

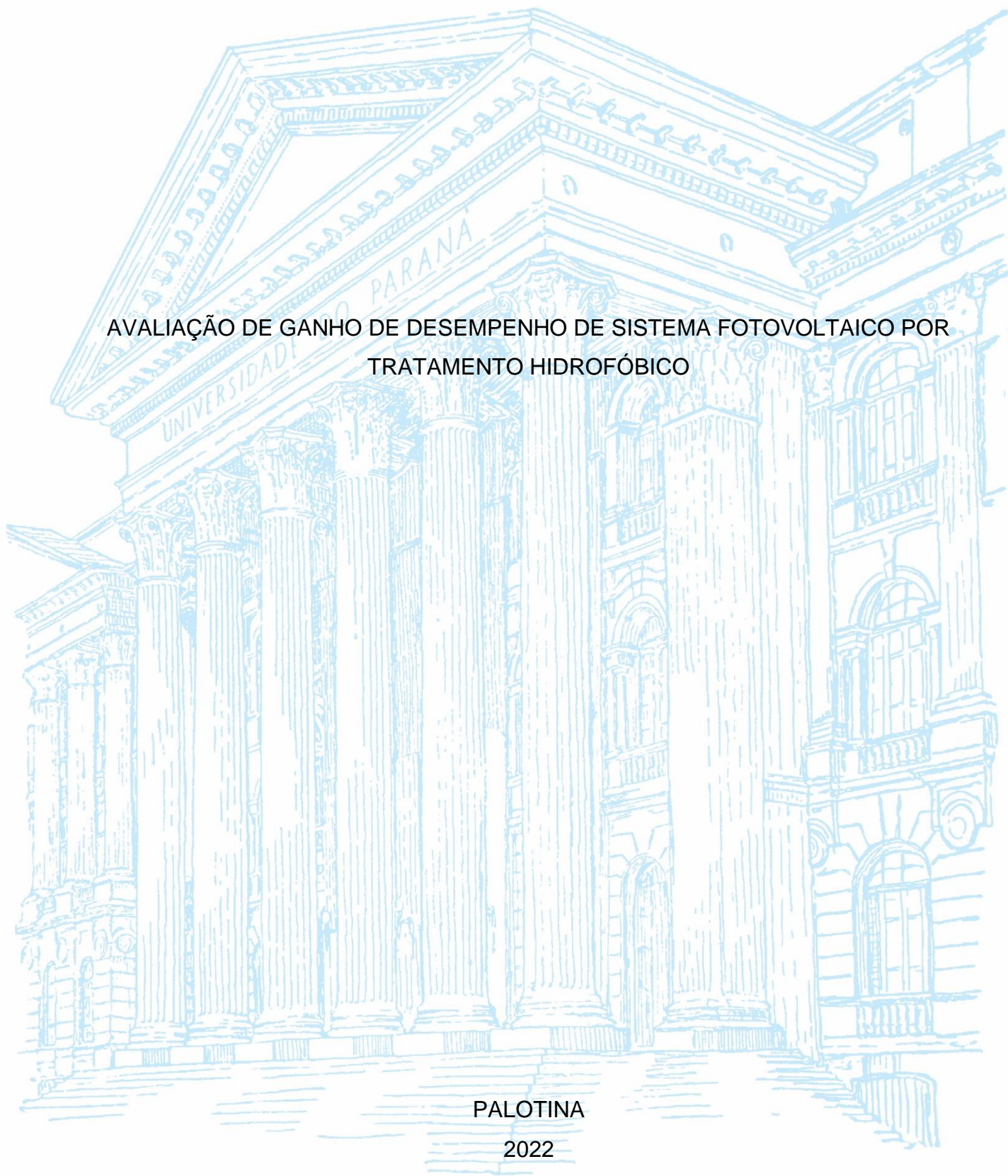
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIEGO FILIPE JARES

AVALIAÇÃO DE GANHO DE DESEMPENHO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO POR
TRATAMENTO HIDROFÓBICO

PALOTINA

2022



DIEGO FILIPE JARES

AVALIAÇÃO DE GANHO DE DESEMPENHO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO POR
TRATAMENTO HIDROFÓBICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, como requisito à obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Romani.

PALOTINA

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

Aos dezesseis dias do mês de setembro do ano de 2022, no horário das 13h30min às 15h00min horas, na sala de aula 20, Bloco Didático IV - UFPR - *Campus Palotina*, compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o aluno Diego Filipe Jares, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "Avaliação de ganho de desempenho de sistema fotovoltaico por tratamento hidrofóbico". Constituíram a Banca Examinadora os professores: Prof. Dr. Maurício Romani (Orientador e Presidente da Banca), Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira e Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken. O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Maurício Romani, nota: 90 (noventa), Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira, nota: 90 (noventa), e Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken, nota: 90 (noventa)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **90 (noventa)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO ROMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2022, às 09:51, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOEL GUSTAVO TELEKEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2022, às 09:53, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2022, às 10:28, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4625180** e o código CRC **312C8C91**.

Dedico esse trabalho a Deus, minha família, namorada e amigos que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças durante toda essa trajetória. A minha mãe Edna, meu pai Romildo, meu tio Anselmo, e toda a minha família. Esta conquista é nossa.

Agradeço a minha namorada Erica por todo amor, paciência, carinho e apoio durante esse período, a todos meus amigos que sempre estiveram do meu lado ao longo desses anos e aos amigos que o curso me proporcionou, dividindo as dores e alegrias dessa caminhada.

Agradeço aos meus professores do curso de Engenharia de Energia do setor Palotina que ajudaram na minha aprendizagem, que contribuiu para meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço a banca avaliadora, professores Adriana e Joel, por aceitarem o convite e contribuírem com esse trabalho e com a minha formação. Assim como ao meu orientador Maurício Romani, pelos ensinamentos, orientação e suporte para tornar esse trabalho possível.

RESUMO

O presente trabalho teve o objetivo de avaliar o impacto em ganho de produtividade energética resultante do tratamento hidrofóbico aplicada a superfície de módulos fotovoltaicos (MFV). Para tal, foi realizado um estudo sobre um gerador fotovoltaico (GFV) *on-grid* de 40,15 kWp operação. O GFV escolhido é composto por 3 (três) arranjos-série (*strings*) de MFV, todos de mesma marca, montados em estruturas metálicas fixadas diretamente em solo, com mesmos ângulos de inclinação (18°), com orientação azimutal norte. Todos os módulos foram instalados na mesma data e ficaram sujeitos a condições solarimétricas, climatológicas e de sujidade muito próximas, devido sua instalação no mesmo local. A metodologia consistiu em realizar a limpeza manual de duas *strings* completas no dia 31/07/2022 (t_0), às 17:00 horas, aproximadamente 5 meses após a instalação do GFV – sendo ainda nesta mesma data realizado tratamento hidrofóbico de uma das *strings* previamente limpa. Desta forma, configurou-se um cenário de estudo por escolha aleatória, onde foi definida “S1” como a *string* cujos módulos fotovoltaicos foram limpos e também tratados com produto hidrofóbico, “S2” como a *string* onde nenhuma intervenção de limpeza foi realizada desde a data da instalação do GFV e “S3” sendo a *string* onde foi apenas efetuada limpeza manual. A cada 6 minutos, valores de potência gerada em corrente contínua (kW) de cada *string* foram coletados diretamente do inversor *on-grid* do GFV. O período de avaliação foi de 01/08/2022 à 01/09/2022, cobrindo um mês antes e um mês após a data “ t_0 ” do presente estudo. Os dados de potência (W) foram processados via integração numérica para obtenção da produtividade de energia (kWh/kWp) de cada *string* para cada dia do período avaliado. Por fim, três comparativos foram realizados, sendo confrontados os resultados das diferenças de produtividade, pelas quais foi possível inferir um ganho médio diário de +0,05 kWh/kWp obtido apenas no primeiro mês após aplicado o produto hidrofóbico, em relação a condições onde somente a limpeza comum foi efetuada. Este resultado representou um ganho de +1,04% em energia gerada (kWh) a mais em relação a *string* que foi higienizada, mas não recebeu tratamento hidrofóbico. Levando em consideração projeções de aumento de sujidade sobre a superfície dos módulos e o tempo estipulado para reaplicação do produto hidrofóbico, é possível estimar que o ganho total ao final da vida útil em um projeto desse porte (25 anos) pode chegar a 18,07 MWh.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Sujidade. Tratamento de superfície. Produto hidrofóbico. Efeito autolimpante. Eficiência na geração de energia.

ABSTRACT

The present essay aimed to evaluate the impact on energy productivity gain resulting from the use of a new hydrophobic treatment technology applied to the surface of photovoltaic modules. For this purpose, a study was performed on a 40,15 kWp on-grid photovoltaic system (PVS) in full field operation. The chosen PVS is composed of 3 (three) string arrangements of photovoltaic modules, all of the same brand, mounted on metallic structures fixed directly on the ground, with the same tilt angles (18°), with azimuthal north orientation. All the modules were installed on the same date and were subject to very similar solar metric, climatological and dirt conditions, due to their installation in the same place, the methodology consisted in performing the manual cleaning of 2 complete strings on 07/31/2022 (t_0), at 5:00 p.m., approximately 5 months after the installation of the PVS - being also performed on this same date a hydrophobic treatment of one of the strings previously cleaned. This way, a study scenario was configured by random choice, where "S1" as the string defined as the string whose photovoltaic modules were cleaned and also treated with hydrophobic product, "S2" as the string where no cleaning intervention was performed since the PVS installation date and "S3" as the string that was only cleaned manually at date " t_0 ". Data with 6 minutes resolution, referring to the values of generated power in continuous current (kW) of each string were collected directly from the on-grid inverter of the PVS. The evaluation period was from 08/01/2022 to 09/01/2022, covering one month before and one month after to " t_0 " date of the present study. The power data (W) were processed via numerical integration to obtain the power productivity (kWh/kWp) of each string for each day of the evaluated period. Finally, three comparisons were performed, comparing the results of the differences in productivity, by which it was possible to infer an average daily gain of + 0,05 kWh/kWp obtained only in the first month after applying the hydrophobic product, in relation to conditions where only ordinary cleaning was performed. This gain represented + 1,04% more energy generated compared to the string that was sanitized but not hydrophobic treated. Taking into account projections of increased dirt on the surface of the modules and the stipulated time for reapplication of the hydrophobic product, the total gain at the end of the useful life in a project of this size (25 years) can reach 18,069 MWh.

Keywords: Solar energy. Surface treatment. Hydrophobic product. Self-cleaning effect. Efficiency in energy generation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	20
FIGURA 2 – COMPONENTES DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	21
FIGURA 3 – INVERSOR FOTOVOLTAICO ON-GRID.....	22
FIGURA 4 – CIRCUITO ELÉTRICO INVERSOR FOTOVOLTAICO <i>ON-GRID</i>	23
FIGURA 5 – REDUÇÃO DA INTENSIDADE SOLAR À DEPOSIÇÃO DE POEIRA..	24
FIGURA 6 – LIMPEZA DE MFV – AGENTES	25
FIGURA 7 – DIAGRAMA DE GOTAS SOBRE SUPERFÍCIES COM DIFERENTES GRAUS DE MOLHABILIDADE E VALORES CORRESPONDENTES DE ÂNGULOS DE CONTATO	26
FIGURA 8 – EFEITO AUTOLIMPANTE DE SUPERFICIE HIDROFÓBICA.....	27
FIGURA 9 – MICRO USINA FOTOVOLTAICA.	29
FIGURA 10 – DIAGRAMA UNIFILAR DO GFV	31
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICO	33
FIGURA 12 – LIMPEZA MANUAL DOS MFV DA “S1”	34
FIGURA 13 – LIMPEZA MANUAL DOS MFV DA “S3”.....	34
FIGURA 14 - ENXAGUE COM ÁGUA CORRENTE DA “S1”	35
FIGURA 15 - REMOÇÃO DO EXCESSO DE ÁGUA SOBRE A SUPERFÍCIE DOS MFV DA “S1”	36
FIGURA 16 - APLICAÇÃO PRODUTO HIDROFÓBICO.	36
FIGURA 17 - TESTE DE HIDROFOBIA NOS MFV DA “S1”	37

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - POTÊNCIAS NORMALIZADAS DE CADA <i>STRING</i> (19/07/2022).	40
GRÁFICO 2 - POTÊNCIAS NORMALIZADAS E CADA <i>STRING</i> (03/08/2022)	41
GRÁFICO 3 – GANHO DE PRODUTIVIDADE ENTRE <i>STRINGS</i>	42
GRÁFICO 4 - GANHO DE PRODUTIVIDADE ENTRE “S1” E “S2” EM RELAÇÃO AO GANHO DE PRODUTIVIDADE ENTRE “S3” E “S2”	43
GRÁFICO 5 - GANHO DE PRODUTIVIDADE POR TRATAMENTO HIDROFÓBICO ENTRE “S1” E “S3”	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERISTICAS ELÉTRICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO NO STC.....	30
TABELA 2 – CARACTERISTICAS ELÉTRICAS DO INVERSOR.	30

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS E SÍMBOLOS

CA	- Corrente alternada
CC	- Corrente continua
GD	- Geração distribuída
GFV	- Gerador fotovoltaico
MFV	- Módulo fotovoltaico
MPPT	- <i>Maximum Power Point Tracking</i>
SFCR	- Sistema fotovoltaico conectado à rede
STC	- <i>Standard Test Conditions</i>
kWh	- Quilo watt hora
kWp	- Quilo watt pico
Δ	- Letra Maiúscula Delta
Υ	- Letra Maiúscula úpsilon

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	20
2.2 MÓDULOS E INVERSORES FOTOVOLTAICOS	21
2.3 SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	23
2.4 PERDAS POR SUJIDADE EM SFCR	24
2.5 LIMPEZA DE SFCR	25
2.6 SUPERFÍCIES HIDROFÓBICAS	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA AVALIADO	29
3.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	32
3.4 MÉTODOS DE LIMPEZA PARA "S1" E "S3"	33
3.4.1 PROCESSAMENTO DE DADOS DE ENERGIA GERADA EM CADA <i>STRING</i>	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 POTÊNCIA INJETADA POR <i>STRING</i>	40
4.2 RESULTADOS DE PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA	42
4.3 GANHOS DE PRODUTIVIDADE EM RELAÇÃO A <i>STRING</i> REFERÊNCIA	43
4.4 GANHO DE PRODUTIVIDADE POR TRATAMENTO HIDROFÓBICO	43
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O interesse em geração de energia fotovoltaica no Brasil é crescente, por tratar-se de uma fonte de energia limpa e de alto potencial de geração. Comparando com a Alemanha, a Região Sul do Brasil possui uma radiação média superior, confirmando condições favoráveis para este tipo de fonte (SOARES JUNIOR; CRUZ; AMARAL, 2018).

Um sistema fotovoltaico se vale do efeito fotovoltaico que ocorre com a incidência de radiação solar em células fotovoltaicas. Tais células são compostas principalmente por silício ultrapuro e dopadas com outros elementos químicos (boro e fósforo, por exemplo) para potencializar o efeito fotovoltaico na conversão da energia da radiação solar em eletricidade. Quando conectado à rede, um sistema gerador fotovoltaico (GFV) normalmente é composto basicamente por determinado número de módulos fotovoltaicos (MFV) arranjados em série e/ou paralelo e por inversores de frequência *on-grid* para conversão da corrente contínua, gerada pelos MFV, para corrente alternada, compatível com o padrão das redes elétricas (SOARES JUNIOR; CRUZ; AMARAL, 2018, SULAIMAN et al., 2014).

De acordo com Barbosa, Faria e Gontijo (2018), o desempenho energético das células fotovoltaicas depende diretamente da incidência solar, sendo importante fazer sua limpeza periodicamente, para que seja captado o máximo de fótons incidentes nas mesmas. Estudos apontam que perdas no desempenho dos GFV devido a deposição de sujeira podem variar de 15 a 30% (SARVER, AL- QARAGHULI E KAZMERSKI et al., 2013).

Segundo Mani e Pillai (2010), existem dois parâmetros diferentes e dependentes que influenciam no acúmulo de sujeira em MFV: as propriedades das partículas e o ambiente onde o sistema fotovoltaico foi instalado. Cada partícula de poeira tem peso, tamanho, forma e composição específica. Além disso, a superfície dos MFV, em geral, não é totalmente lisa, permitindo acúmulo de sujeira no decorrer do tempo (MAGHAMI et al., 2015).

O efeito de acúmulo de sujeira pode ser minimizado por uma limpeza natural proporcionada pela incidência de chuvas, sendo observado que, em locais com maior frequência de chuva, menores são os efeitos da sujeira em relação ao desempenho do GFV. Da mesma forma, MFV instalados com maiores ângulos de inclinação

apresentam maior propensão a limpeza natural por precipitações pluviométricas (ARAUJO; RANK; BUENO, 2016).

Conforme Glier e Trindade (2020), nos últimos anos, revestimentos hidrofóbicos, super hidrofóbicos e autolimpantes vem ganhando foco tanto em pesquisas acadêmicas quanto em aplicações industriais. Tratamentos de superfícies já vem sendo realizados em metais visando diminuir o ângulo de contato da água, reduzindo a área de contato do líquido com o metal, tornando-o menos suscetível a oxidação. Alguns estudos apontam, inclusive, a aplicabilidade deste tipo de revestimento de superfície sobre MFV:

Esses revestimentos possuem inúmeras utilidades quando aplicados sobre o vidro, melhorando visibilidade e transparência em condições climáticas adversas, podendo ser aplicados em janelas de prédios, vidros automotivos, box de banheiro, placas de captação de energia solar, dentre outros. (Oliveira, 2011, p.2).

Dessa maneira, estudos que avaliem a influência destes tipos de tratamentos de superfícies de MFV sobre o rendimento energético do GFV poderiam auxiliar na estimativa de possíveis ganhos de desempenho deste tipo de fonte, visando um aumento no fator de capacidade em usinas de pequeno, médio e grande porte.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o impacto da aplicação de um tratamento hidrofóbico na superfície de MFV sobre a produtividade energética de um GFV conectado à rede.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar a diferença de potência injetada por MFV submetidos a três condições: MFV com sujidade, MFV limpos manualmente e MFV limpos manualmente e tratados com produto hidrofóbico;

- Avaliar, de forma normalizada, a produtividade energética diária em kWh/kWp de cada arranjo de MFV em estudo;
- Analisar os ganhos em produtividade resultantes no arranjo de MFV limpo manualmente sem tratamento hidrofóbico;
- Analisar os ganhos em produtividade resultantes no arranjo de MFV limpo manualmente com tratamento hidrofóbico;
- Evidenciar o ganho médio em produtividade energética (kWh/kWp) obtido especificamente com a aplicação do tratamento hidrofóbico sobre a superfície dos MFV frente a uma limpeza convencional.

1.2 JUSTIFICATIVA

O crescimento no número de Geradores Fotovoltaicos (GFV) instalados nos últimos anos no Brasil é fruto de um mercado muito aquecido, tanto para a compensação da energia gerada na forma de micro e minigeração distribuída, quanto para fins de comercialização de energia. Neste contexto, a busca por ganhos de produtividade neste tipo de sistema passa pela avaliação de parâmetros relacionados às perdas de seu rendimento. A sujidade de módulos fotovoltaicos se encontra dentre os principais fatores, sendo avaliada por vários estudos sua influência nas perdas de geração, bem como estratégias para minimizar seus impactos, seja via limpeza manual periódica ou natural por precipitação.

Em GFV, com o passar do tempo, é comum o acúmulo de sujidade sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos (MFV), seja esta sujidade vinda de dejetos de insetos e aves, poeira, fuligem ou outros fatores. Para o serviço de limpeza, equipes especializadas são contratadas, e a recorrência das mesmas pode gerar um alto custo de manutenção. Desta forma, alternativas que venham a evitar o aumento da sujidade e diminuir a contratação especializada para limpeza de GFV podem trazer ganhos não somente em geração de energia elétrica, mas também de cunho econômico.

Dentro deste nicho, produtos hidrofóbicos e super hidrofóbicos já são utilizados em diversas aplicações industriais, principalmente em vidros, sendo esperado que este tipo de tecnologia possa ser também aplicado ao tratamento de superfície de MFV. Justificam-se, assim, estudos que visem mensurar a influência de

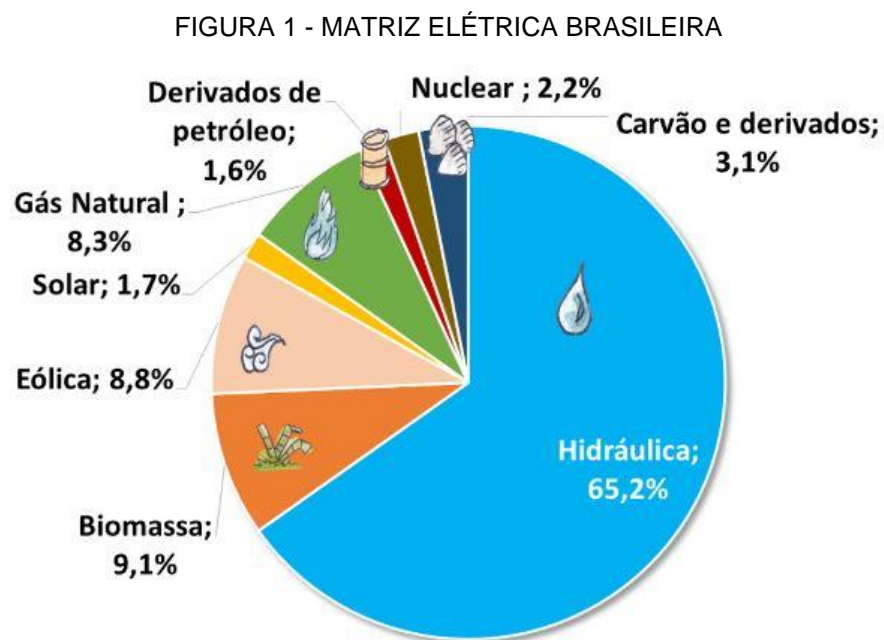
tratamentos de superfície sobre o rendimento de GFV, podendo estes reforçar avaliações de viabilidade do uso deste tipo de produto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

No cenário mundial, a energia fotovoltaica vem ganhando cada vez mais destaque, sendo uma forma de geração eficiente e não poluente ao meio ambiente, com uma alta taxa de crescimento e que, devido ao apelo mundial por energias limpas, deverá manter-se (SILVA, 2015).

De acordo com Rezende (2019), "No ano de 2017 foram instalados 99,1 GW isso levou a uma capacidade solar global total de mais de 400 GW [...]. Em 10 anos a capacidade mundial aumentou mais de 4.300%." Na FIGURA 1 mostra a matriz elétrica brasileira em 2019, com a solar fotovoltaica sendo responsável por 1,3% da matriz energética.

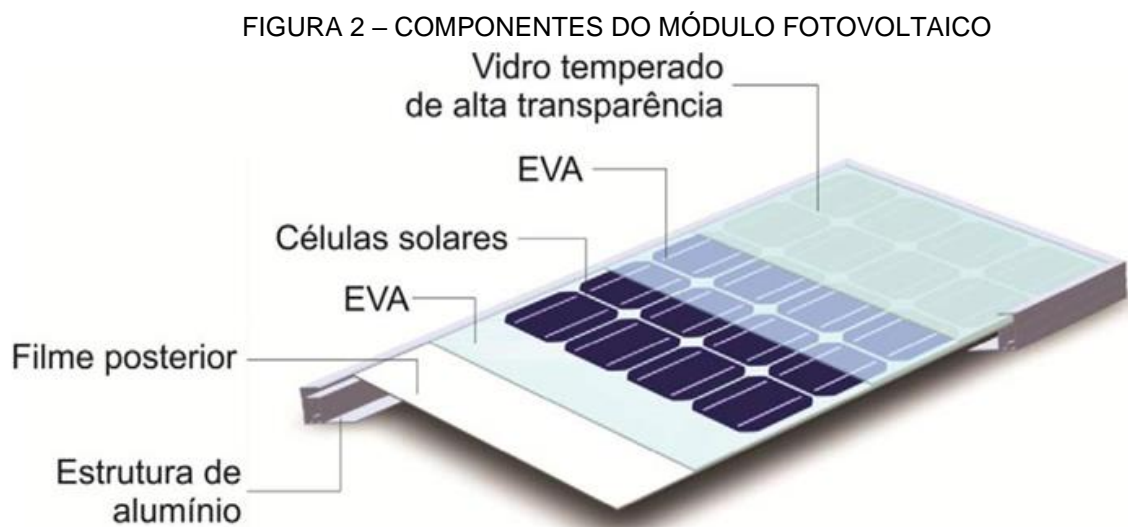


FONTE: (BEN, 2021).

O Brasil recentemente ultrapassou a marca histórica de 17 GW de potência instalada da fonte fotovoltaica em todo país. A fonte tem crescido 1 GW por mês e hoje ocupa o terceiro lugar na matriz energética brasileira, atrás das fontes eólica e hídrica (ABSOLAR,2022).

2.2 MÓDULOS E INVERSORES FOTOVOLTAICOS

Um módulo pode conter de 36 a 216 células fotovoltaicas, essas soldadas em tiras e encapsuladas para proteção de intempéries e resistência mecânica. Esse encapsulamento é formado por um “sanduíche” de um vidro temperado de alta resistência, as células fotovoltaicas, um filme isolante, e EVA (Etileno acetato de vinila) estabilizado, com uma moldura em alumínio anodizado e uma caixa com conexões elétricas, assim como mostra a FIGURA 2 (PINHO; GALDINHO,2014).



FONTE: (PINHO; GALDINHO, 2014).

Comercialmente, os MFV são identificados principalmente pela potência elétrica que atingem em condições máximas de irradiação. Este valor de potência é comumente conhecido como potência-pico, dado em Wp. A potência-pico é definida nas condições-padrão de ensaio (STC), ou seja, uma irradiância solar de 1000 W/m², massa de ar 1,5 (AM 1,5) e a temperatura da célula a 25 °C (PINHO; GALDINHO, 2014).

A tecnologia fotovoltaica destaca-se por ser bastante aplicável em cenários de geração distribuída (GD), onde o consumidor pode gerar a própria energia elétrica, abatendo de seu consumo e injetando o excedente na rede elétrica. O sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) é composto por MFV, uma estrutura metálica de fixação, cabos elétricos de conexão, um ou mais inversores de frequência *on-grid*, e equipamentos de proteção elétrica (FERREIRA, 2018).

Conforme Viana (2010), os inversores de frequência *on-grid* dos SFCR são projetados e construídos para detectar a presença da rede elétrica e passar a operar, convertendo a corrente contínua (CC), vinda dos MFV, para corrente alternada (CA) e injetando diretamente na rede, com mesma tensão, frequência e fase. Quando o inversor é desligado, cessa o fornecimento de energia a rede. A FIGURA 3 mostra um modelo de inversor fotovoltaico *on-grid*, com suas entradas *MPPT*, e captador de sinal *Wi-Fi*.

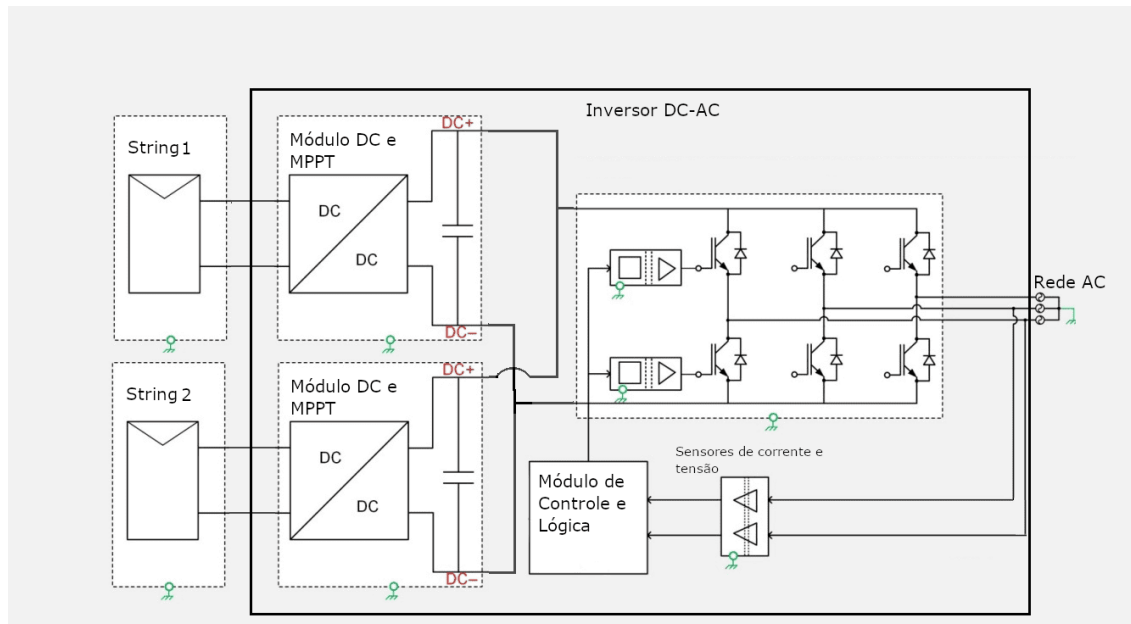
FIGURA 3 – INVERSOR FOTOVOLTAICO *ON-GRID*



FONTE: (SAT, 2022).

A faixa de operação das *MPPT*'s devem ser respeitadas para que o inversor, com a tensão injetada por cada MFV o equipamento consegue definir o ponto óptimo para melhor rendimento da potencia injetada por cada arranjo FV, na FIGURA 4 é mostrado a ligação elétrica, dentro do inversor.

FIGURA 4 – CIRCUITO ELÉTRICO INVERSOR FOTOVOLTAICO ON-GRID



FONTE: (SAT, 2022).

É possível verificar que as *strings* são separadas por *MPPT*'s diferentes, possibilitando análise de dados de corrente, tensão e potência de forma individual entre arranjos.

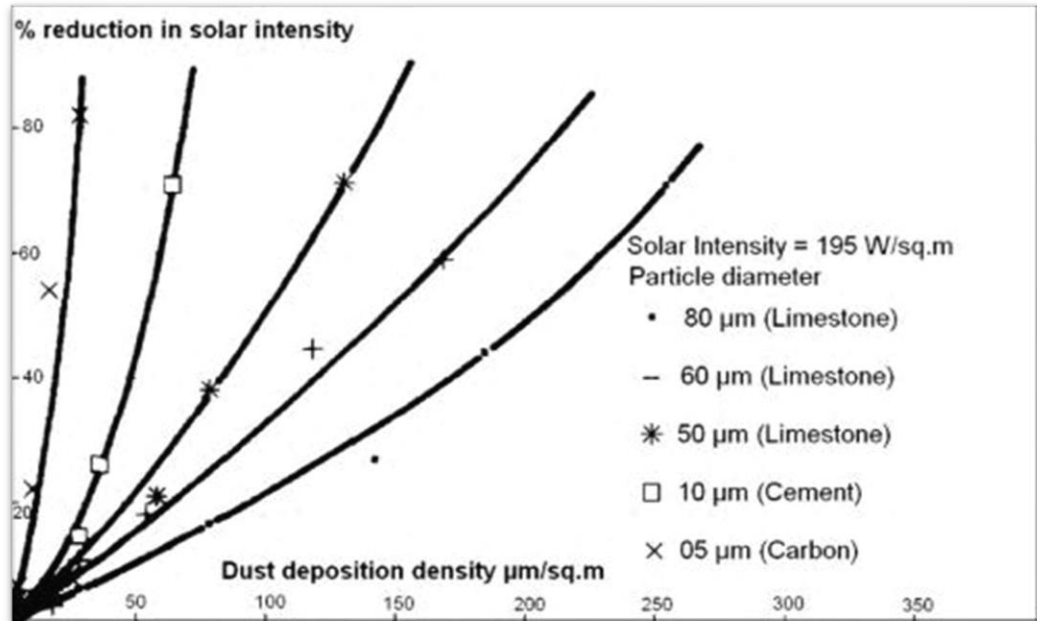
2.3 SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo Mani e Pillai (2010), existem dois parâmetros que influenciam a caracterização da acumulação de sujidade em painéis fotovoltaicos, as propriedades de poeira - tamanho, peso, componentes e formas - e o ambiente local.

A poeira depositada sobre os MFV, limita a irradiância solar efetiva que poderia atingir as células fotovoltaicas, causando perdas na conversão de energia desse sistema. Esse fenômeno é o terceiro principal fator ambiental que influencia na geração deste tipo de tecnologia (HICKEL, 2016).

Em um estudo sobre este tema, Mani e Pillai (2010), mostraram a redução da intensidade solar (em %) por densidade da deposição de poeira ($\mu\text{m}/\text{sq.m}$) para três tipos diferentes de partículas, como ilustra a FIGURA 5.

FIGURA 5 - REDUÇÃO DA INTENSIDADE SOLAR À DEPOSIÇÃO DE POEIRA



Fonte: (Mani; Pillai, 2010, El-Shobokshy; Hussein et al., 1993).

Este estudo analisou, com pó artificial, diferentes partículas de sujeira como calcário (em inglês, *Limestone*), cimento (em inglês, *Cement*) e carbono (em inglês, *Carbon*), revelando o cimento como o agente de maior impacto sobre a queda de tensão de curto-circuito (- 80%), quando ocorrida uma deposição de 73 g/m^2 de poeira. Os autores apontaram ainda que a poeira atmosférica com diâmetro médio de 80 μm a 250 g/m^2 reduziu a corrente de curto-circuito em 82% (MANI; PILLAI, 2010).

2.4 PERDAS POR SUJIDADE EM SFCR

Estudos vinculados ao desempenho de sistemas fotovoltaicos em diferentes regiões e ângulos de inclinação dos módulos apontam variações de perda por desempenho por sujeira entre 1% e 60% (HICKEL, 2017).

Para Pinho e Galdino (2014), além da perda de potência, a concentração de sujeira ainda traz risco de danos aos módulos, podendo ocasionar micro pontos de calor (em inglês, *hotspots*), os quais podem levar a uma redução considerável na vida útil das células fotovoltaicas.

O ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos tem influência direta no tamanho, densidade e distribuição das partículas depositadas sobre os módulos fotovoltaicos (SAYYAH, 2014).

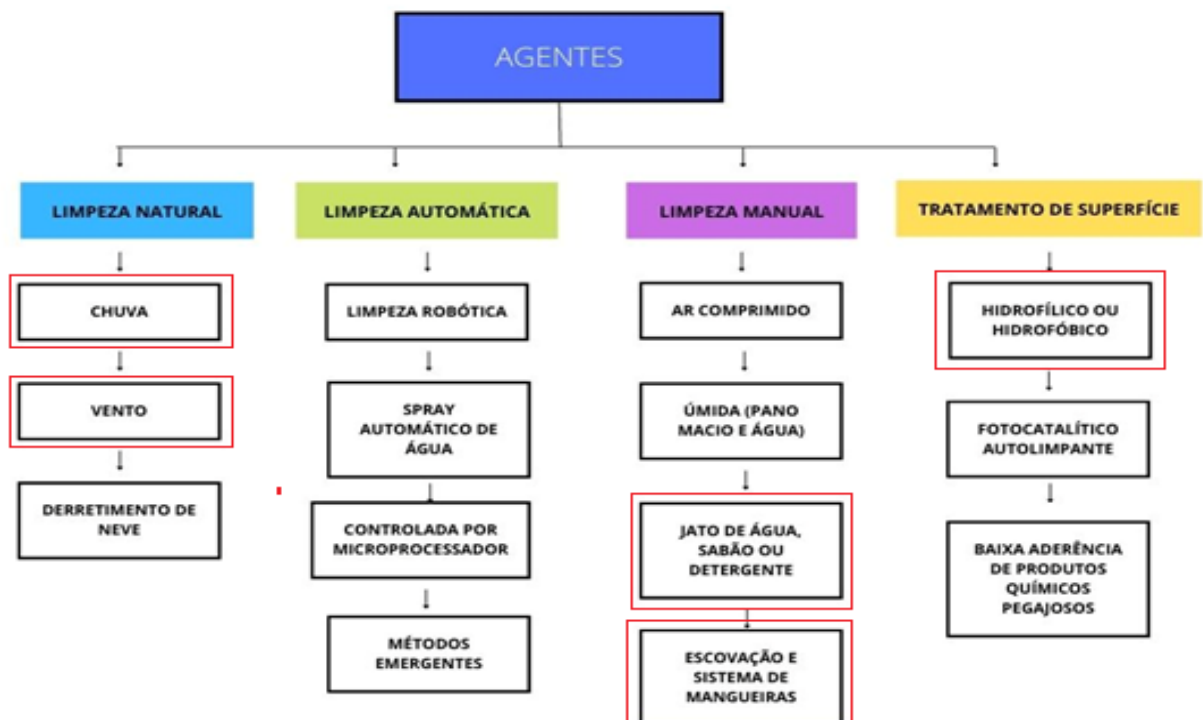
Um dos principais meios de transporte das partículas de poeira é por meio do vento, esse também responsável pela remoção da poeira já depositada. Quando os MFV se encontram em ângulos mais próximos de 90° a taxa de remoção de sujeira é maior, do mesmo modo, o diâmetro das partículas depositadas também influencia (FREITAS, 2020).

2.5 LIMPEZA DE SFCR

As técnicas de limpeza são escolhidas de acordo com a localidade de instalação de cada GFV e com a disponibilidade local de água. Em geral, é realizada de forma manual, demandando mão de obra especializada, afim de remover os resíduos depositados sobre os MFV (SHENOUDA; ABD-ELHADY; KANDIL, 2022).

Os agentes de limpeza para remoção de sujeira podem ser classificados em quatro grandes grupos, conforme exposto pela FIGURA 6.

FIGURA 6 - LIMPEZA DE MFV – AGENTES



Fonte: (Adaptado de Lemos et al., 2016).

Agentes de limpeza, tanto automática quanto manual, deve ser utilizado de forma adequada, caso contrário, a superfície do MFV poderá ficar sujeita a danos graves, como por exemplo, pontos de abrasão, riscos e aumento de opacidade.

Minimizando este tipo de risco, métodos que venham a potencializar o efeito de agentes de limpeza naturais, principalmente a chuva, vem sendo desenvolvidos. Desta forma, os agentes de limpeza via tratamento de superfícies visam abater os altos custos com mão de obra e danos causados por outros agentes (SHENOUDA; ABD-ELHADY; KANDIL, 2022).





2.6 SUPERFÍCIES HIDROFÓBICAS

Em superfície hidrofóbica a água não se espalha, ou seja, permanece em forma de esfera sobre a superfície, e um alto ângulo de contato pode ser traçado a partir da superfície tangenciando a gota de água. Quanto maior esse ângulo, mais hidrofóbica é a superfície (GLIER; TRINDADE, 2020, Fowkes et al., 1969).

A capacidade das gotículas de água rolaem sobre uma superfície enquanto recolhem os contaminantes determina a hidrofobicidade, além de medir o ângulo de contato elevado, portanto, as chuvas ou qualquer técnica de limpeza podem remover facilmente o acúmulo de poeira ou sujeira neste tipo de superfície (CRICK; PARKIN, 2011)

Conforme Law e Zhao (2015), o ângulo de contato de uma gota de qualquer líquido é um equilíbrio mecânico entre as tensões superficiais do líquido, sólido e da interação interfacial líquido-sólido. A FIGURA 7 apresenta um diagrama que mostra diferentes graus de molhabilidade sobre superfícies e valores correspondentes de ângulo de contato (OLIVEIRA, 2011).

FIGURA 7 – DIAGRAMA DE GOTAS SOBRE SUPERFÍCIES COM DIFERENTES GRAUS DE MOLHABILIDADE E VALORES CORRESPONDENTES DE ÂNGULOS DE CONTATO

Regime	Super-hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofóbico	Super-hidrofóbico
Diagrama da gota				
Ângulo de contato	$\theta < 10^\circ$	$\theta < 90^\circ$	$\theta > 90^\circ$	$\theta > 150^\circ$

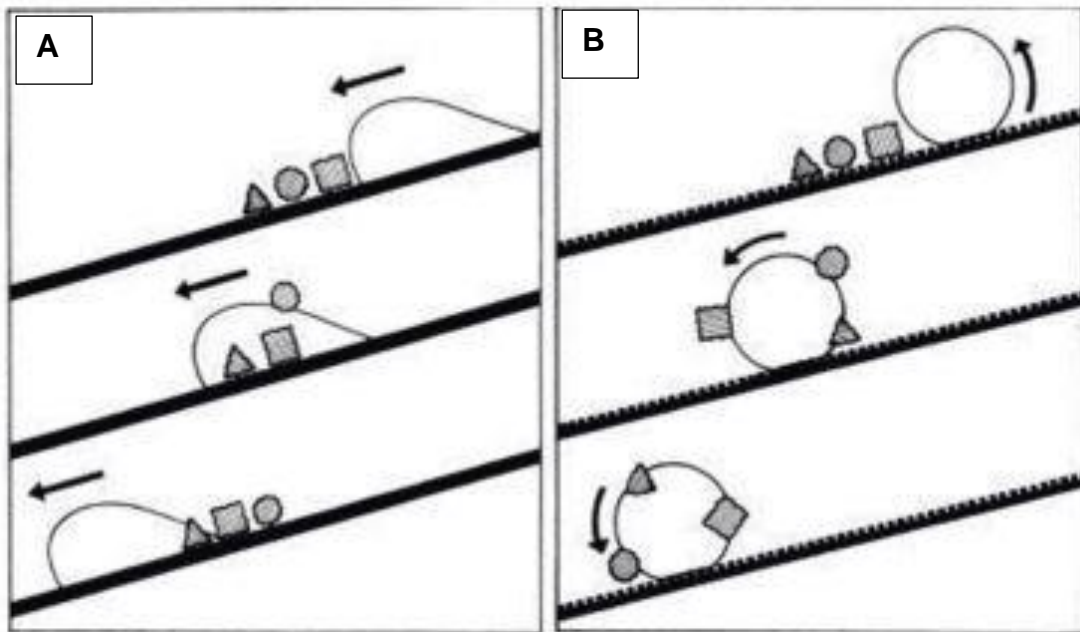
FONTE: Oliveira (2011).

2.6.1 AÇÃO AUTOLIMPANTE

Segundo Glier e Trindade (2020), He et al., (2017), as superfícies autolimpantes são definidas pela capacidade do material em manter sua superfície livre de contaminantes, evitando a deposição de sujeiras.

Um dos mecanismos vinculados as superfícies autolimpantes é a maneira como a gotícula de água se move sobre tal superfície. Quando uma gota está com alto ângulo de contato com a superfície pode rolar ao invés de deslizar, tal fenômeno, permite que partículas presentes na superfície do material sejam carregadas com o movimento de rolamento da gota (WILEY, 2013). O efeito de rolamento da gota sobre uma superfície é apresentado na FIGURA 8.

FIGURA 8 – EFEITO AUTOLIMPANTE DE SUPERFÍCIE HIDROFÓBICA



Fonte: (Glier e Trindade, 2020, Nanomateriais et al., 2017).

Nessa figura, é possível observar uma superfície não tratada (normal) (A), na qual a gota ao deslizar sobre a superfície não remove a sujeira e, em B, uma superfície super-hidrofóbica onde, ao rolar, a gota leva consigo os contaminantes, classificando-se assim, como superfície autolimpante (GLIER; TRINDADE, 2020).

A limpeza manual é um processo demorado, caro, perigoso. Por outro lado, o uso do revestimento hidrofóbico autolimpante em nano material de Si_2 aumenta a potência de saída, em 15% em comparação com o painel empoeirado e em 5% a mais

que o painel limpo manualmente e não revestido (ALAMRI; REZK; ABD-ELBARY; ZIEDAN; ELNOZAHY, 2020).

Além das características de hidrofobia ocasionadas pela aplicação do nano material de Si_2 , estudos já investigaram experimentalmente efeitos de antirreflexo. Conforme Alamri, Rezk, Abd-Elbary, Ziedan e Elnozahy (2020), descobriu-se que esse efeito pode reduzir a temperatura do MFV em cerca de 10% em comparação ao MFV não revestido e não limpo, e em 5% em comparação com o MFV limpo manualmente, mas não tratado e com o máximo de irradiação solar por dia.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA AVALIADO

O sistema fotovoltaico estudado encontra-se instalado na área urbana da cidade de Palotina, Paraná. O município está localizado ao extremo oeste do estado 24° 16' 54" latitude sul, 53° 50' 25" longitude oeste, com altitude de 341 metros.

A usina é enquadrada na microgeração e conectada à rede de distribuição de energia elétrica, sendo composta por 73 módulos fotovoltaicos montados e fixados em estrutura de alumínio no solo e com inclinação de 18,16 graus, direcionadas para o norte, (FIGURA 9).

FIGURA 9– MICRO USINA FOTOVOLTAICA



FONTE: O autor (2022).

Os módulos instalados nesse local de estudo apresentam mesma potência e características, conforme TABELA 1.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO NO STC

Potência máxima	W	550
Tensão de circuito aberto	V	49,95
Tensão de potência máxima	V	41,97
Corrente de curto-circuito	A	14,05
Corrente de potência máxima	A	13,11
Eficiência do módulo	%	21,10

FONTE: Sat (2022).

O inversor do GFV é componente determinante para a transformação da corrente contínua em corrente alternada, otimizando o ponto de máxima potência e tensão das *strings* por MPPT (sigla do inglês para, *Maximum Power Point Tracker*). A tensão de operação de cada *string* foi dimensionada respeitando a faixa de operação de cada entrada MPPT do inversor, visando maximizar a produção de energia. Nesse caso, foram utilizadas apenas três das quatro entradas disponíveis no inversor. Na TABELA 2 podemos observar as características do inversor *on-grid*.

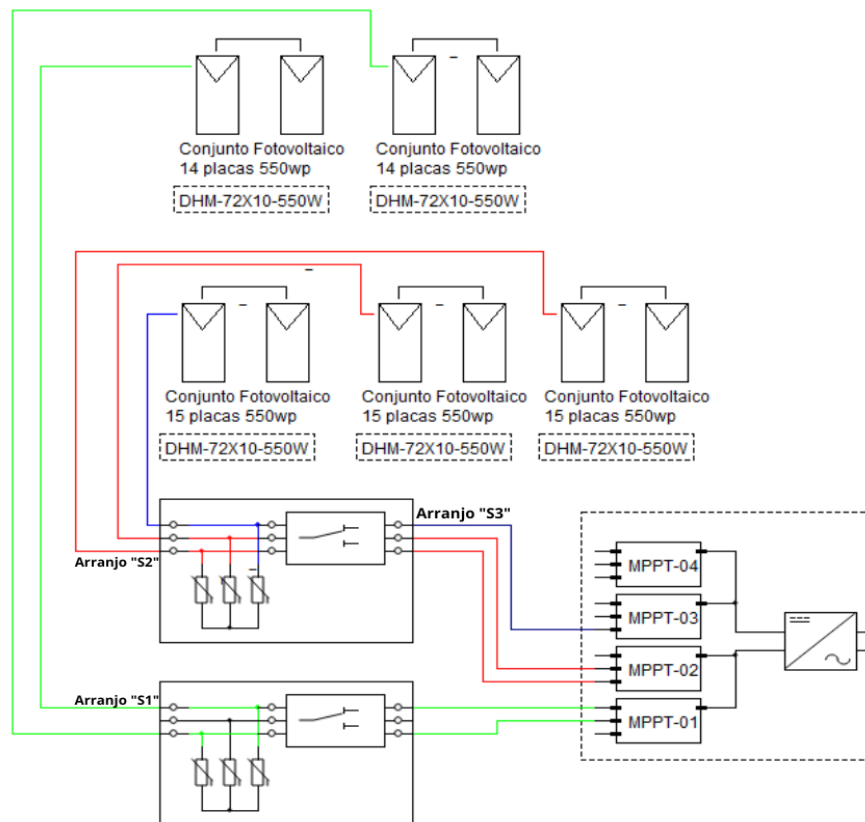
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO INVERSOR

Potência nominal de saída	kW	60
Tensão nominal CA	V	380
Tensão máxima na entrada FV	V	1000
Faixa de operação do MPPT	V	200~850
Corrente máxima na saída CA	A	95,7
Eficiência máxima	%	98,9

FONTE: Sat (2022).

O GFV em estudo está dividido em três *strings*, cada uma dessas com os módulos conectados em serie entre si. A "S1" contém duas fileiras de 14 MFV, totalizando 28 módulos. A "S2" é composta de duas fileiras de 15 MFV, totalizando 30 módulos. A "S3" e última *string* é formada de uma única fileira de 15 MFV. As três *strings* são conectadas ao único inversor, como mostrado no diagrama unifilar da FIGURA 10.

FIGURA 10- DIAGRAMA UNIFILAR DO GFV



FONTE: O Autor (2022).

No diagrama é possível perceber que cada uma das *strings* está conectada a uma entrada MPPT distinta do inversor. As linhas em verde identificam as conexões da "S1", cuja potência pico é de 15,4 kWp, composta por 28 MFV. A "S2", em vermelho, com 30 MFV, tem uma potência pico de 16,5 kWp. A "S3", com potência pico de 8,25 kWp, é apresentada na cor azul com 15 MFV. O GFV completo totaliza 40,15 kWp de potência instalada, composto por 73 módulos fotovoltaicos de 550 Wp cada um.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO HIDROFÓBICO

Para esse estudo foi utilizado um produto hidrofóbico disponibilizado pela empresa Energy Trade LTDA, o "Suntech". Este produto é composto por nano partículas autolimpantes de SiO₂ (Dióxido de silício) à base de etanol e secagem rápida para superfícies de vidro, tendo um ângulo de contato da água de 110° e pH 6,55, conforme especificações do rótulo. Como vantagens, o produto além de repelir

a água, evita reflexos, melhorando a passagem da luz, apresentando ainda uma excelente resistência a abrasão e propriedades anticorrosivas.

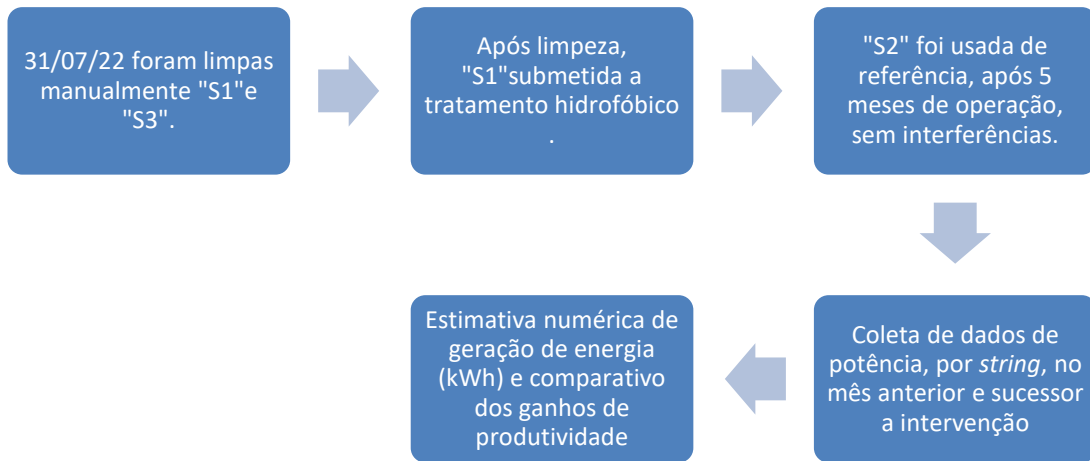
3.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Almejando o alcance dos objetivos do presente estudo, a seguinte metodologia foi planejada e executada:

- 1) Em escolha aleatória, duas das três *strings* do GFV em estudo (S1 e S3) foram submetidas ao mesmo método de limpeza manual no dia 31/07/2022.
- 2) Logo em seguida, no mesmo dia, uma das *strings* já limpa foi submetida a um tratamento de superfície (S1), via método de aplicação do produto hidrofóbico.
- 3) A *string* (S2), não sofreu nenhuma intervenção desde a fatura da instalação do GFV, servindo de referência devido a sujidade acumulada durante os 5 meses de operação.
- 4) Foram coletados dados de potência instantânea (W) de cada *string* obtidos diretamente do inversor de frequência para o período de 1 mês anterior a limpeza e um mês posterior, dos arranjos S1 e S3.
- 5) Com os dados de potência instantânea, foi realizada uma estimativa numérica de geração de energia (kWh) e de produtividade energética (kWh/kWp) para cada dia do período avaliado.
- 6) Um comparativo entre produtividade calculada para cada *string* foi realizado, com objetivo de evidenciar variações ocorridas oriundas tanto da limpeza manual quanto do tratamento hidrofóbico.

Na FIGURA 11 esses passos são descritos de modo mais simplificado, para facilitar o entendimento dos processos executados nessa metodologia.

FIGURA 11- FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO METODOLÓGICO



FONTE: O Autor (2022).

Os métodos utilizados para execução do processo manual de limpeza são mostrados a seguir. Apesar desse serviço ser executado por empresas especializadas, não se tem uma normativa que defina como deve ser feito a limpeza manual dos MFV, para fim de limpeza, o inversor foi desligado e normas de segurança conforme NR10 e NR35, também foram respeitadas durante todo o processo.

3.4 MÉTODOS DE LIMPEZA PARA "S1" E "S3"

A usina instalada em 28/04/2022, já apresentava sujidade aparente, e para fim de pesquisa foi definido aleatoriamente que "S1" seria realizada uma limpeza manual com tratamento de superfície, a "S2" não teria nenhuma alteração e a "S3" efetuado uma limpeza manual.

A limpeza foi efetuada dia 31/07/2022, às 17:00 horas, primeiramente foi ensaboada a superfícies do MFV da "S1" com ajuda de um cabo extensor conectado a uma esponja macia como mostra na FIGURA 12.

FIGURA 12 LIMPEZA MANUAL DOS MFV DA “S1”



FONTE: O Autor (2022).

Para esse processo foi definida de limpeza manual, através de metodologias já aplicadas por empresas do ramo e estudos acadêmicos. Conforme Alamri, Rezk, Abd-Elbary, Ziedan e Elnozahy (2020), os MFV foram limpos manualmente em seu estudo com a utilização de uma escova macia, água destilada e sabão neutro.

Ao finalizar a primeira *string* escolhida para limpeza manual, foi realizado o mesmo processo para “S3”, como FIGURA 13.

FIGURA 13 – LIMPEZA MANUAL DOS MFV DA “S3”



FONTE: O Autor (2022).

Ao fim da limpeza superficial utilizando detergente neutro, foi realizado o enxague com ajuda de mangueira para “S1”, como mostra a FIGURA 14. Já para o arranjo “S3”, foi utilizado também um pano na parte inferior dos MFV de “S3”, para não interferir nos MFV da *string* (S2), cuja nenhuma intervenção foi feita, uma vez que a “S3” (apenas limpa), está instalada a cima de “S2”, e o escoamento de água poderia afetar na sujeira já presente nos MFV de referência.

FIGURA 14 – ENXAGUE COM ÁGUA CORRENTE DA “S1”



FONTE: O Autor (2022).

Realizado esse último processo, foi utilizado um rodo para remoção da água presente na superfície dos MFV da “S1”, como mostra a FIGURA 15, e aguardado a evaporação total do restante da água, para em seguida efetuar aplicação do hidrofóbico na “S1”.

FIGURA 15 – REMOÇÃO DO EXCESSO DE ÁGUA SOBRE A SUPERFÍCIE DOS MFV DA "S1"



FONTE: O Autor (2022).

3.4.1. TRATAMENTO HIDROFÓBICO NA "S1"

Para o tratamento hidrofóbico de superfície foi utilizado o "Suntech", líquido incolor, deixando curar por 30 minutos após aplicado, espalhando de forma homogênea e removendo o excesso com ajuda de um pano de microfibra, como a FIGURA 16.

FIGURA 16 – APLICAÇÃO PRODUTO HIDROFÓBICO



(a) Aspersão do líquido

(b) Homogeneização com pano de micro fibra

FONTE: O Autor (2022).

Ao final dos processos apresentados, foi efetuado um teste de hidrofobia, esse processo foi realizado com ajuda de uma mangueira, para despejar água sobre a superfície tratada, na FIGURA 17 é possível observar as gotas “rolando” sobre os MFV, constatando assim, o efeito hidrofóbico.

FIGURA 17 – TESTE DE HIDROFOBIA NOS MFV DA “S1”



FONTE: O Autor (2022).

3.4.1 PROCESSAMENTO DE DADOS DE ENERGIA GERADA EM CADA *STRING*

Para uma análise inicial mais direta sobre os dados brutos de potência injetada, os valores de potência instantânea foram normalizados pela potência-pico de cada *string*, sendo avaliados em valores percentuais da potência média diária. É importante salientar que, devido a interferências de sombreamentos causados por árvores próximas do GFV, foi necessário considerar um intervalo menor de geração, entre 9 e 15 horas de cada dia avaliado. Tal feito tem como objetivo não ter dados de interferências causadas por esses sombreamentos nesse estudo. As equações 1, 2 e 3 descrevem o procedimento executado para o tratamento dos dados brutos de potência.

$$\bar{P}_{S1} = \frac{Pi_{S1}}{Pp_{S1}} \quad (1)$$

$$\bar{P}_{S2} = \frac{Pi_{S2}}{Pp_{S2}} \quad (2)$$

$$\bar{P}_{S3} = \frac{P_{iS3}}{Pp_{S3}} \quad (3)$$

onde:

P_{S1} = Potência normalizada da “S1”, dada em kW /kWp;

P_{S2} = Potência normalizada da “S2”, dada em kW /kWp;

P_{S3} = Potência normalizada da “S3”, dada em kW /kWp;

P_{iS1} = Potência instantânea da “S1”, dada em kW;

P_{iS2} = Potência instantânea da “S2”, dada em kW;

P_{iS3} = Potência instantânea da “S3”, dada em kW;

Pp_{S1} = potência-pico total instalada de S1, dada em kWp;

Pp_{S2} = potência-pico total instalada de S2, dada em kWp;

Pp_{S3} = potência-pico total instalada de S3, dada em kWp.

Os dados de potência de cada *string* (W) foram processados via integração numérica, para obtenção da geração (kWh) e posteriormente normalizados pela potência-pico de cada *string* para obtenção da produtividade de energia (kWh/kWp) de cada *string* para cada dia dentro do período avaliado, conforme as equações 4,5 e 6. Novamente salienta-se que, devido a interferências de sombreamentos próximos ocorridos em partes de algumas *strings*, a energia gerada foi calculada apenas entre os horários de 9 à 15 horas de cada dia avaliado.

$$\Upsilon_{S1} = \frac{E_{S1}}{Pp_{S1}} \quad (4)$$

$$\Upsilon_{S2} = \frac{E_{S2}}{Pp_{S2}} \quad (5)$$

$$\Upsilon_{S3} = \frac{E_{S3}}{Pp_{S3}} \quad (6)$$

onde:

Υ_{S1} = produtividade energética diária de S1, dada em kWh/kWp;

E_{S1} = energia elétrica diária gerada das 9 às 15h por S1, dada em kWh;

Υ_{S2} = produtividade energética diária de S2, dada em kWh/kWp;

E_{S2} = energia elétrica diária gerada das 9 às 15h por S2, dada em kWh;

Υ_{S3} = produtividade energética diária de S3, dada em kWh/kWp;

E_{S3} = energia elétrica diária gerada das 9 às 15h por S3, dada em kWh;

A partir da produtividade energética diária de cada *string*, foram calculadas as diferenças entre si. Por este método, foi possível evidenciar os ganhos de produtividade energética diária obtidos com a limpeza manual (diferença entre S3 e S2, equação 7), com a limpeza seguida de tratamento hidrofóbico (diferença entre S1 e S2, equação 8) e o ganho específico do tratamento hidrofóbico em relação a limpeza manual (diferença entre S1 e S3, equação 9).

$$\Delta Y_{S32} = Y_{S3} - Y_{S2} \quad (7)$$

$$\Delta Y_{S12} = Y_{S1} - Y_{S2} \quad (8)$$

$$\Delta Y_{S13} = Y_{S1} - Y_{S3} \quad (9)$$

onde:

ΔY_{S32} = variação de produtividade diária entre S3 e S2;

ΔY_{S12} = variação de produtividade diária entre S1 e S2;

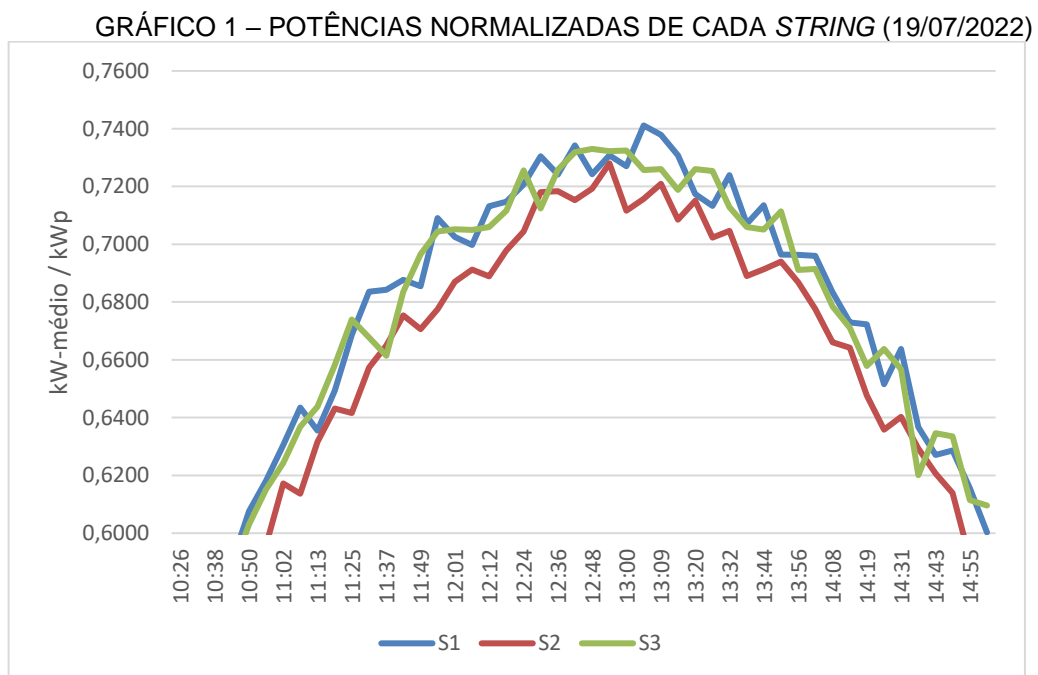
ΔY_{S13} = variação de produtividade diária entre S1 e S3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Preocupando-se com a produtividade de GFV, cabe-se cada vez mais, procurar alternativas ou soluções para agentes que contribuam de forma positiva para evitar perdas causadas por sujidades. A seguir são apresentados os resultados identificados para “S1”, “S2” e “S3”, para posterior avaliação do efeito de limpeza e com aplicação do produto hidrofóbico.

4.1 POTÊNCIA INJETADA POR *STRING*

O GRÁFICO 1 mostra um exemplo de perfil diário de potência injetada por cada *string* normalizado por suas respectivas potências-pico, conforme equações 1,2 e 3, para a data de 19/07/2022, ou seja, antes da realização de qualquer intervenção junto ao GFV.

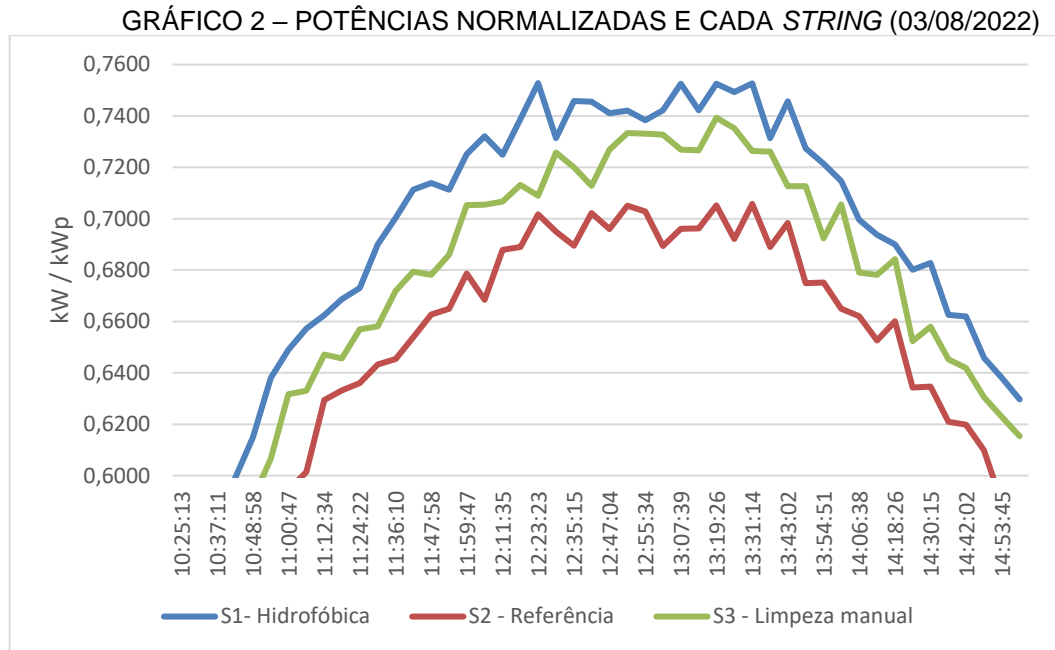


FONTE: O autor (2022).

Pode-se observar que o perfil de injeção de potência normalizado de cada uma das *strings* se manteve bastante próximo durante todo o período de avaliação, sendo que a “S2” apresentou um rendimento de -2,3% em comparação a “S1” e “S3” apresentou um rendimento -0,45% em relação a “S1”. A potência normalizada média

para S1, S2 e S3 na data apresentada no exemplo do GRÁFICO 1 foi de, respectivamente, 0,6144, 0,6003 e 0,6116 kW-médio/kWp.

No GRÁFICO 2 é demonstrado o mesmo tipo de avaliação para uma data selecionada após as intervenções em S1 e S3 (03/08/2022).



FONTE: O autor (2022).

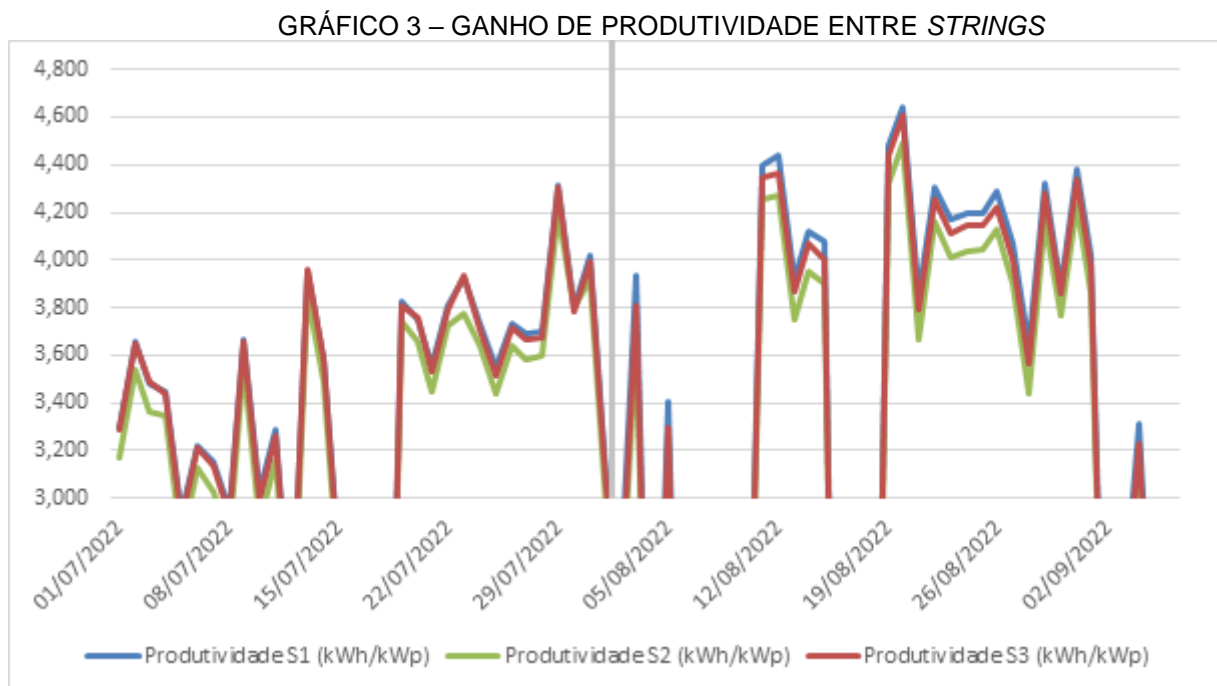
No GRÁFICO 2 é possível notar uma separação nítida entre os perfis de potência normalizada, onde S1 destacou-se diante às demais *strings*. Tanto a intervenção de limpeza manual realizada em S3 quanto a limpeza seguida de tratamento hidrofóbico feita em S1 resultaram em ganhos de injeção de potência instantânea, com destaque para os maiores ganhos observados para a S1. É importante salientar que não houve incidência de precipitação nos 2 dias que seguiram entre a data das intervenções (31/07/2022) e o dia 03/08/2022 (com resultado exposto no GRÁFICO 2). Desta forma, é possível indicar que o ganho de potência normalizada de S1 em relação a S3 se deu muito provavelmente devido ao efeito antirreflexo do produto utilizado, resultando no incremento de potência de S1 evidenciado no GRÁFICO 2, mesmo poucos dias após o tratamento.

As potências normalizadas médias entre às 9:00 e 15:00 horas para S1, S2 e S3 foram calculadas para o dia 03/08/2022 (GRÁFICO 2), sendo definidas por 0,6320, 0,5902 e 0,6122 kW-médio/kWp, respectivamente. Isto indica um ganho de potência média de 6,61% quando comparada a *string* com tratamento hidrofóbico (S1) e a *string* referência (S2) e um ganho de 3,3% entre a *string* hidrofóbica (S1) e a *string* apenas

limpa manualmente (S3). Tais resultados vão de encontro a resultados já apontados por estudos que avaliaram cenários similares, como em Alamri et al., (2020).

4.2 RESULTADOS DE PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA

A partir da integração numérica dos dados brutos de potência instantânea foi estimada a geração de energia diária individual de cada *string*. Tais resultados foram aplicados junto às equações 4, 5 e 6, para definir as respectivas produtividades energéticas em kWh/kWp. Observando o GRÁFICO 3 é possível comparar os resultados para as produtividades de S1, S2 e S3 desde 30 dias antes as intervenções em S1 e S3 até 30 dias após a limpeza e tratamento hidrofóbico realizados em 31/07/2022. Antes das intervenções, S1 já apresentava +3,18% de produtividade média em relação a S2 e +0,57% em relação a S3.

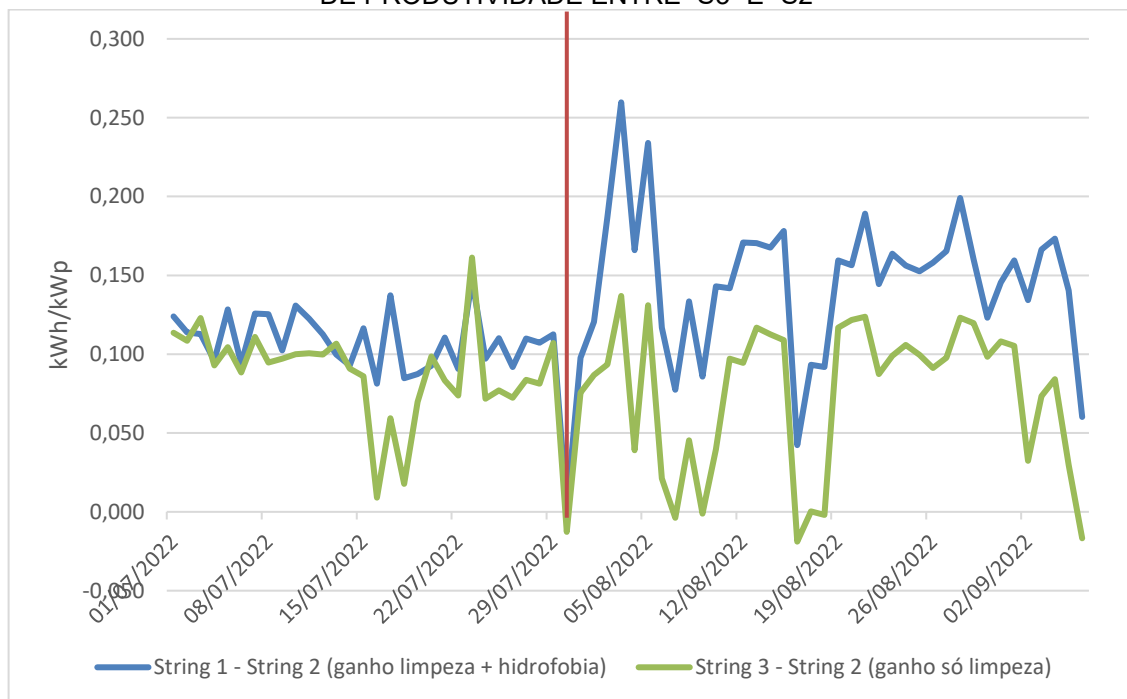


É possível analisar o perfil da produtividade de S1 e S3 muito próximos durante todo o mês de julho/2022. Após as intervenções em ambas as *strings* é possível notar no GRAFICO 3 uma sobressalência da cor azul (S1) em relação a cor vermelha (S3). Para o mês de agosto, a produtividade média diária de S1 passou a ser +5,17% superior a S2 e +2,50% superior a S3.

4.3 GANHOS DE PRODUTIVIDADE EM RELAÇÃO A *STRING* REFERÊNCIA

Para definir os ganhos relativos de produtividade de S1 e S3 em relação a *string* referência (S2) foram aplicadas as equações 7 e 8. O GRÁFICO 4 apresenta o comparativo entre as diferenças de produtividade para ambos os cenários. Neste gráfico ficam ainda mais destacadas as diferenças de produtividade apontadas junto ao GRÁFICO 4.

GRÁFICO 4 – GANHO DE PRODUTIVIDADE ENTRE “S1” E “S2” EM RELAÇÃO AO GANHO DE PRODUTIVIDADE ENTRE “S3” E “S2”



FONTE: O autor (2022).

É possível verificar que a limpeza manual efetuada em S3 auxiliou na manutenção do nível de produtividade de julho para agosto, uma vez que este tenderia a cair com os passar dos dias devido ao aumento de deposição de poeira e piores condições meteorológicas observadas em agosto. Por outro lado, a *string* que recebeu tratamento hidrofóbico (S1) apresentou um aumento de produtividade média diária de +4,32% em relação a seu próprio desempenho no mês anterior ao tratamento.

4.4 GANHO DE PRODUTIVIDADE POR TRATAMENTO HIDROFÓBICO

O ganho de produtividade resultante exclusivamente pelo tratamento hidrofóbico de superfície foi calculado conforme a Equação 9. Seu resultado pode ser observado quando avaliado o GRÁFICO 5. Na média, S1 já apresentava 0,02 kWh/kWp de produtividade a mais do que S3 até 31/07/2022. Após esta data, no mês subsequente,

a diferença entre as produtividades diárias destas *strings* aumentou para uma média de 0,07 kWh/kWp por dia, evidenciando assim um ganho médio em apenas um mês após o tratamento hidrofóbico de +0,05 kWh/kWp por dia.

GRÁFICO 5 – GANHO DE PRODUTIVIDADE POR TRATAMENTO HIDROFÓBICO ENTRE “S1” E “S3”



FONTE: O autor (2022).

Este ganho, em relação ao procedimento de limpeza manual sem tratamento hidrofóbico, caso extrapolado para os 25 anos de vida útil estipulado para os MFV, e considerando a realização do tratamento em todos os MFV do GFV em estudo (ou seja, 40,15kWp), poderia resultar em uma geração adicional de +18,07 MWh.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa pesquisa, foi investigado o efeito do tratamento hidrofóbico sobre o MFV. A potência de saída, que indica o ganho de produtividade, foi medido em um GFV sob três condições diferentes. Os dados de potência (W) foram processados via integração numérica para obtenção da produtividade de energia (kWh/kWp) por MFV, sendo possível observar um ganho médio diário de +0,05 kWh/kWp, obtido em apenas um mês após revestimento hidrofóbico, em relação a limpeza manual. Esse ganho representou + 1,04% de energia gerada entre elas. Esse ganho, em relação ao sistema apenas limpo manualmente, pode ser extrapolado para a vida útil dos MFV (25 anos), e considerando o tratamento de todos os MFV do FGV, 40,15 kWp, estima-se uma geração adicional de +18,07 MWh.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se relacionar os resultados de produtividade com dados climatológicos. Avaliar inferência de produtividade por diferentes inclinações dos MFV. Estipular um período mais longo, para dar continuidade a este estudo de campo, o tempo de durabilidade da eficiência do tratamento. Realizar testes em condições controladas de laboratório. Análise econômica de custo com limpeza, mão de obra e produto.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Energia solar ganha adeptos e procura cresce em Marília**. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-ganha-adeptos-e-procura-cresce-em-marilia/>. Acesso em: 08 set. 2022.

ALAMRI, H. R.; REZK, H.; ABD-ELBARY, H.; ZIEDAN, H. A.; ELNOZAHY, A. Experimental Investigation to Improve the Energy Efficiency of Solar PV Panels Using Hydrophobic SiO₂ Nanomaterial. **Coatings**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 503, 24 maio 2020. MDPI AG. DOI: 10.3390/coatings10050503.

ARAUJO, A. J. N. de; RANK, N. I.; BUENO, T. B. de A. **ANÁLISE DOS FATORES DE PERDAS NOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA EM CURITIBA**. 2016. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10066/1/CT_COELE_2016_2_21.pdf. Acesso em: 18 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (São Paulo). **Fonte Solar Fotovoltaica Assume 7ª Posição na Matriz Elétrica Brasileira e Ultrapassa Nucleares**. 2019. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/fontesolar-fotovoltaica-assume-7a-posicao-na-ma>. Acesso em: 08 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (Brasil). **Energia solar fotovoltaica supera 8GW e traz R\$ 40 bi de investimentos ao Brasil**. **Absolar**, São Paulo, p. 1-3, 01 mar. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-fotovoltaica-supera-8-gw-e-traz-r-40-bi-de-investimentos-ao-brasil/>. Acesso em: 31 jun. 2022.

AW, K.-Y.; ZHAO, H. **Surface Wetting: Characterization, Contact Angle, and Fundamentals**. New York: Springer, 2015;

BARBOSA, E. R.; FARIA, M. dos S. F. de; GONTIJO, F. de B.. INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, v. 1, n. 1, p. 1-7, 17 abr. 2018. Anual.

BEN, Balanço Energético Nacional Interativo. Empresa de Pesquisa. Matriz Energética e Elétrica. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 21 set. 2022.

COSTA, A. L. C.; HIRASHIMA, S. Q. da S.; FERREIRA, R. V. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos fv. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 201-220, out. 2021. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s1678-86212021000400566.

CRICK, Colin R.; PARKIN, Ivan P. Water droplet bouncing—a definition for superhydrophobic surfaces. **Chemical Communications**, [S.L.], v. 47, n. 44, p. 12059, 2011. Royal Society of Chemistry (RSC). DOI: 10.1039/c1cc14749h.

COSTA, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; SANTANA, V. A. C.; KAZMERSKI, L. L. **DETERMINAÇÃO DAS TAXAS DE SUJIDADE PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE FILME FINO E SILÍCIO CRISTALINO INSTALADOS EM DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS BRASILEIRAS**. Minas Gerais: Revista Brasileira de Energia Solar, v. 11, jul. 2020. Anual.

EL-SHOBOKSHY, M. S.; HUSSEIN, F. M. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. **Solar Energy**, [S.L.], v. 51, n. 6, p. 505-511, dez. 1993. Elsevier BV. DOI: 10.1016/0038-092x(93)90135-b.

FERREIRA, R. A. M. **Metodologia para avaliação do desempenho de painéis fotovoltaicos utilizando um modelo elétrico-térmico e termografia quantitativa**. Belo Horizonte, 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

FREITAS, M. A. **Relação entre limpeza versus eficiência de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias**. 2020. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Elétrica, Centro de Tecnológico, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2020.

HICKEL, B. M. *et al.* Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos fv: revisão e medições de campo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., Belo Horizonte, 2016. **Anais...** Belo Horizonte, 2016.

GLIER, A.; TRINDADE, R. S. O emprego de polímeros em revestimentos hidrofóbicos, super-hidrofóbicos e autolimpantes: uma revisão da literatura. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 59-74, 02 dez. 2020. DOI: 10.37779/nt.v21i2.3481.

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 IxV em Campo**. Florianópolis, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

LAW, Kock-Yee; ZHAO, Hong. **Surface Wetting: Characterization, Contact Angle, and Fundamentals**. New York: Springer, 2015.

LEMO, L. O., FERREIRA, Â. M., JOTA, P. R. S., SILVA, A. G. V. Efeitos da sujidade no desempenho de módulos fotovoltaicos. *In*: VI CBENS - VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016, p. 1-8.

MAGHAMI, Mohammad Reza *et al.* Power loss due to soiling on solar panel: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Malaysia, p. 1307-1315, 31 dez. 2015. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.044.

MANI, M.; PILLAI, R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 14, n. 9, p. 3124-3131, dez. 2010. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.065.

MERKEL, A. **Clima Palotina: Temperatura e precipitação médias // clima em Palotina.** [ca.2017]. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/palotina-43680/>>. Acesso em: 31 junho. 2022.

OLIVEIRA, Márcio Roberto da Silva. **Superfícies Super hidrofóbicas obtidas através de microestruturas litografadas.** 2011. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

REZENDE, J. O. **A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável.** Ponta Grossa: Atena Editora, 2019.

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.

SAT, Bedin. Inversor Bedinsolar BS-60K. 2022. Disponível em: http://www.bedinsat.com.br/produtos_view.php?id=237. Acesso em: 13 set. 2022.

SAYYAH, A.; HORENSTEIN, M. N.; MAZUMDER, M. K. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. **Solar Energy**, Boston, v. 107, p. 576-604, set. 2014. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.solener.2014.05.030.

SHENOUDA, R.; ABD-ELHADY, M. S.; KANDIL, H. A.. A review of dust accumulation on PV panels in the MENA and the Far East regions. **Journal Of Engineering And Applied Science**, [S.L.], v. 69, n. 1, p. 12-15, 18 jan. 2022. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1186/s44147-021-00052-6.

SILVA, R. M. da. **Energia solar no Brasil: dos incentivos aos desafios.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas, CONLEG, Senado, fev. 2015. Disponível em: www.senado.leg.br/estudos. Acesso em: 10 ago. 2022.

SOARES JÚNIOR, J. G.; CRUZ, S. R.; AMARAL, L. S. IMPACTO DA SUJIDADE SOBRE O DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Montes Claros: Universidade Estadual de Montes Claros, 2018. v. 7, p. 1-8.

VIANA, T. S. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VERPLANCK, N.; COFFINIER, Y.; THOMY, V.; BOUKHERROUB, R. Wettability Switching Techniques on Superhydrophobic Surfaces. **Nanoscale Research Letters**, [S.L.], v. 2, n. 12, p. 1-20, 13 nov. 2007. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1007/s11671-007-9102-4.

WILEY. **Self-Cleaning Materials and Surfaces: a nanotechnology approach**. [S.l.]: Walid A. Daoud, 2013. 368 p.