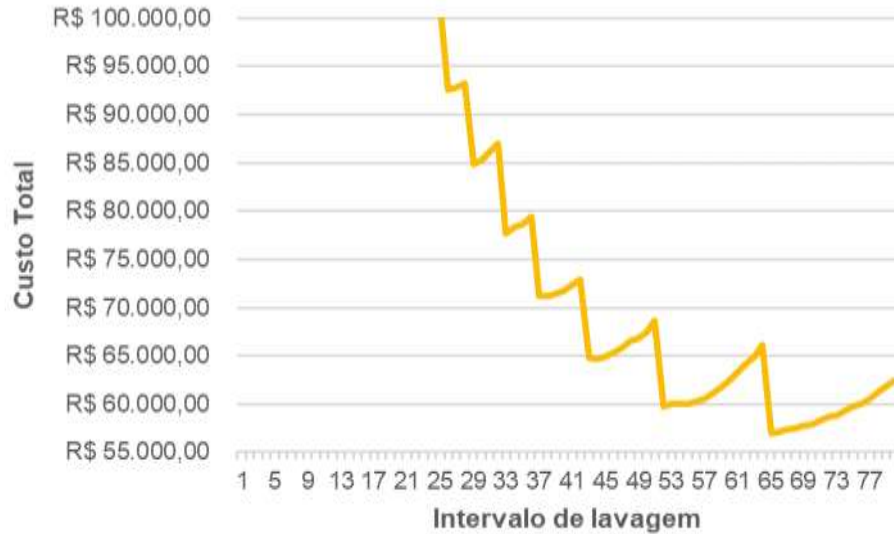
Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Devido à presença do operador resto na função de custo do problema de otimização, este problema configura-se como um problema de otimização não linear. Porém, por ser resolvido para uma única variável discreta e limitada, sua solução pode ser encontrada pelo método da varredura, quando a função de custo é calculada para cada um dos valores possíveis de serem assumidos pela variável independente. Neste caso, a variável independente é o número n de dias entre limpezas, que varia de unidade entre 1 e 80 dias.

Percorrendo os diferentes valores de n , observa-se que o menor custo de operação é obtido com um intervalo de 65 dias entre limpezas. O Gráfico 12 apresenta a Tabela 4 em forma de curva, onde observa-se que o custo vai reduzindo até seu valor mínimo em 65 dias. Como o número de limpezas realizadas em todo o intervalo é um número inteiro, o custo total da realização das limpezas é truncado no cálculo, pois não existem limpezas decimais. Isso faz com que o valor do custo de operação não decresça continuamente. O número de limpezas permanece estável com o aumentar de n até que a razão $256/n$ resulte em um número inteiro. Ao mesmo tempo, o custo da energia perdida por conta da sujidade aumenta proporcionalmente ao incremento de n . Desta forma, o valor do custo de operação da usina

aumenta até que a próxima quantidade inteira de limpezas seja determinada. Por isso o gráfico apresenta picos de crescimento.

Gráfico 12 – Custo de operação em função do número de dias entre limpezas.

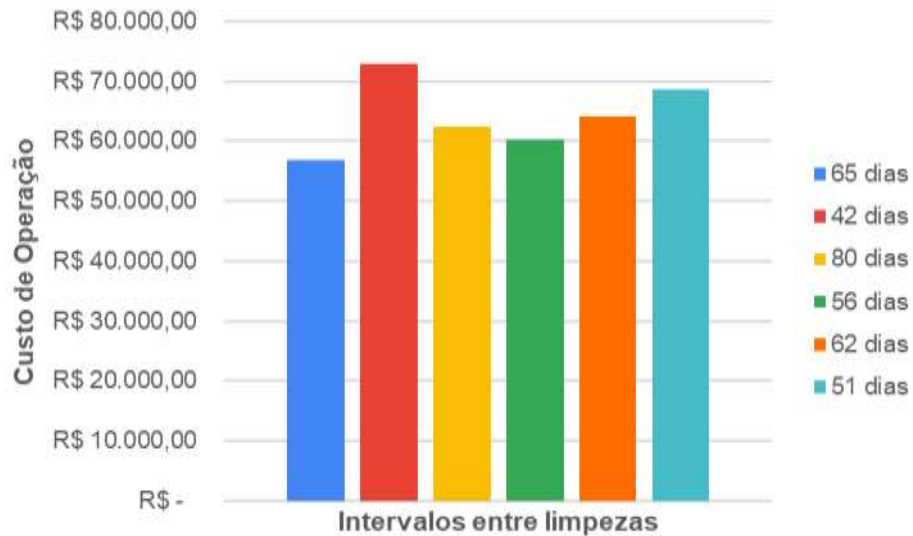


Fonte: Produção do próprio autor (2022).

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS DE LIMPEZAS

Realizando a comparação entre os custos de operação das limpezas realizadas e o custo ótimo encontrada, obtém-se o Gráfico 13.

Gráfico 13 – Comparação entre os custos de operação das limpezas realizadas na usina e o custo ótimo.

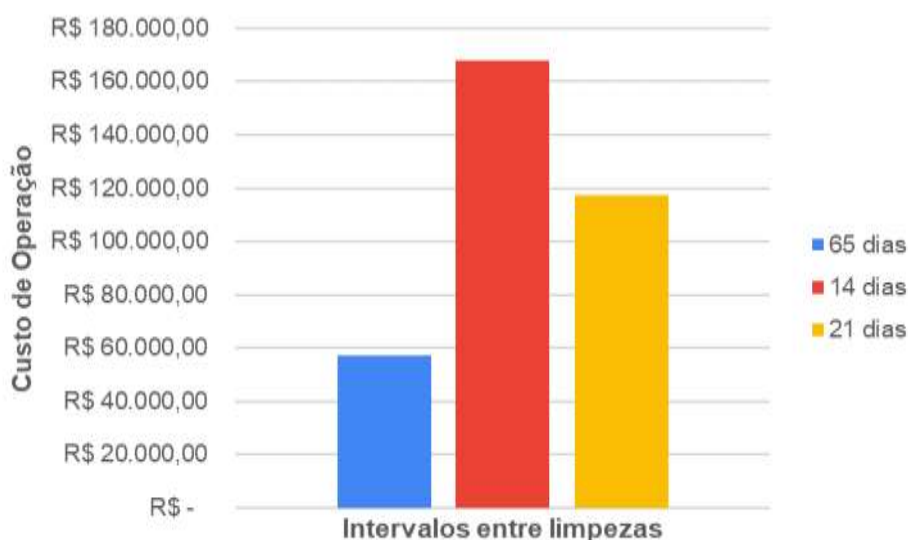


Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Analisando o Gráfico 13 nota-se que os intervalos entre limpezas efetivamente realizados na usina de Goiânia foram de 42 dias, para o primeiro intervalo, de 224 dias, para o segundo intervalo, de 56 dias, para o terceiro intervalo, de 62 dias, para o quarto intervalo e de 51 dias, para o quinto intervalo. Nenhum dos intervalos entre as limpezas realizadas apresentou a duração ótima encontrada para essa usina, contudo o segundo intervalo foi aquele que apresentou o menor custo de operação.

No Gráfico 14, compara-se o custo de operação do intervalo ótimo com os intervalos sugeridos por Kalogirou, Agathokleous e Panayiotou (2013).

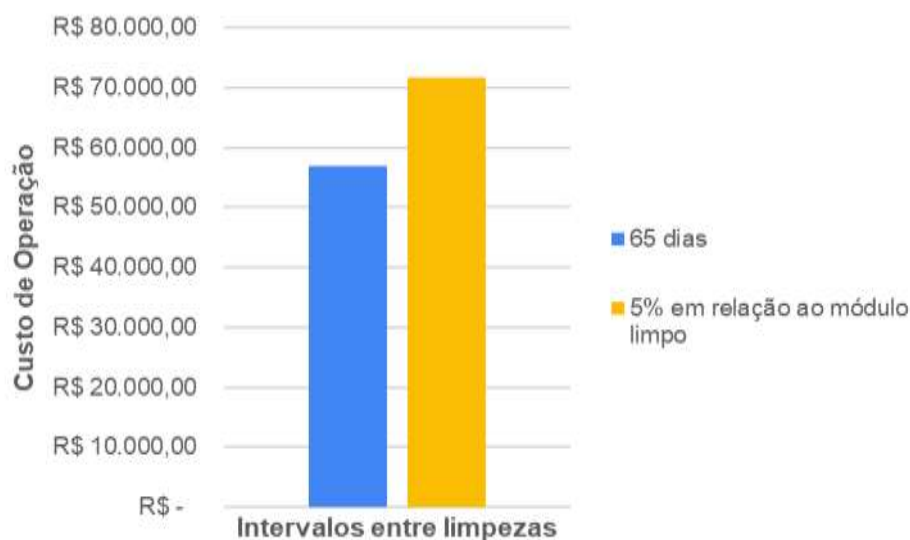
Gráfico 14 – Comparação entre os custos de operação ótimo e de Kalogirou, Agathokleous e Panayiotou (2013).



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

No Gráfico 15, compara-se o custo que seria obtido caso a limpeza fosse realizada sempre que a perda alcançasse 5% em relação a eficiência do módulo limpo (JIANG et al., 2016), o que corresponde a um n de cerca de 40 dias.

Gráfico 15 – Comparação entre os custos de operação de limpezas ótimas e caso a perda alcance 5% em relação ao módulo limpo .



Fonte: Produção do próprio autor (2022).

Analisando os Gráficos 14 e 15, observa-se que, entre os métodos sugeridos na literatura, aquele que mais se aproxima do menor custo de operação obtido, foi o método que sugere que a limpeza seja feita sempre que a perda alcançar 5% em relação à eficiência do módulo limpo (JIANG et al., 2016).

Inserindo o intervalo de 65 dias na equação (21), encontra-se a taxa de desempenho de 62,5%, ou seja, entre julho de 2020 e dezembro de 2021 o momento ideal de limpar os módulos foi quando a perda alcançou 7,5% em relação à eficiência do módulo limpo.

Para esse trabalho, realizou-se uma análise a retrospecto apenas. Não se teve, também, não foi realizado um tratamento estatístico dos dados para tentar extrair um comportamento genérico da planta. Por isso, o modelo estudado não permite extrapolar esse comportamento para outras usinas ou mesmo para a mesma usina, mas no futuro.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Avaliando as limpezas realizadas entre julho de 2020 até dezembro de 2021, foi possível estudar a taxa de desempenho, extraindo dados da plataforma de monitoramento de uma usina fotovoltaica localizada em Goiânia.

Encontrando-se as perdas energéticas entre as limpezas realizadas e aplicando o método de otimização por varredura, obteve-se o menor custo operacional da usina. Esse custo engloba a perda por sujidade e os gastos de se realizar a limpeza na planta.

Dos resultados obtidos, observa-se que o intervalo entre limpezas que apresenta menor custo operacional é aquele composto por 65 dias. Por isso, para o intervalo estudado, considera-se 65 dias o intervalo ótimo para a usina de Goiânia. Esse intervalo corresponde a 7,5% da queda de desempenho da usina.

Nesse trabalho, não foi considerada a influência da chuva. Como sugestão para futuros trabalhos, aponta-se o emprego de um pluviômetro para obter dados de precipitação nas usinas e estudar a relação da perda da taxa de desempenho por sujidade no sistema com os dias de chuva na usina. Registros referentes a momentos em que ocorreram intercorrências como queda de energia, perda de comunicação, queima de equipamentos, etc., que influenciam no desempenho da usina, podem ser suprimidos de maneira a reduzir o número de variáveis espúrias que podem afetar a determinação do comportamento da taxa de desempenho.

Outra sugestão é levar em consideração a duração exata do procedimento de limpeza dos módulos fotovoltaicos, já que, neste trabalho considerou-se que a usina é limpa em apenas um dia. Esta consideração pode afetar os resultados uma vez que durante a realização das limpezas a usina deve permanecer inoperante, aumentando o custo operacional do procedimento.

A avaliação concentrou-se na análise de um evento passado. Sugere-se que sejam empregadas ferramentas estatísticas que permitam a extrapolação dos dados para a determinação de uma escala de limpeza ideal para procedimentos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. **Geração de Energia Solar no Brasil pode quadruplicar até 2029.** 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-de-energia-solar-no-brasil-pode-quadruplicar-ate-2029/> Acesso em: 10 abr. 2021.

AYRÃO, V. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Conceitos, Aplicações e Estudos de caso.** Rio de Janeiro: Copper Alliance, 2018.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL **Relatório Síntese 2021.** 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf

CONCEIÇÃO, R., SILVA, H. G., FIALHO, L., LOPES, F. M., COLLARES-PEREIRA, M. PV system design with the effect of soiling on the optimum tilt angle. **Energy**, Portugal, v.133, p.787–796. 2019

COMERIO, A. **Avaliação do impacto de sujidade de módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

HICKEL, B. M. **O impacto no desempenho de sistemas fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos fv – metodologia e avaliação através de curvas i_{ix} em campo.** Florianópolis: UFSC, 2017. Dissertação.

JIANG, Y., LU, L., LU, H. A novel model to estimate the cleaning frequency for dirty solar photovoltaic (PV) modules in desert environment. **Energy**, Portugal, v.140, p.236–240. 2016.

KALOGIROU, S.A., AGATHOKLEOUS, R., PANAYIOTOU, G. On-site PV characterization and the effect of soiling on their performance. **Energy**, Portugal, v. 51, p.439–446. 2013.

KLEMENS ILSE, LEONARDO MICHELI, BENJAMIN W. FIGGIS, KATJA LANGE, DAVID DABLER, HAMED HANIFI, FABIAN WOLFERTSTETTER, VOLKER NAUMANN, CHRISTIAN HAGENDORF, RALPH GOTTSCHALG, JORG BAGDAHN. OPTIMUM. Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation. **Joule**, U.S.A, v. 3, p. 2314-2320. 104173, Out.2018.

LORENZO, E.; MORETÓN, R.; LUQUE, I. Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns. v. 00, 1994.

NASCIMENTO, L. R. **Performance Assessment of Solar Photovoltaic Technologies Under Different Climatic Conditions in Brazil.** Florianópolis, 2019.

PEREIRA, E. B. .; MARTINS, F. R. ; GONÇALVES, A. R. ; COSTA, R. S. ; LIMA, F. L. ; RÜTHER, R. ; ABREU, S. L. ; TIEPOLO, G. M. ; PEREIRA, S. V. ; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

P.M. RODRIGO, S. GUTIÉRREZ, L. MICHELI, E.F. FERNÁNDEZ, F.M. ALMONACID. Optimum cleaning schedule of photovoltaic systems based on levelized cost of energy and case study in central Mexico. **Munich Personal RePEc Archive**, Aguascalientes, México, n. 104173, p. 15-17, Jan. 2021.

SARVER, T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p.698–733, 2013.

ZORRILLA-CASANOVA, J. et al. Analysis of dust losses in photovoltaic modules. CONGRESSO MUNDIAL DE ENERGIA RENOVÁVEL, 2011, Suécia. **Anais [...]**. Julho 2014, p. 2985–2992.

MARION, B., et al. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. In: 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition. Lake Buena Vista, Florida, 2005.

MURDOCK, H.; GIBB, D.; ANDRÉ, T. et al. Global status report. Renewables now, France, v.21, Junho 2021.

BEVINGTON, P. R. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. New York, McGraw-Hill, 1969.

CHATTERJEE, S.; HADI, A.; AND PRICE, B. "Simple Linear Regression." Ch. 2 in Regression Analysis by Example, 3rd ed. New York, Wiley, pp. 21-50, 2000.

WILTON DE O. BUSSAB; PEDRO A. MORETTIN **Estatística Básica**, v. 6, p.48–50, 2010.