

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO IPATINGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

José Henrique Ferreira de Souza
Mariana Campos Souza

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE A LIMPEZA
MANUAL E A LIMPEZA AUTOMATIZADA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Ipatinga
2022

JOSÉ HENRIQUE FERREIRA DE SOUZA

MARIANA CAMPOS SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE A LIMPEZA
MANUAL E A LIMPEZA AUTOMATIZADA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus*
Avançado Ipatinga para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Willian Marlon Ferreira

Ipatinga

2022

S719a Souza, José Henrique Ferreira de; Souza, Mariana Campos.

Análise comparativa de custo-benefício entre a limpeza manual e a limpeza automatizada de módulos fotovoltaicos. José Henrique Ferreira de Souza; Mariana Campos Souza. – 2022.

46f.;il.

Orientador: Willian Marlon Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ipatinga, 2022.

1. Sistema Fotovoltaico. 2. Painéis solares. 3. Payback. I. Ferreira, Willian Marlon . II. Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Ipatinga. III. Título.

CDD 621.471

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

José Henrique Ferreira de Souza
Mariana Campos Souza

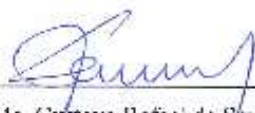
**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE A LIMPEZA
MANUAL E A LIMPEZA AUTOMATIZADA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus*
Avançado Ipatinga para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 06/12/2022 pela banca examinadora:



Prof. Me. Willian Marlon Ferreira – IFMG (Orientador)



Prof. Me. Gustavo Rafael de Souza Reis – IFMG



Prof. Me. Carlos Renato Magalhães Duarte – IFMG

Ipatinga
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jeová Deus por iluminar o meu caminho.

Agradeço aos meus pais, José e Marluce, e aos meus irmãos, Victor e Pedro, por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço aos meus amigos por torcerem por mim.

Agradeço à Mariana por ser a pessoa em que eu sempre confiei para fazer qualquer trabalho ou projeto durante esses 5 anos de estudo. Eu não poderia ter escolhido uma dupla melhor para esse trabalho final.

E agradeço ao nosso professor Willian por ter aceitado ser nosso orientador e estar sempre disponível e disposto a nos ajudar, embora seja muito atarefado.

José Henrique Ferreira de Souza

Agradeço primeiramente à Deus por todas as benções concedidas.

Aos meus pais, Renato e Silvia e meus irmãos Rodrigo e Luísa por todo amor e confiança depositados.

Aos meus avós e todos os familiares pelos finais de semana juntos e por todo carinho e amor.

As amigas e amigos que sempre torceram e estiveram próximos nos momentos de alegria.

Ao meu amigo e parceiro nos trabalhos José, pelo apoio durante todos esses anos de estudo.

Ao nosso orientador professor Willian, pelos conhecimentos e experiências repassados.

A todos os professores e amigos do IFMG Ipatinga por todo apoio.

Mariana Campos Souza

RESUMO

A alta demanda por sistemas fotovoltaicos no contexto atual devido ao grande potencial energético do Brasil, resulta em diversos estudos visando otimizar a implantação e monitoramento desses sistemas, bem como sua manutenção preventiva para que trabalhem da forma mais eficiente possível. Não obstante, as perdas devido a sujidade são um dos fatores que afetam seu desempenho, chegando a atingir até 35% em casos em que não há limpeza ou falta de chuvas. Este trabalho tem por objetivo principal apresentar formas de limpeza em sistemas fotovoltaicos e ao final, fazer um estudo de caso com a usina fotovoltaica do IFMG *Campus Avançado Ipatinga*, analisando-se o fator de perdas, custos de perdas e de cada método de limpeza, calculando o retorno do investimento através do método de *payback* simples.

Palavras-Chave: Sistema Fotovoltaico, Métodos de Limpeza, *Payback*.

ABSTRACT

The rise in photovoltaic systems in the current context, due to the great energy potential of Brazil, results in several studies of systems in the most efficient way possible. However, losses due to dirt are one of the factors that affect its performance, reaching up to 35% in cases where there is no cleaning or lack of rain. The main objective of this work is to present ways of cleaning in photovoltaic systems and, at the end, to make a case study with a photovoltaic plant of the IFMG Campus Avançado Ipatinga, analyzing the loss factor, loss costs and each cleaning method, calculating the return on investment using the simple payback method.

Keywords: Photovoltaic System, Cleaning Methods, Payback.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Potencial de Geração Solar Fotovoltaica – Rendimento Anual.....	13
Figura 2 - Capacidade de usinas fotovoltaicas instaladas por estado.....	133
Figura 3 - Matriz elétrica por origem de combustível.	14
Figura 4 - Estrutura da célula fotovoltaica.	15
Figura 5 - Esquema básico de um sistema <i>off-grid</i>	16
Figura 6 - Esquema básico de um sistema <i>on-grid</i>	17
Figura 7 - Sistema híbrido com aerogeradores e células fotovoltaicas.	18
Figura 8 - Pontos de aquecimento excessivo na célula fotovoltaica (hot spots).	19
Figura 9 - Nível de corrente por amostras de painéis sujos e limpos.	19
Figura 10 - Fatores que influenciam na deposição de poeira.	20
Figura 11 - Diferentes métodos de limpeza para remoção de poeira de painéis solares.	21
Figura 12 - Sistema de limpeza eletrostática.	23
Figura 13 - Funcionamento do sistema Heliotex.....	24
Figura 14 - Limpeza automatizada Eccopia E4.....	25
Figura 15 - Distribuição de módulos da usina fotovoltaica IFMG Campus Avançado Ipatinga.	27
Figura 16 - Perfis de irradiação solar diária com valores equivalentes de HSP.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regime de chuvas em Ipatinga - MG	31
Tabela 2 - Geração estimada e fator de perdas ao longo dos meses de 2020.....	32
Tabela 3 - Custo de perdas sem limpeza.	33
Tabela 4 - Custo da limpeza manual.	34
Tabela 5 - Custo de perdas com limpeza manual a cada 4 meses.	35
Tabela 6 - Custo de perdas para uma limpeza manual a cada 6 meses.	36
Tabela 7 - Custo de perdas para uma limpeza manual a cada 1 ano.	37
Tabela 8 - Payback simples da limpeza manual.	38
Tabela 9 - Payback simples da limpeza automática.	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivos.....	10
1.3	Estrutura do trabalho.....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Potencial Energético	12
2.2	Estrutura da célula fotovoltaica	14
2.3	Funcionamento dos Sistemas Fotovoltaicos	16
2.4	Perdas no Sistema Fotovoltaico	18
2.5	Formas de Limpeza	20
2.5.1	<i>Limpeza natural</i>	21
2.5.2	<i>Limpeza manual.....</i>	22
2.5.3	<i>Limpeza automatizada</i>	23
3	METODOLOGIA.....	26
4	RESULTADOS	32
5	CONCLUSÃO.....	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A energia fotovoltaica tem ganhado muita força nos últimos anos. Mas, parte da energia produzida acaba sendo perdida por causa do sombreamento parcial, devido à sujidade dos módulos. Além da redução do rendimento, o acúmulo de impurezas por tempo prolongado pode causar manchas e corrosão nos módulos, bem como sobreaquecimento, reduzindo a vida útil do sistema. Por isso, é essencial que seja realizada regularmente a limpeza dos módulos.

Há situações em que é mais vantajoso economicamente realizar essas limpezas através de sistemas automatizados. Dessa forma, existem diversos tipos de sistemas automáticos para a limpeza de módulos fotovoltaicos, como o *Heliotex*, sistemas mecânicos, sistemas eletrostáticos e a utilização de robôs. É necessário, portanto, fazer uma análise comparativa entre as diversas formas de se realizar a limpeza de sistemas fotovoltaicos para se determinar qual método é mais adequado para cada caso específico.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é fazer uma análise comparativa entre os diversos métodos automáticos de limpeza bem como do método manual, do ponto de vista de custo-benefício e viabilidade técnica, para determinar qual dos métodos, se algum, é mais economicamente viável.

Os objetivos específicos são, através de um estudo de caso:

- determinar o custo médio das perdas por sujidade;
- determinar o custo médio dos sistemas automáticos de limpeza e da limpeza manual dos módulos;
- comparar os custos e avaliar a viabilidade econômica da utilização de um sistema automático de limpeza.

1.3 Estrutura do trabalho

A seção 2 traz uma revisão bibliográfica, abordando o potencial de geração da energia solar no Brasil, a estrutura e funcionamento de uma célula fotovoltaica e de um sistema

fotovoltaico, as causas de perda de geração em um sistema fotovoltaico e as formas de limpeza: natural, manual e automatizada.

A seção 3 explica a metodologia utilizada neste trabalho, envolvendo as características do sistema analisado, o levantamento de dados e o equacionamento utilizado.

A seção 4 apresenta os resultados da análise comparativa entre a limpeza manual e automatizada quanto à viabilidade econômica.

A seção 5 apresenta as conclusões do trabalho, considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando a compreensão do alcance deste trabalho, será primeiro apresentado o panorama geral da geração solar fotovoltaica no Brasil. Em seguida, para a contextualização do leitor, será descrito brevemente a estrutura da célula fotovoltaica e o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos. Então, serão apresentados os principais fatores que resultam em perdas de energia em um sistema fotovoltaico. Sabendo-se que um desses fatores é a sujeira, serão apresentados diversos métodos de limpeza, classificados em limpeza natural, manual e automatizada.

2.1 Potencial da Energia Solar

Uma das alternativas energéticas mais promissoras para o desenvolvimento humano no contexto atual é o aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre do tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz (PINHO e GALDINO, 2014). Mas, apesar de abundante em nosso planeta, a energia solar ainda é pouco utilizada no contexto de geração de energia elétrica. Nos países desenvolvidos este cenário vem mudando, dado que incentivos foram concedidos para a instalação de sistemas fotovoltaicos (ROZZA e PEREIRA, 2019).

Segundo Pinho e Galdino (2014, p. 81), no Brasil “há disponibilidade de irradiação solar equivalente ou melhor que nos países da região sul da Europa”, superando também a Alemanha, país com capacidade instalada significativa de sistemas de geração fotovoltaica. A Figura 1 apresenta o mapa do potencial de geração solar fotovoltaica do Brasil, nota-se grande potencial de geração nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste.

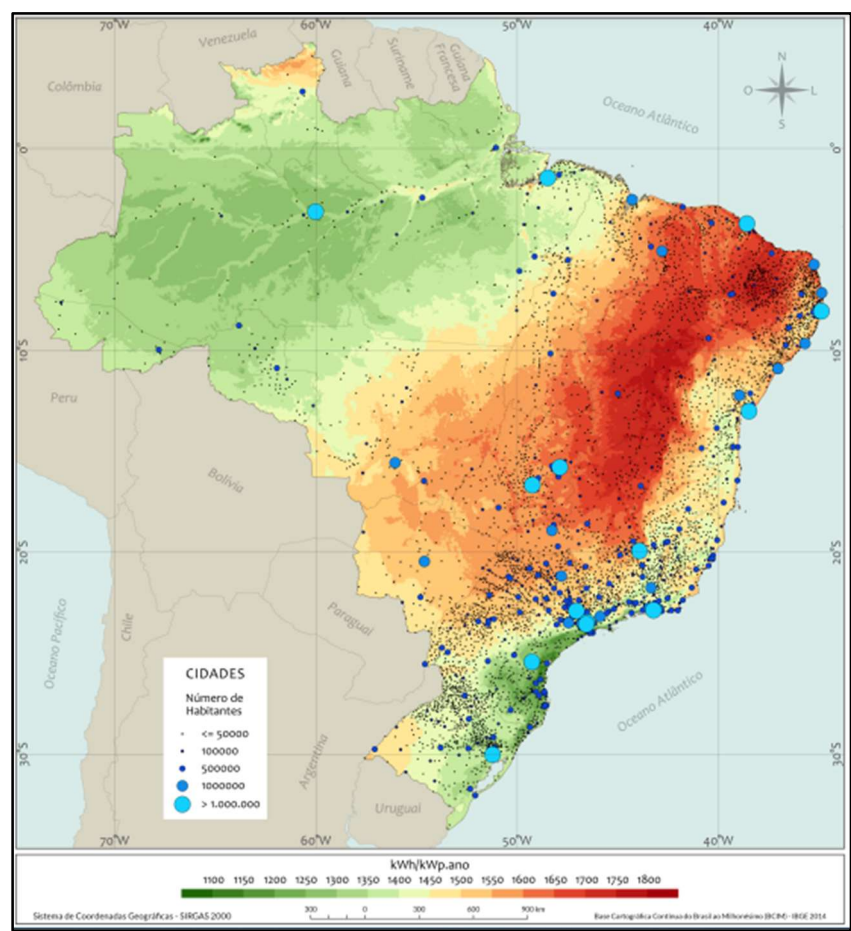
De acordo com Souza *et al.* (2022), Rosa e Gasparin (2016) informam que a menor irradiação do Brasil está na ordem de 1500 kWh/m² de irradiação global anual na superfície horizontal e a maior de 2350 kWh/m², dessa forma, a média diária ao longo de um ano que incide em qualquer parte do território brasileiro irá variar de 4,1 a 6,5 kWh/m².

Souza *et al.* (2022) ainda citam que conforme a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2018), em 2040 a fonte solar alcançará cerca de 126 mil MW instalado, atingindo o posto de primeira fonte no ranking da matriz, com 32% de participação, superando a hidroeletricidade, que terá 29%. Torna-se evidente, portanto, que a energia solar fotovoltaica no Brasil apresenta um enorme potencial e um crescimento muito acelerado.

De acordo com dados da Aneel (2022), a potência outorgada total de usinas fotovoltaicas no Brasil é de 69.598.537,61 kW, com um número de empreendimentos de

15.783, a Figura 2 abaixo mostra a capacidade instalada por estado com potência outorgada em GW.

Figura 1 - Potencial de Geração Solar Fotovoltaica – Rendimento Anual.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

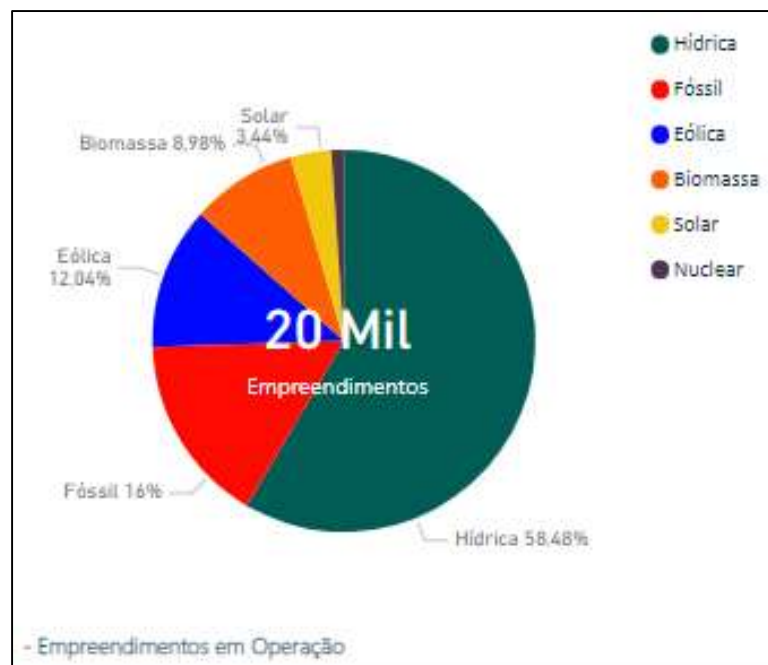
Figura 2 - Capacidade de usinas fotovoltaicas instaladas por estado.



Fonte: Aneel (2022).

Na Figura 3 a seguir, nota-se que a porcentagem de potência outorgada de geração solar no Brasil corresponde a apenas 3,44% da matriz elétrica, evidenciando o seu grande potencial de crescimento.

Figura 3 - Matriz elétrica por origem de combustível.



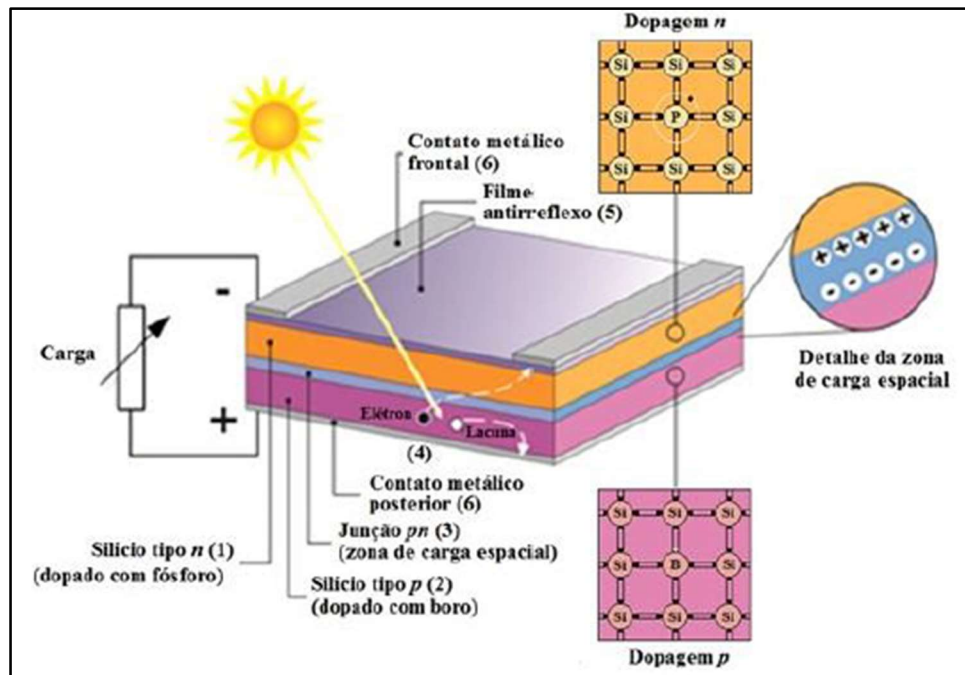
Fonte: Aneel (2022).

2.2 Estrutura da célula fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica consiste na geração de eletricidade a partir de materiais semicondutores que, ao serem expostos à luz, sofrem influência de um fenômeno químico/físico, conhecido como efeito fotovoltaico, capaz de gerar a formação de tensão ou corrente elétrica no material (DANTAS e POMPERMAYER, 2018 *apud* ROCHA *et al.*, 2020). Basicamente, o efeito fotovoltaico acontece quando os fótons da luz dão energia suficiente aos elétrons de um material semicondutor para que esses elétrons passem para a banda de condução (PINHO e GALDINO, 2014).

A célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor projetado para produzir tensão e corrente elétricas a partir do efeito fotovoltaico. A Figura 4 apresenta a estrutura de uma célula fotovoltaica, composta por placa de silício do tipo n, dopada com fósforo que possui elétrons livres, silício do tipo p dopado com boro, que possui lacunas livres, junção p-n chamada de zona de carga espacial, contato metálico frontal e posterior, e filme antirreflexo.

Figura 4 - Estrutura da célula fotovoltaica.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Quando a célula recebe radiação solar, ocorre absorção dos fótons com energia superior à do gap fazendo com que os elétrons livres e as lacunas movimentem-se dentro do material, gerando corrente e tensão elétricas, para aproveitamento destas é necessário a criação de um campo elétrico, obtido através da junção p-n. Esta é construída através da dopagem de impurezas tri ou pentavalentes. Caso os portadores de carga sejam gerados dentro da junção p-n, os elétrons livres são acelerados para a junção n, e as lacunas aceleradas para a junção p, gerando uma corrente elétrica no sentido n-p. Se os portadores de carga forem gerados fora da junção p-n, os portadores minoritários (lacunas na região n, elétrons na região p), terão um tempo de vida ou comprimento de difusão mínimo para alcançarem a região p-n e serem coletados. “Esta separação dos portadores de carga pela junção p-n dá origem ao efeito fotovoltaico, que é a conversão de energia luminosa em energia elétrica associada a uma corrente elétrica e uma diferença de potencial.” (PINHO e GALDINO, 2014, p.114).

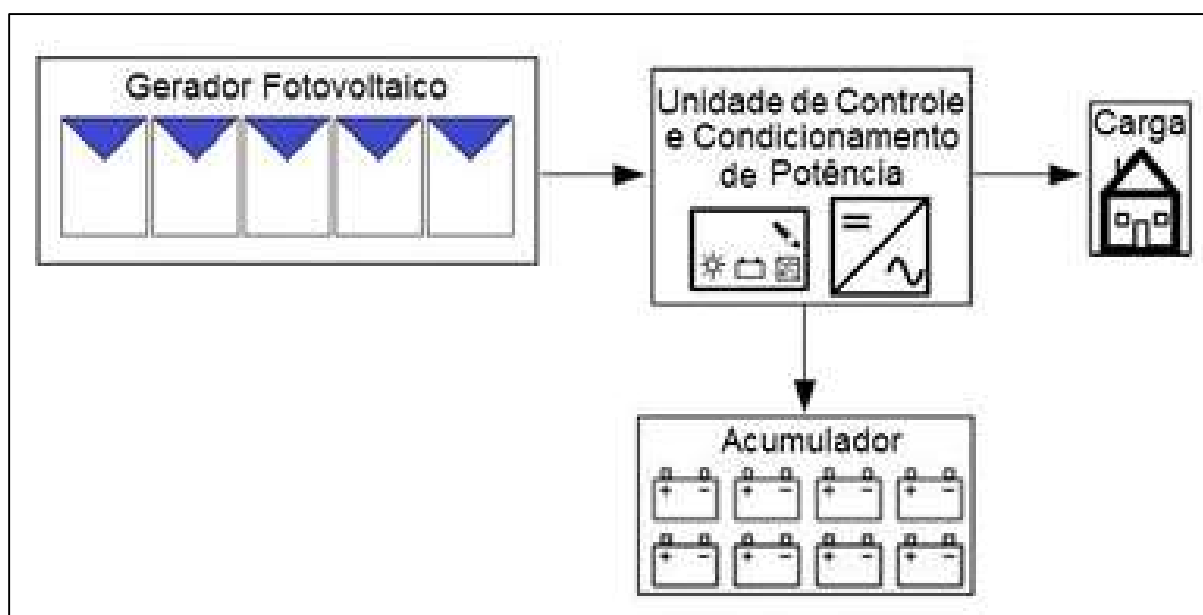
Dessa forma, as células fotovoltaicas podem ser entendidas como diodos de grande área, que são otimizados para o aproveitamento do efeito fotovoltaico. Estas produzem, individualmente, uma tensão muito baixa, da ordem de 0,5 a 0,8 V no caso das células de silício. Por isso, as células são agrupadas em módulos, onde são arranjadas de modo a fornecer valores mais adequados de tensão e corrente elétricas (PINHO e GALDINO, 2014).

2.3 Funcionamento dos Sistemas Fotovoltaicos

Segundo Pinho e Galdino (2014), os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados principalmente como: conectados à rede (*on-grid*) e isolados (*off-grid*). Sendo a utilização destes sistemas dependente da aplicação e/ou disponibilidade dos recursos energéticos.

Os sistemas *off-grid* contam com uma unidade responsável pelo controle e condicionamento de potência, composta por um inversor e um controlador de carga. A Figura 5 a seguir representa o esquema de um sistema isolado. (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 5 - Esquema básico de um sistema *off-grid*.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

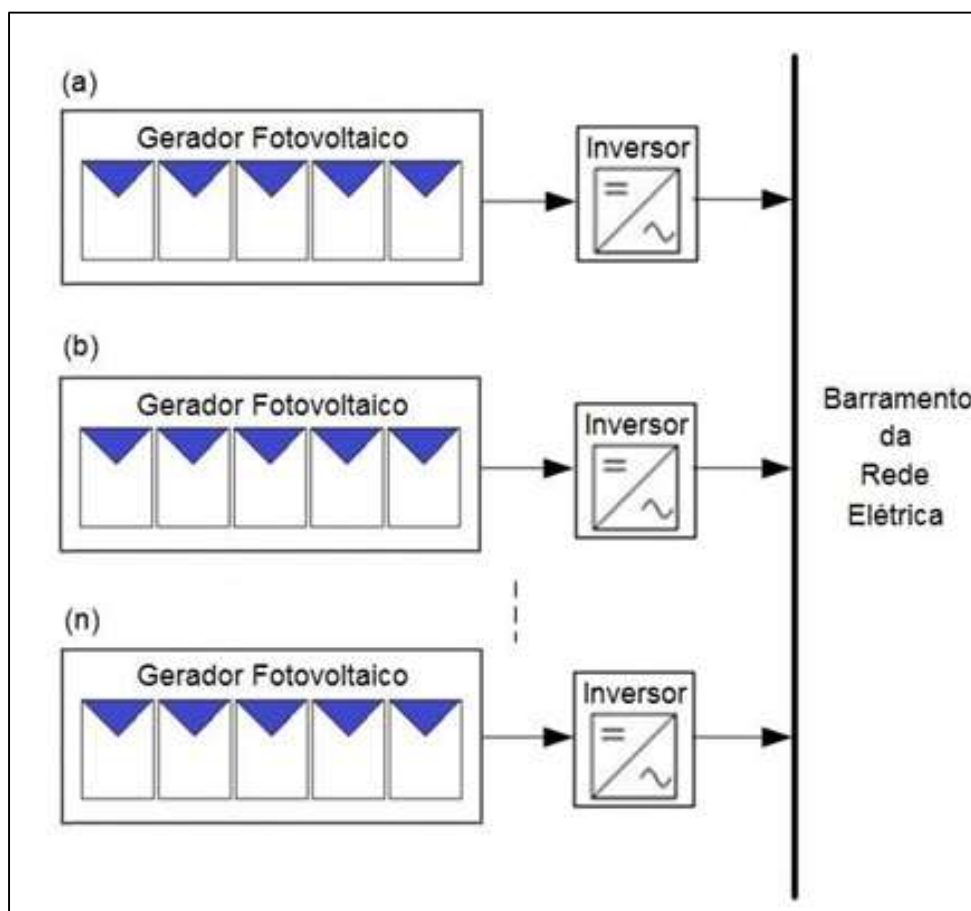
De acordo com Cavalcanti (2018), os sistemas *off-grid* necessitam de acumuladores (baterias) pois se faz necessário o armazenamento de energia quando há necessidade de utilizar aparelhos nos horários sem geração fotovoltaica. Além disso, a utilização das baterias estabelece uma referência de tensão CC para os inversores que alimentam a rede do sistema.

Nos sistemas *on-grid* a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica, não necessitando de armazenamento de energia, porém Cavalcanti (2018, p. 8.) ressalta que: “a interconexão da geração fotovoltaica ao sistema da concessionária exige que o sistema fotovoltaico tenha segurança e qualidade para não afetar o bom funcionamento da rede elétrica à qual está conectado.” Dessa forma, a ANEEL (Agência

Nacional de Energia Elétrica) regulamenta o acesso de micro e minigerações distribuídas através da Resolução 482/2012. (CAVALCANTI, 2018).

A Figura 6 abaixo representa o funcionamento básico de um sistema conectado à rede. A energia elétrica é gerada em corrente contínua pelo gerador fotovoltaico e convertida em corrente alternada pelo inversor, que entrega essa energia à rede elétrica. O objeto de estudo deste trabalho é um sistema *on-grid*.

Figura 6 - Esquema básico de um sistema *on-grid*.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Existem ainda os chamados sistemas híbridos, no qual há mais de uma forma de geração de energia. Pinho e Galdino (2014) exemplificam tais sistemas citando o grupo gerador a diesel, aerogeradores e geradores fotovoltaicos, os autores ainda ressaltam que tais sistemas são considerados mais complexos e necessitam de um controle capaz de integrar as formas de geração, otimizando a operação ao usuário. A Figura 7 a seguir apresenta um exemplo de sistema híbrido.

Figura 7 - Sistema híbrido com aerogeradores e células fotovoltaicas.



Fonte: Cavalcanti (2018) adaptado de Tanfon (2017).

2.4 Perdas no Sistema Fotovoltaico

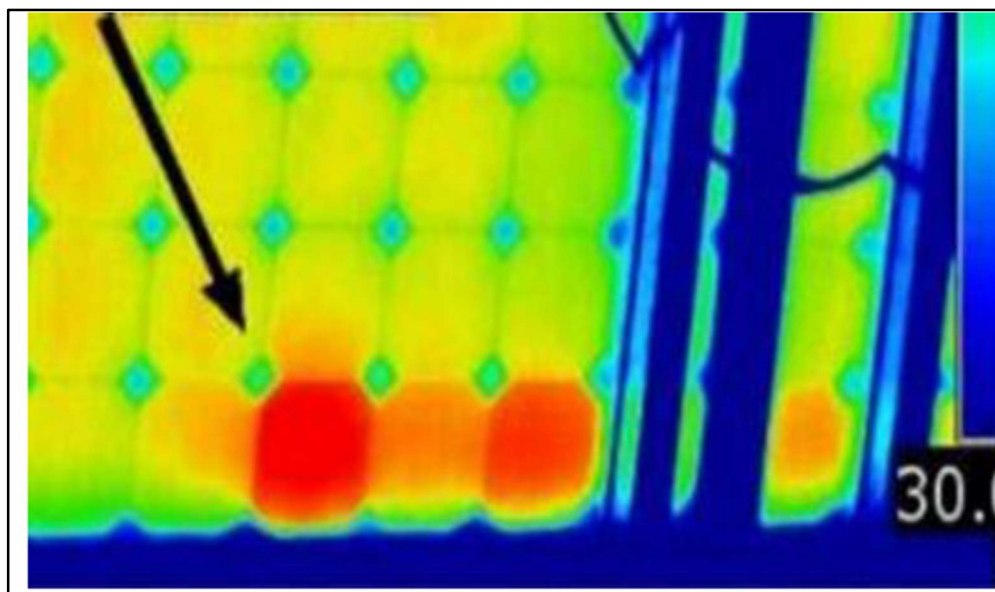
Os principais fatores que afetam o rendimento de um sistema fotovoltaico são:

O parâmetro de radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, bem como de sua inclinação e orientação; a temperatura dos painéis; o sombreamento parcial; o descasamento entre painéis de uma mesma *string* (que leva a perdas de rendimento conhecidas como *module mismatch losses*); as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis. (PENHA, 2018, p.14)

O acúmulo de poeira e outras impurezas pode causar o sombreamento parcial dos módulos fotovoltaicos. Isso pode ser um grande problema, pois, conforme Penha (2018, p.15) pontua, “uma célula solar parcialmente sombreada pode vir a atuar como uma carga, o que pode levar a um aquecimento excessivo da célula”, fenômeno conhecido como *hot spot*, que pode ser observado na Figura 8.

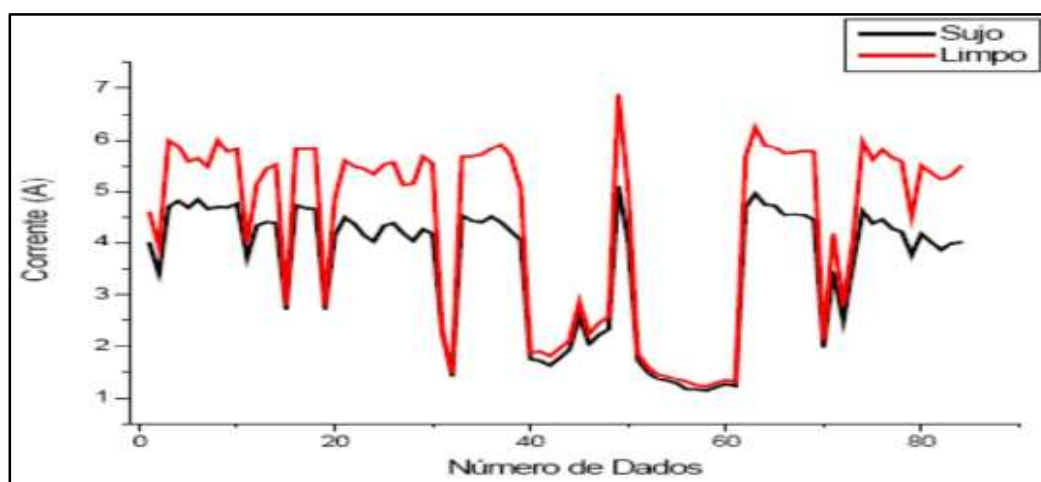
Segundo Cavalcante (2016, p. 2), “além da redução do rendimento, o acúmulo de impurezas por tempo prolongado pode causar manchas e corrosão nos módulos, reduzindo a produtividade do painel solar e a sua vida útil.” A Figura 9 apresenta um gráfico de comparação entre o nível de corrente elétrica (A) gerada em amostras de painéis fotovoltaicos sujos e limpos, nota-se que em painéis limpos, a corrente (A) atinge valores maiores.

Figura 8 - Pontos de aquecimento excessivo na célula fotovoltaica (*hot spots*).



Fonte: Pinho e Galdino (2014) adaptado de Relancio e Recuero (2013).

Figura 9 - Nível de corrente por amostras de painéis sujos e limpos.

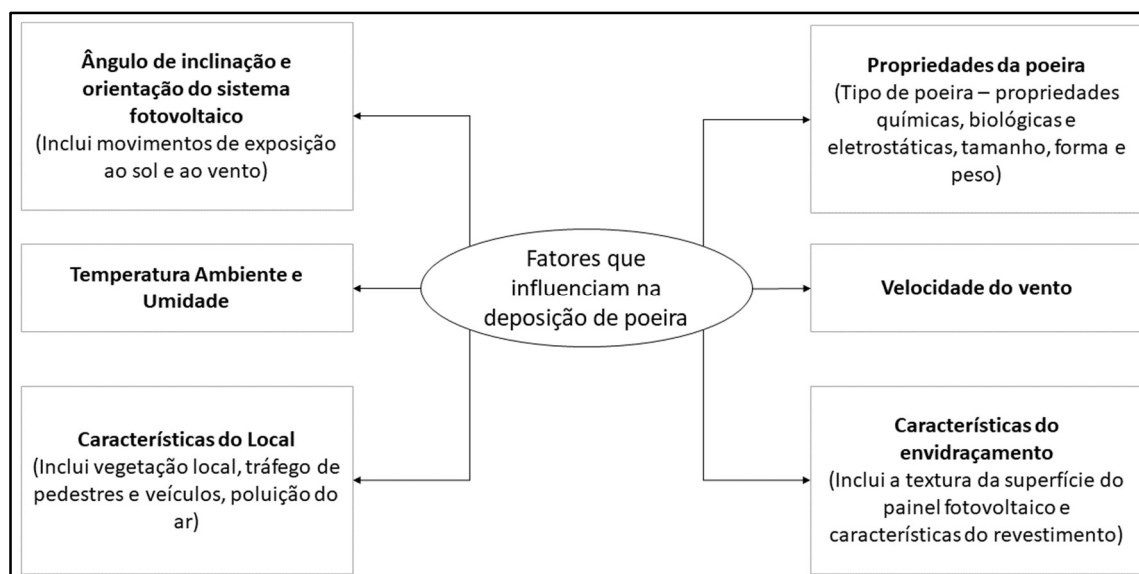


Fonte: Penha (2018) adaptado de Michels *et al.* (2009).

Como mostra a Figura 10, existem vários fatores que podem influenciar no quanto a sujeira afetará no desempenho de um sistema fotovoltaico. Sayyah *et al.* (2014) afirmam que os dois principais fatores são a localização da instalação e as condições ambientais locais; outros fatores importantes são: temperatura, velocidade do vento, corrosão e limitação dos dispositivos de conversão de energia. “Deve-se levar em consideração se há tráfego intenso de veículos, podendo ocasionar o acúmulo de poeira sobre os painéis, bem como árvores propiciando áreas de sombra, concentração de folhas e dejetos de pássaros.” (ROZZA e

PEREIRA, 2019, p. 34). Muitos estudos indicam que o fator mais determinante para a densidade de acumulação de poeira em um módulo fotovoltaico é seu ângulo de inclinação (SARAVANAN e DARVEKAN, 2018). Até mesmo propriedades da poeira podem ter um efeito considerável, já que impacta no quão facilmente a poeira pode ser removida dos módulos.

Figura 10 - Fatores que influenciam na deposição de poeira.



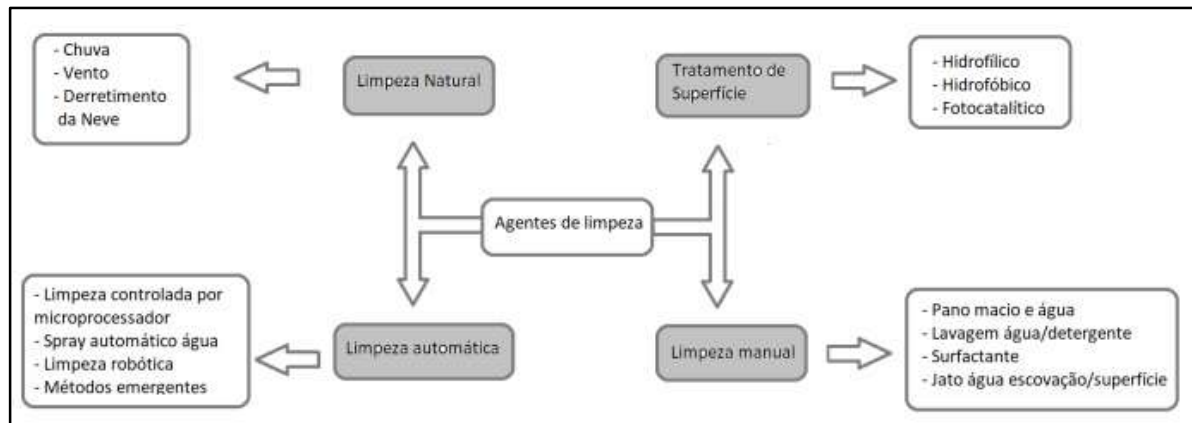
Fonte: Adaptado de Mani e Pillai (2010).

Segundo o Instituto de Energia e Meio Ambiente da USP (RENEW ENERGIA, 2015), a queda no rendimento de um sistema fotovoltaico provocada por impurezas pode chegar a 11%. Mas, segundo Messenger e Ventre (2005, p. 162), caso a célula fotovoltaica seja instalada em um local empoeirado, deve-se levar em consideração uma perda de 20% sobre a potência total gerada. Já Silva, Florian e Pestana (2018) afirmam que “em condições ambientais favoráveis à agravamento do problema o acúmulo pode gerar perdas de até 35% num período de seis meses.” Perdas maiores que 35% só são observadas em regiões desérticas, onde há incidência de tempestades de areia (MAGHAMI *et al.*, 2016).

2.5 Formas de Limpeza

A Figura 11 apresenta as formas de limpeza utilizadas em painéis fotovoltaicos, que podem ser classificadas em natural, manual, automática ou por tratamento de superfície. Essas metodologias serão discutidas nas próximas seções.

Figura 11 - Diferentes métodos de limpeza para remoção de poeira de painéis solares.



Fonte: Rozza e Pereira (2019) adaptado de Sayyah et al. (2014).

2.5.1 Limpeza natural

Fatores naturais, como chuva e vento, podem contribuir para a limpeza dos módulos fotovoltaicos. Ilustrando o efeito da limpeza natural, um estudo em Fortaleza apontou uma diferença de aproximadamente 8% no fator de desempenho comparando a mesma usina fotovoltaica na estação seca e na estação chuvosa (ARAUJO *et al.*, 2020).

Micheli e Muller (2017) realizaram estudos para avaliar a contribuição de diversos parâmetros meteorológicos na sujeidade dos módulos e a melhor correlação foi com a duração média de períodos secos. Porém, foi observado que chuvas com menos de 0,3 mm de precipitação não contribuem para a limpeza (MICHELI, RUTH e MULLER, 2017).

Segundo Sayyah *et al.* (2014), a chuva é considerada o agente natural de limpeza mais efetivo, mas possui um potencial efeito degradante: chuvas leves em combinação com uma atmosfera pulverosa podem piorar a performance. Além disso, o regime de chuvas nem sempre é frequente e regular o suficiente para que a limpeza seja satisfatória. Por essas razões, segundo Maghami *et al.* (2016), a sujeidade pode ter um efeito severo no rendimento de um sistema fotovoltaico até mesmo em áreas com volume de chuvas significativo.

O ângulo de inclinação dos módulos também tem forte influência sobre o quão efetiva será a limpeza natural: “se o painel estiver a uma inclinação de 0°, a quantidade de depósitos sobre o painel será de grande intensidade, enquanto, que se ele estivesse a 90°, a quantidade seria muito menor devido à autolimpeza das chuvas e em virtude da ação da gravidade” (ROZZA e PEREIRA, 2019, p. 34). Recomenda-se “uma inclinação mínima de 10°,

para favorecer a autolimpeza dos módulos pela ação da água da chuva” (PINHO e GALDINO, 2014, p. 367).

2.5.2 Limpeza manual

A limpeza manual ainda é o método mais utilizado, principalmente para instalações menores, para as quais se utiliza água, muitas vezes misturada com detergente, e uma flanela limpa (SAYYAH *et al.*, 2014; PINHO e GALDINO, 2014). O processo é semelhante à lavagem de janelas de prédios. Às vezes utilizam-se escovas com cerdas especiais projetadas para evitar arranhões. Algumas escovas também são conectadas diretamente a uma fonte de água permitindo, assim, limpeza e lavagem de forma simultânea (MAGHAMI *et al.*, 2016). Já no caso de usinas fotovoltaicas de larga escala, é comum usar jatos d’água de alta pressão (SAYYAH *et al.*, 2014).

Penha (2018, p. 4) comenta o seguinte sobre a limpeza manual de módulos fotovoltaicos:

Em muitos sistemas ou é feita de modo inseguro, o que pode causar acidentes, ou é feita de modo incorreto, permitindo sombreamentos na superfície dos painéis fotovoltaicos devido à sujidade presente, ocasionando problemas de desempenho no sistema gerador.

Penha (2018, p. 26) acrescenta que a limpeza manual é especialmente problemática em grandes usinas fotovoltaicas:

A tarefa de limpar os módulos é, em geral, feita por equipes que precisam andar por milhas de fileiras de painéis para realizarem o serviço, e por isso, várias empresas estão desenvolvendo e vendendo robôs para auxiliar nesta manutenção, pois empregar equipes para esse serviço não é a forma mais segura e eficiente para o processo.

Por um lado, a limpeza manual com água é considerada um dos métodos mais efetivos de limpeza por ser menos agressiva à superfície do módulo, ser econômica e ter um impacto ambiental mínimo (SAYYAH *et al.*, 2014, p. 38). Por outro lado, mão-de-obra e consumo de água representam a maior fração do custo da limpeza manual, e esses custos podem ser significativamente menores quando se emprega limpeza automatizada (SAYYAH *et al.*, 2014, p. 41).

2.5.3 Limpeza automatizada

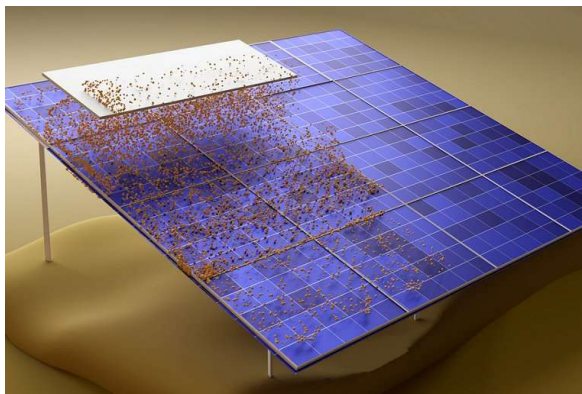
Foram desenvolvidas diversas tecnologias com o objetivo de automatizar o processo de limpeza dos módulos fotovoltaicos. Pode-se destacar 4 categorias de soluções: autolimpeza eletrostática, spray de água automático (como *Heliotex* e *SolarWash*), robôs de limpeza (como o V1, o *Ecoppia E4* e o limpador *SPOT*) e sistemas baseados em microcontrolador de escovagem automática (SARAVANAN e DARVEKAN, 2018; SAYYAH *et al.*, 2014; PENHA, 2018; CAVALCANTE *et al.*, 2016).

A autolimpeza eletrostática foi desenvolvida pensando nos painéis fotovoltaicos em Marte, mas também pode ser aplicado na Terra (CAVALCANTE *et al.*, 2016), especialmente em áreas secas e empoeiradas (KULKARNI *et al.*, 2018).

A tecnologia usa uma camada de um material eletricamente sensível sobre o vidro que cobre os painéis. Sensores monitoram os níveis de poeira sobre a superfície do painel e quando a poeira atinge um nível crítico, uma carga elétrica energiza o material, enviando uma onda que repele a poeira de toda a sua superfície. (CAVALCANTE *et al.*, 2016, p. 5)

A Figura 12 a seguir demonstra o esquema de limpeza eletrostática.

Figura 12 - Sistema de limpeza eletrostática.



Fonte: Inovação tecnológica (2022).

O método eletrostático não requer água e não envolve movimento mecânico (SAYYAH *et al.*, 2014), mas não remove a poeira se for molhado ou se estiver em ambiente úmido. Por esses e outros motivos, é mais viável para grandes usinas situadas em regiões áridas.

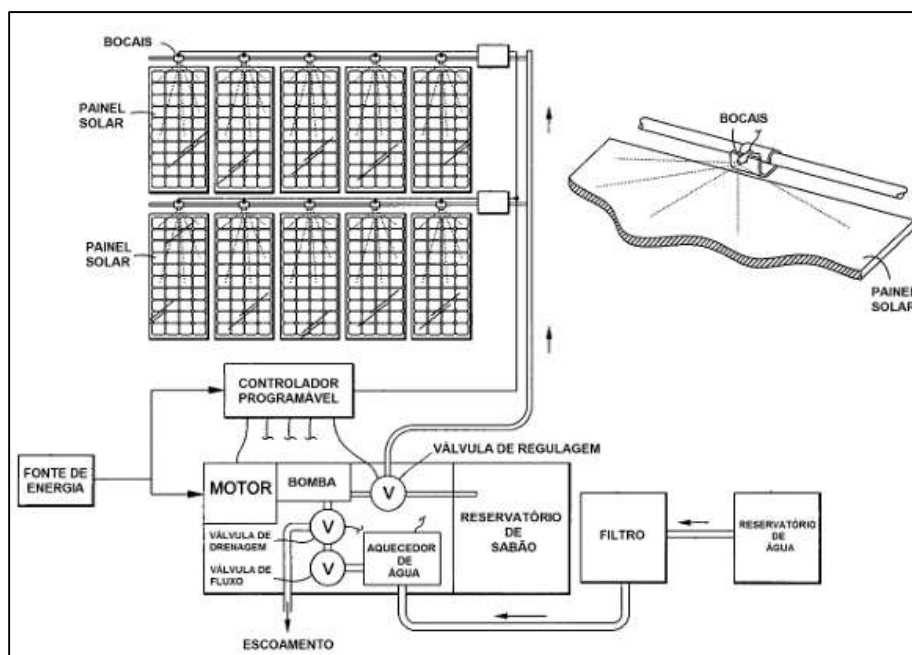
Sistemas semelhantes ao *Heliotex*, que usam bocais para borrifar água e sabão nos módulos fotovoltaicos, estão entre as soluções mais simples e populares. Segundo Penha (2018, p. 27): “Essa tecnologia é bem simples, sendo necessário apenas um circuito hidráulico,

reservatórios para a água e sabão, e válvulas de controle de fluxo, obviamente há um controlador para gerenciar o processo de limpeza”. Cavalcante *et al.* (2016, p. 4) descrevem o sistema do seguinte modo:

A água de um reservatório, conectada a uma mangueira de uma residência, fornece a água necessária para o sistema. Uma fonte de alimentação de 110 VAC é necessária para operar o controlador. A caixa de componentes *Heliotex* contém um reservatório para sabão e os componentes necessários para fornecer sabão quando necessário e a caixa do filtro. Há também uma válvula que impede a retrolavagem para o abastecimento de água. O sistema pode ser programado para realizar a limpeza em qualquer dia e horário determinado. Não requer nenhuma atenção exceto a substituição dos filtros e o ocasional reabastecimento de sabão.

A Figura 13 abaixo demonstra um esquema de funcionamento do sistema descrito.

Figura 13 - Funcionamento do sistema *Heliotex*



Fonte: Cavalcante et.al. (2016).

Segundo Sayyah *et al.* (2014), sistemas baseados na borrifação automática de água são satisfatórios para instalações fotovoltaicas de menor escala; mas, para plantas maiores, surgem diversos desafios técnicos, como a quantidade de água necessária e a consequente evaporação em ambientes de altas temperaturas, e a não uniformidade da água nas seções mais baixas dos arranjos de módulos.

A limpeza por robôs reduz o consumo de água, mas aumenta os custos de instalação e manutenção (SAYYAH, 2014). Um exemplo desse tipo de tecnologia é o robô E4 da *startup* israelense *Ecoppia*. Penha (2018, p. 26) a descreve da seguinte forma:

Esta tecnologia é equipada com painéis próprios que as tornam independentes de energia, que se baseia em três elementos-chaves para limpar os módulos: a gravidade, que aproveita a altura e o ângulo de inclinação dos painéis; o fluxo de ar; e uma escova composta por tecido de microfibras que é capaz de remover partículas de microns de tamanho.

A Figura 14 abaixo representa um sistema de limpeza utilizando o *Ecoppia* E4.

Figura 14 - Limpeza automatizada *Ecoppia* E4.



Fonte: Noctula Channel (ano desconhecido).

Como apontam Cavalcante *et al.* (2016, p. 5), “*Ecoppia* E4, foi projetado para grandes filas de painéis situados em ambientes secos e arenosos”. Por isso, suas principais características são a independência energética e a não utilização de água. O sistema utiliza computação em nuvem e comunicação sem fio em tempo real. Outra característica importante é a não utilização de produtos químicos (BURGER, 2014).

3 METODOLOGIA

Primeiramente, foi realizado um estudo de revisão bibliográfica dos tipos mais comuns de sistemas automáticos para limpeza dos módulos fotovoltaicos.

Em seguida, foi feito um estudo de caso tomando a usina fotovoltaica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) *Campus* Avançado Ipatinga como referência. Foi feita uma análise das perdas por sujidade, determinando o seu custo médio. Além disso, foi estimado o custo médio de cada método de limpeza (levando em conta tanto a implantação quanto a manutenção do sistema, no caso da limpeza automatizada, comparando com uma usina de referência). Por fim, os resultados foram comparados para determinar se a limpeza automática de módulos fotovoltaicos é viável, e se sim, qual dos métodos de limpeza é mais viável.

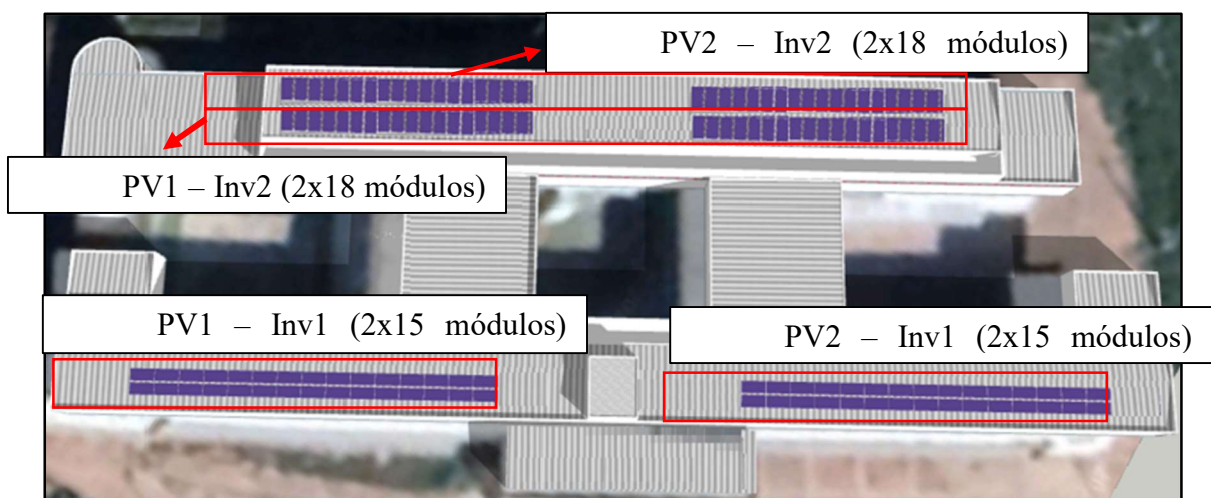
Ipatinga é um município cuja principal atividade econômica é a siderurgia, representada pela usina siderúrgica de aço ao carbono Usiminas. Consequentemente, apresenta uma concentração elevada de material particulado (MP), especialmente Partículas Totais em Suspensão (PTS) e MP10. Tais classificações referem-se a “partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de”, respectivamente, 50 micrômetros e 10 micrômetros” (SANTOS, 2021, p. 23; ARAÚJO et al., 2013). A distância entre o IFMG Campus Avançado Ipatinga e o complexo industrial da Usiminas é de apenas 1 km, aproximadamente. Portanto, sob a luz da bibliografia apresentada anteriormente, é razoável afirmar que a deposição de material particulado oleoso originado da siderúrgica exerce influência sobre as perdas que ocorrem na usina fotovoltaica analisada. Porém, serão necessários mais estudos para quantificar a magnitude dessa influência.

A usina fotovoltaica do IFMG *Campus* Avançado Ipatinga apresenta uma potência instalada de 44,84 kWp e conta com 132 módulos de 340 Wp, 2 inversores de 20 kW. O Quadro 1 apresenta os dados detalhados e na Figura 15 a distribuição das *strings* nas 4 entradas MPPT dos 2 inversores é apresentada. Os módulos apresentam ângulo de inclinação de 9°, dessa forma a inclinação destes está abaixo do valor mínimo recomendado (10°, como já mencionado), o que afeta negativamente a limpeza natural.

Quadro 1 - Dados da usina fotovoltaica do IFMG *Campus Avançado Ipatinga*

Potência instalada	Modelo dos Inversores	Nº de inversores	Modelo dos módulos	Nº de módulos
44,88 kWp	Renovigi, RENO-20k	2	Risen RSM144-6-340P	132

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 15 - Distribuição de módulos da usina fotovoltaica IFMG *Campus Avançado Ipatinga*.

Fonte: Adaptado de Flash (2019).

Utilizando os dados de geração da usina fotovoltaica e o cálculo da geração prevista para cada mês, é possível determinar quanta energia é perdida. Sabendo-se os dias em que foi feita a limpeza dos módulos, é possível determinar também o percentual dessas perdas que pode ser evitado através da limpeza.

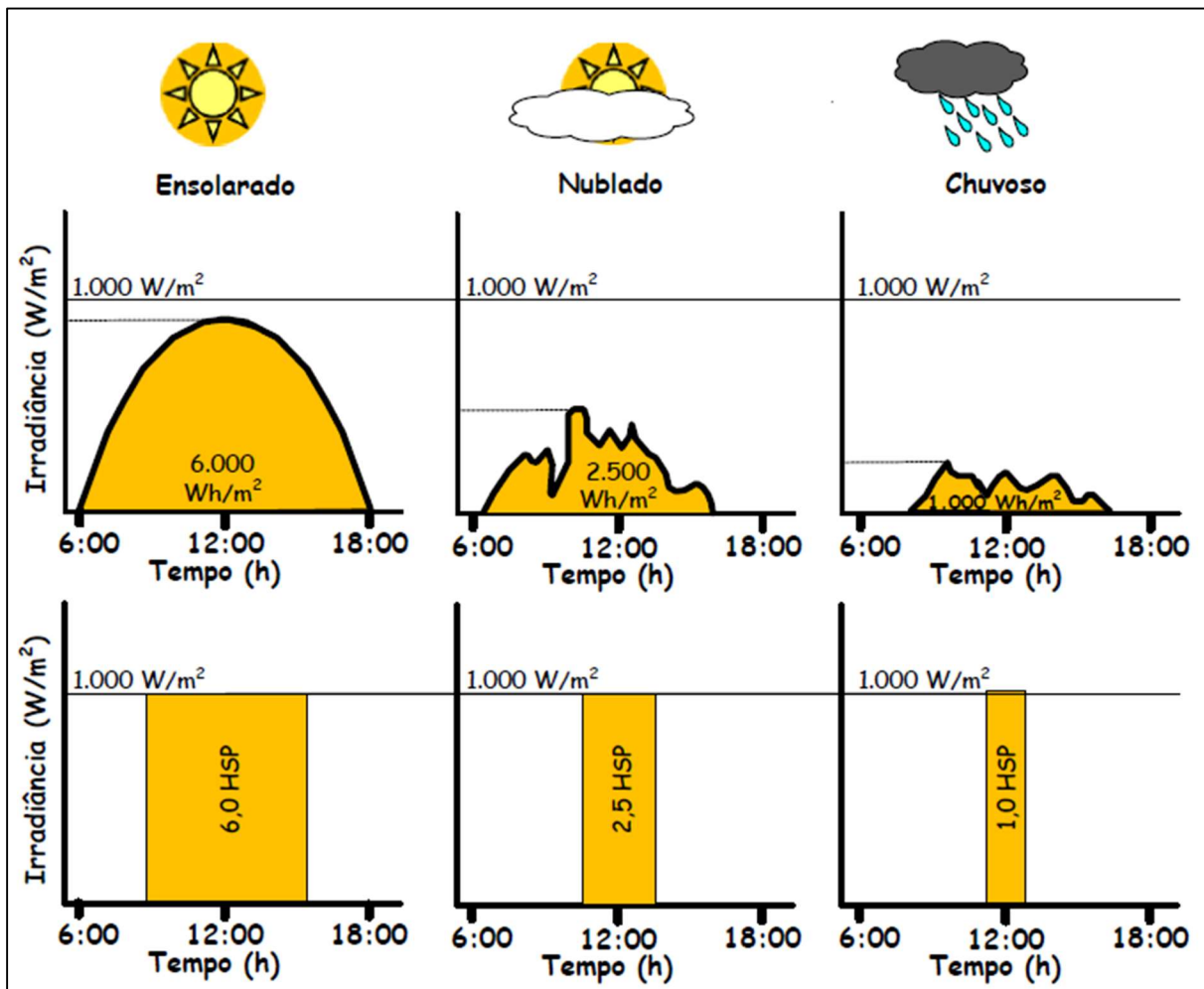
Uma estimativa da geração de energia mensal da usina fotovoltaica pode ser calculada através da equação 1 (SOUZA *et al.*, 2021).

$$G_T = P_{max} \cdot HSP \cdot n_{dias} \cdot n_{mod} \cdot \eta_{inv} \quad (1)$$

Sendo G_T a geração teórica estimada, P_{max} a potência máxima de um módulo em função de sua temperatura, HSP o número de horas de sol pleno para a inclinação dos módulos (que pode ser determinada com o auxílio de softwares como o Radiasol®), n_{dias} o número de dias do mês em questão, n_{mod} o número de módulos e η_{inv} o rendimento do inversor de

frequência. A Figura 16 auxilia na compreensão da grandeza HSP. Basicamente, tendo-se a irradiação total de um dia, fixa-se uma irradiância fictícia de 1000 W/m^2 e calcula-se quantas horas seriam necessárias, com este valor fixo de irradiância, para chegar àquele valor total de irradiação. Na prática, integra-se a irradiância no decorrer do tempo de um dia para obter-se a irradiação total e, em seguida, divide-se esse valor por 1000 W/m^2 .

Figura 16 - Perfis de irradiação solar diária com valores equivalentes de HSP



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Segundo Pinho e Galdino (2014), P_{max} é determinado a partir da potência do ponto de máxima potência para condições padrão de teste, $P_{MP(STC)}$; de γ , o coeficiente de variação da potência máxima do módulo com a temperatura (encontrado no *datasheet* do módulo); e de ΔT , a variação de temperatura do módulo em relação às condições padrão de teste (*Standard Test Conditions - STC*); conforme as equações 2 e 3:

$$P_{max} = P_{MP(STC)}(1 + (\gamma \cdot \Delta T)) \quad (2)$$

$$\Delta T = T_{mod} - 25 \quad (3)$$

Para um cálculo simplificado da temperatura do módulo, pode ser usada a equação 4, sendo T_{mod} a temperatura do módulo, T_{amb} a temperatura ambiente e G a irradiância média (W/m^2) calculada pelo software RadiaSol®. K_t é o coeficiente térmico do módulo, normalmente 0,03, e pode ser calculado através da equação 5 em função de $NOCT$ (temperatura nominal da célula nas condições de operação, informada no *datasheet* do módulo): (PINHO e GALDINO, 2014).

$$T_{mod} = T_{amb} + (K_t \cdot G) \quad (4)$$

$$K_t = \frac{NOCT - 20}{800} \quad (5)$$

A partir da geração teórica G_T e da geração real G_R , é calculado o fator de perdas percentual conforme a equação 6.

$$FP = \frac{G_T - G_R}{G_T} \times 100\% \quad (6)$$

Trabalhando-se a equação 6 é possível calcular G_T por meio de G_R e FP .

Com base na quantidade de energia perdida e no valor do kWh estabelecido pela distribuidora de energia CEMIG, determina-se o custo das perdas C_{perdas} , conforme a equação 7, que será usada como base para avaliar a viabilidade econômica de cada método de limpeza.

$$C_{perdas} = (G_T \cdot FP) \cdot \text{Valor do kWh} \quad (7)$$

Além disso, o C_{perdas} calculado em 7 será comparado ao custo de perdas estimado ($C_{perdas-est}$), calculado pela equação 8, obtido por meio de testes realizados na usina fotovoltaica. Os testes foram realizados no período de 06/10/2020 a 29/01/2021. A usina fotovoltaica, montada em novembro de 2019, foi limpa pela primeira vez em 06/10/2020, mas

apenas a PV2 do inversor 1 não recebeu a limpeza. Em 06/11/2020 apenas a PV2 recebeu a limpeza e, por fim, no dia 29/01/2021 ambas receberam a limpeza. O estudo permite determinar um fator de perdas estimado (FP_{est}) para 12 meses sem limpeza.

$$C_{perdas-est} = \left(\frac{-G_R}{(FP_{est} - 1)} \cdot FP_{est} \right) \cdot \text{Valor do kWh} \quad (8)$$

O custo da limpeza manual C_{LM} , será avaliado através do orçamento com empresas da região que realizam esse procedimento.

$$C_{LM} = C_{limpeza} + C_{água} \quad (9)$$

Será avaliado o custo da limpeza automática C_{LA} , através de estrutura fixa (tomando como exemplo o sistema da *Heliotex*) e através de robôs. O custo será estimado a partir do preço de cada produto e da estimação dos custos de instalação, operação e manutenção, incluindo as despesas com água, produtos de limpeza e energia. Visto que o custo encontrado estará referido a uma usina de referência, que varia de acordo com o produto, será utilizado um fator de equivalência (F_{eq}) para estimar qual seria o custo para a usina em estudo.

$$C_{LA} = (C_{equipamentos} + C_{instalação} + C_{operação-manutenção}) \cdot F_{eq} \quad (10)$$

Visto que muitos desses custos são informados em dólar, é necessário convertê-los para reais. Isso poderia ser feito utilizando simplesmente a taxa de câmbio de mercado, mas em estudos de viabilidade econômica normalmente opta-se por usar o Índice Big Mac, já que a taxa de câmbio não leva em conta a diferença no poder de compra entre as diferentes moedas (MENEZES, 2014).

Para cada opção de limpeza, será calculado o custo das perdas evitadas através da diferença entre o custo das perdas com e sem limpeza.

$$C_{PerdasEvitadas} = C_{PerdasComLimpeza} - C_{PerdasSemLimpeza} \quad (11)$$

Ao avaliar as perdas, é preciso levar em conta a influência do regime local de chuvas, que é descrito na Tabela 1. Como mencionado na seção 2.5.1, chuvas com menos de 0,3 mm de precipitação não contribuem para a limpeza. Mas no caso de Ipatinga, todos os meses

apresentam precipitação média por dia de chuva superior a 0,3 mm. Nota-se também que os meses de novembro a março apresentam maior precipitação média, mais dias de chuva e maior relação milímetro de chuva por dia de chuva. Assim, esses cinco meses foram considerados como o período úmido em Ipatinga.

Tabela 1 – Regime de chuvas em Ipatinga - MG

Meses:	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Dias de chuva	16	10,8	12,9	6,5	3,2	1,4	0,8	1,7	5,1	9,7	16,4	19,6
mm de chuva	192,1	119,4	115	50,3	19,2	8,2	4,3	8,8	30,9	83	184,5	244,8
mm de chuva/dia de chuva	12,0	11,1	8,9	7,7	6,0	5,9	5,4	5,2	6,1	8,6	11,3	12,5

Fonte: Weather Spark, 2022.

O método da limpeza eletrostática não foi avaliado devido a inviabilidade técnica de se usar esse método em uma região de clima úmido. Mas nos casos em que esse método é aplicável, sua viabilidade econômica pode ser avaliada seguindo uma metodologia similar à utilizada neste trabalho.

Para determinar a viabilidade econômica de cada método de limpeza, foi utilizado o método do *payback* simples, que pode ser definido como o tempo necessário para recuperar o investimento inicial em um projeto, e pode ser calculado “dividindo-se o investimento inicial pela entrada anual de caixa” (GITMAN, 2004, p. 339). Portanto, será determinado o *payback* de cada método de limpeza considerando o investimento inicial e o lucro gerado, isto é, o custo das perdas menos o custo de manutenção e operação do sistema de limpeza.

$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Retorno} \quad (12)$$

$$Retorno = C_{PerdasEvitadas} - C_{Anual_Limpeza} \quad (13)$$

Serão utilizados os dados de radiação solar (W/m^2), temperaturas média, máxima e mínima e umidade média, coletados através das planilhas geradas pela estação meteorológica Hobo® modelo RX3003 (GSM) presente no Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Avançado Ipatinga para cálculo do HSP no plano inclinado através do software RadiaSol®.

4 RESULTADOS

Os dados calculados de geração teórica e fator de perdas durante o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2020 são apresentados na Tabela 2 abaixo. O alto fator de perdas em janeiro de 2020 deve-se a “uma queima de fusíveis que ocorreu no dia 28/12/19, que teve como consequência o funcionamento de apenas 50% da capacidade até o dia 16/01/2021”. Além disso, “em outubro, nota-se uma redução abrupta das perdas”, que pode ser atribuída “à realização da limpeza realizada no dia 06/10/20.” (SOUZA *et al.*, 2021) Tendo essas ressalvas em mente, esses dados podem servir de referência para avaliar se os fatores de perda adotados no estudo são condizentes com a realidade.

Tabela 2 - Geração estimada e fator de perdas ao longo dos meses de 2020.

Mês	Geração teórica (kWh)	Fator de perdas
jan. 20	6.077,89	26,00%
fev. 20	6.115,02	13,00%
mar. 20	5.396,73	11,30%
abr. 20	4.866,08	13,70%
mai. 20	5.161,30	18,10%
jun. 20	4.936,64	23,90%
jul. 20	4.978,73	21,20%
ago. 20	5.476,48	26,90%
set. 20	6.655,09	31,80%
out. 20	4.147,68	1,90%
nov. 20	5.690,36	11,90%
dez. 20	6.248,14	15,30%

Fonte: Souza et al. (2021)

Através de testes realizados de 06/10/2020 a 29/01/2021, concluiu-se que, em média, o fator de perdas aumenta 4,20% a cada mês sem limpeza, um teste abrangendo um maior período de dados, como 12 meses teria uma maior confiabilidade a esse indicador, porém estes foram os dados coletados durante o período de realização deste trabalho. Com essa informação e sabendo que a tarifa de energia para o horário fora de ponta foi de 0,45619

R\$/kWh¹, referente à fatura do mês de junho de 2020 para o IFMG *Campus Avançado Ipatinga*, acrescido dos impostos (i.e., tarifa base 0,40907 R\$/kWh, ICMS de 6%, PASEP 0,77% e COFINS 3,56%), o custo das perdas foi estimado através da equação 7 conforme a Tabela 3. Foi feita uma simulação de 24 meses, considerando que as perdas aumentariam 4,20% por mês até chegar a 35%, diminuindo 4% nos meses chuvosos (novembro a março).

Tabela 3 - Custo de perdas sem limpeza.

Mês	Geração teórica (kWh)	Fator de perdas	Custo de perdas
jan.	6.077,89	0,20%	R\$ 5,55
fev.	6.115,02	0,40%	R\$ 11,16
mar.	5.396,73	0,60%	R\$ 14,77
abr.	4.866,08	4,80%	R\$ 106,55
mai.	5.161,30	9,00%	R\$ 211,91
jun.	4.936,64	13,20%	R\$ 297,27
jul.	4.978,73	17,40%	R\$ 395,20
ago.	5.476,48	21,60%	R\$ 539,64
set.	6.655,09	25,80%	R\$ 783,28
out.	4.147,68	30,00%	R\$ 567,64
nov.	5.690,36	30,20%	R\$ 783,96
dez.	6.248,14	30,40%	R\$ 866,50
jan.	6.077,89	30,60%	R\$ 848,44
fev.	6.115,02	30,80%	R\$ 859,20
mar.	5.396,73	31,00%	R\$ 763,20
abr.	4.866,08	35,00%	R\$ 776,95
mai.	5.161,30	35,00%	R\$ 824,09
jun.	4.936,64	35,00%	R\$ 788,22
jul.	4.978,73	35,00%	R\$ 794,94
ago.	5.476,48	35,00%	R\$ 874,41
set.	6.655,09	35,00%	R\$ 1.062,59
out.	4.147,68	35,00%	R\$ 662,25
nov.	5.690,36	35,00%	R\$ 908,56
dez.	6.248,14	35,00%	R\$ 997,62
Custo anual de perdas			R\$ 7.371,94

Fonte: Dados da pesquisa.

¹ Foi utilizado apenas o custo da energia no horário fora ponta e com incidência da bandeira vermelha patamar 2, presente no mês de junho de 2020. Para uma simulação mais precisa, seria necessário levar em consideração o consumo no horário de ponta e sua tarifa, além de estimar quais meses do ano não se deve utilizar a bandeira vermelha patamar 2.

Portanto, o custo anual das perdas de energia na usina fotovoltaica em estudo seria de aproximadamente R\$ 7.371,94.

Para o cálculo do custo da limpeza manual, foi feito orçamento com 4 empresas da região que realizam esse serviço, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Custo da limpeza manual.

Empresa	Custo por limpeza
T8M Energia Solar	R\$ 1.346,40
EME Solar	R\$ 1.237,00
Conversol Engenharia	R\$ 1.320,00
Solar Efficiency	R\$ 1.056,00
Custo médio por limpeza	R\$ 1.239,85

Fonte: Dados da Pesquisa.

Conforme a equação 9, deve-se somar esse custo de limpeza de R\$ 1.239,85 com o custo da água utilizada no processo. Segundo Moura (2019, p. 108), estima-se que o consumo de água é de cerca de 1 litro por m² de módulo fotovoltaico. Portanto, a limpeza de 132 módulos, apresentando cada um deles 2 m² de área, gastaria 264 litros. O custo da água utilizada seria desprezível em comparação ao custo total da limpeza, e por isso será desprezado neste trabalho.

Considerando que fossem realizadas 3 limpezas manuais por ano (uma a cada quatro meses), o fator de perdas a cada mês e seu respectivo custo, bem como o custo anual das perdas, são representados na Tabela 5. Para fins de simplificação dos cálculos, foi considerado que, no mês da limpeza, o fator de perdas seria zero. Na verdade, como mostra a Tabela 2, mesmo no mês da limpeza houve um pequeno fator de perdas por sujidade. Porém, para os fins desse estudo, isto é, comparar diferentes opções de limpeza, esse fator pode ser desprezado.

O custo médio anual da limpeza manual seria de R\$ 3.719,55. O custo das perdas evitadas, conforme a equação 11, seria de R\$ 6.204,61. Portanto, conforme a equação 13, haveria um retorno de R\$ 2.485,06.

Considerando-se duas limpezas por ano, o retorno passa a ser ainda maior. A Tabela 6 apresenta o custo anual de perdas nesse cenário.

O custo das perdas evitadas passa a ser R\$ 5.575,04. O custo médio de duas limpezas (investimento inicial) é de R\$ 2.479,70. Assim, o retorno do investimento passa a ser R\$ R\$ 3.095,34.

Tabela 5 - Custo de perdas com limpeza manual a cada 4 meses.

Mês	Geração teórica (kWh)	Fator de perdas	Custo de perdas
jan.	6.077,89	0,20%	R\$ 5,55
fev.	6.115,02	0,40%	R\$ 11,16
mar.	5.396,73	0,60%	R\$ 14,77
abr.	4.866,08	0,00%	R\$ 0,00
mai.	5.161,30	4,20%	R\$ 98,89
jun.	4.936,64	8,40%	R\$ 189,17
jul.	4.978,73	12,60%	R\$ 286,18
ago.	5.476,48	0,00%	R\$ 0,00
set.	6.655,09	4,20%	R\$ 127,51
out.	4.147,68	8,40%	R\$ 158,94
nov.	5.690,36	8,60%	R\$ 223,25
dez.	6.248,14	0,00%	R\$ 0,00
jan.	6.077,89	0,20%	R\$ 5,55
fev.	6.115,02	0,40%	R\$ 11,16
mar.	5.396,73	0,60%	R\$ 14,77
abr.	4.866,08	0,00%	R\$ 0,00
mai.	5.161,30	4,20%	R\$ 98,89
jun.	4.936,64	8,40%	R\$ 189,17
jul.	4.978,73	12,60%	R\$ 286,18
ago.	5.476,48	0,00%	R\$ 0,00
set.	6.655,09	4,20%	R\$ 127,51
out.	4.147,68	8,40%	R\$ 158,94
nov.	5.690,36	12,60%	R\$ 327,08
dez.	6.248,14	0,00%	R\$ 0,00
Custo anual de perdas			R\$ 1.167,33

Fonte: Dados da Pesquisa.

Por fim, considerando a realização de apenas uma limpeza por ano, a Tabela 7 apresenta o custo anual de perdas. O custo das perdas evitadas seria de R\$ R\$ 4.272,50. Dessa forma, para a limpeza a cada um ano há um retorno de R\$ 3.032,65.

O *payback* simples da limpeza manual, conforme a equação 12, é de aproximadamente 5 meses para limpeza anual, 10 meses para limpeza semestral e 18 meses para limpeza quadrimestral. Portanto, qualquer outro método de limpeza com *payback* superior

a 4 meses (isto é, que demore mais 4 meses para “se pagar”), é menos viável que a limpeza manual para o caso em estudo. A Tabela 8 resume os resultados da simulação econômica da limpeza manual.

Tabela 6 - Custo de perdas para uma limpeza manual a cada 6 meses.

Mês	Geração teórica (kWh)	Fator de perdas	Custo de perdas
jan.	6.077,89	0,20%	R\$ 5,55
fev.	6.115,02	0,40%	R\$ 11,16
mar.	5.396,73	0,60%	R\$ 14,77
abr.	4.866,08	4,80%	R\$ 106,55
mai.	5.161,30	9,00%	R\$ 211,91
jun.	4.936,64	0,00%	R\$ 0,00
jul.	4.978,73	4,20%	R\$ 95,39
ago.	5.476,48	8,40%	R\$ 209,86
set.	6.655,09	12,60%	R\$ 382,53
out.	4.147,68	16,80%	R\$ 317,88
nov.	5.690,36	17,00%	R\$ 441,30
dez.	6.248,14	0,00%	R\$ 0,00
jan.	6.077,89	0,20%	R\$ 5,55
fev.	6.115,02	0,40%	R\$ 11,16
mar.	5.396,73	0,60%	R\$ 14,77
abr.	4.866,08	4,80%	R\$ 106,55
mai.	5.161,30	9,00%	R\$ 211,91
jun.	4.936,64	0,00%	R\$ 0,00
jul.	4.978,73	4,20%	R\$ 95,39
ago.	5.476,48	8,40%	R\$ 209,86
set.	6.655,09	12,60%	R\$ 382,53
out.	4.147,68	16,80%	R\$ 317,88
nov.	5.690,36	17,00%	R\$ 441,30
dez.	6.248,14	0,00%	R\$ 0,00
Custo anual de perdas			R\$ 1.796,90

Fonte: Dados da Pesquisa.

Representando a limpeza automática por aspersão de água, foram calculados os custos do sistema *Heliotex* conforme a equação 10. Considerando que o custo de aquisição seria

US\$ 2.489,00 para um sistema com 50 módulos (HELIOTEX, 2022) e a usina analisada possui 132 módulos, foi utilizado um fator de equivalência de 2,64 para estimar qual seria o custo de instalação para a usina do IFMG *Campus* Avançado Ipatinga. E utilizando o índice Big Mac de 2022, igual a 4,45 (PICININ, 2022), para converter esse valor para reais, foi estimado que o custo de aquisição seria R\$ 29.240,77.

Tabela 7 - Custo de perdas para uma limpeza manual a cada 1 ano.

Mês	Geração teórica (kWh)	Fator de perdas	Custo de perdas
jan.	6.077,89	0,20%	R\$ 5,55
fev.	6.115,02	0,40%	R\$ 11,16
mar.	5.396,73	0,60%	R\$ 14,77
abr.	4.866,08	4,80%	R\$ 106,55
mai.	5.161,30	9,00%	R\$ 211,91
jun.	4.936,64	13,20%	R\$ 297,27
jul.	4.978,73	0,00%	R\$ 0,00
ago.	5.476,48	4,20%	R\$ 104,93
set.	6.655,09	8,40%	R\$ 255,02
out.	4.147,68	12,60%	R\$ 238,41
nov.	5.690,36	12,80%	R\$ 332,27
dez.	6.248,14	13,00%	R\$ 370,54
jan.	6.077,89	13,20%	R\$ 365,99
fev.	6.115,02	13,40%	R\$ 373,81
mar.	5.396,73	17,60%	R\$ 433,30
abr.	4.866,08	21,80%	R\$ 483,93
mai.	5.161,30	26,00%	R\$ 612,18
jun.	4.936,64	30,20%	R\$ 680,12
jul.	4.978,73	0,00%	R\$ 0,00
ago.	5.476,48	4,20%	R\$ 104,93
set.	6.655,09	8,40%	R\$ 255,02
out.	4.147,68	12,60%	R\$ 238,41
nov.	5.690,36	12,80%	R\$ 332,27
dez.	6.248,14	13,00%	R\$ 370,54
Custo anual de perdas			R\$ 3.099,44

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 8 - Payback simples da limpeza manual.

Periodicidade	4 meses	6 meses	Anual
Custo anual de perdas (R\$)	1.167,33	1.796,90	3.099,44
Custo médio anual da limpeza (R\$)	3.719,55	2.479,70	1.239,85
Custo das perdas evitadas (R\$)	6.204,61	5.575,04	4.272,50
Retorno (R\$)	2.485,06	3.095,34	3.032,65
Payback	17,9 meses	9,6 meses	4,9 meses

Fonte: Dados da pesquisa.

Segundo o fabricante, considerando um sistema residencial de 50 módulos lavado quinzenalmente, o sabão e os filtros seriam substituídos a cada seis meses, aproximadamente (SOLAR, 2022). O sabão é na verdade uma solução especial de limpeza que custa aproximadamente U\$ 42,93 e o filtro deionizador de água custa R\$ 460,00. Assim, foi estimado que o custo anual de operação seria de aproximadamente R\$ 2.933,14. Devido à ausência de dados sobre o assunto, não foi estimado o custo anual de manutenção do sistema *Heliotex*, o que significa que o *payback* apresentado posteriormente é otimista.

Considerando que uma limpeza quinzenal limitasse as perdas por sujidade a 2,1%, o custo anual das perdas seria R\$ 149,97. Assim, o custo das perdas evitadas seria R\$ 7.221,97 por ano. Considerando a entrada de caixa anual como a diferença entre as perdas evitadas e o custo anual de operação, aplica-se a equação 11, chegando-se à conclusão de que o *payback* seria em 6,8 anos. Visto que esse tempo é muito maior que o *payback* da limpeza manual anual, fica claro que esse método automatizado de limpeza não é viável para a usina analisada. Até porque, como já mencionado, esse valor é otimista, já que alguns custos não foram levados em consideração devido à falta de informações.

Por fim, representando a limpeza robótica, foi avaliado o robô de limpeza Solaorx-B30M. O custo de aquisição é R\$ 172.400,11 (MÁQUINA, 2022) e o custo anual de operação e manutenção foi estimado como R\$ 5.000,00. Considerando que as perdas por sujidade seriam limitadas a 2,1% e aplicando o mesmo método descrito no parágrafo anterior, o *payback* seria em 77,6 anos. Robôs de limpeza apresentam altíssimos custos e por isso não são economicamente viáveis para usinas de pequeno ou médio porte. A Tabela 9 resume os resultados da simulação econômica da limpeza automática.

Tabela 9 - Payback simples da limpeza automática.

Custos (R\$)	<i>Heliotex</i>	Robô Solaorx-B30M
Custo de aquisição	R\$ 29.240,77	R\$ 172.400,11
Custo anual da operação e manutenção	R\$ 2.933,14	R\$ 5.000,00
Custo anual de perdas	R\$ 629,89	R\$ 629,89
Custo das perdas evitadas	R\$ 6.742,05	R\$ 6.742,05
Payback	7,68 anos	98,96 anos

Fonte: Dados da pesquisa.

5 CONCLUSÃO

O acúmulo de impurezas na superfície dos módulos fotovoltaicos pode causar uma perda considerável de energia. Em alguns casos, agentes naturais como a chuva são suficientes para limitar essas perdas. Em muitos casos, são realizadas limpezas periódicas de forma manual. Mas recentemente, têm surgido diversos sistemas automatizados de limpeza de módulos fotovoltaicos. Cada usina fotovoltaica é diferente, e é preciso avaliar cuidadosamente qual o método de limpeza é mais viável para cada caso. No caso da usina fotovoltaica do IFMG *Campus* Avançado Ipatinga, foi demonstrado que a limpeza manual, realizada uma vez por ano, apresenta o melhor retorno econômico. Espera-se que o presente trabalho possa servir de modelo para outros estudos de caso semelhantes.

Trabalhos futuros podem estudar em mais profundidade o fator de perdas devido a sujidade, o que permitirá análises mais precisas. Por exemplo, pode-se estudar a deposição de material particulado advindo da indústria nos módulos e o quanto isso afeta no desempenho da usina fotovoltaica. Pode-se estudar também a limpeza natural através da chuva, para determinar o quanto a precipitação afeta o fator de perdas. Também pode ser estudado o quanto a diferença na inclinação dos módulos afeta a efetividade da limpeza natural. Chegando-se a valores mais preciso quanto à variação do fator de perdas por sujidade no decorrer de um ano, será possível verificar os resultados deste trabalho quanto à periodicidade ótima de limpeza e até mesmo determinar o melhor mês para se realizar a limpeza.

KULKARNI, Rutvij P. et al. **Automatic Solar Panel Cleaning System**. International Journal of Advance Research in Science and Engineering, [s.l.], v. 7, n. 7, p. 1173-1181, ab. 2018. Disponível em: <http://www.ijarse.com/images/fullpdf/1525503460_Reva705ijarse.pdf>. Acesso em: jul. 2021.

MAGHAMI, Mohammad Reza et al. Power loss due to soiling on solar panel: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Bangalore, v. 59, p.1307-1316, jun. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>>. Acesso em: 22 de jul. 2021.

MANI, Monto; PILLAI, Rohit. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Bangalore, v. 14, p.3124-3131, 2010. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.irishellas.com/files/Impact-of-Dust-on-Solar-Photovoltaic--PV--Performance.pdf>>. Acesso em: 22 de jul. 2021.

MÁQUINA de lavar portátil seca/da limpeza da água do robô da limpeza do painel solar automático para sistemas solares. **AliExpress**, 2022. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/1005004104242043.html>>. Acesso em: 13 de set. 2022.

MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering** (2° ed.). Boca Raton: CRC Press LLC, 2005.

MENEZES, Karinna Carla Carvalho de. **O impacto das distorções na taxa de câmbio na análise social de projetos**. 2014. 63 f., il. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas)—Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MICHELIS, R. N. et al. **Influência do Acumulo de Poeira Sobre a Eficiência de Painéis Fotovoltaicos na Região do Oeste Paranaense**. Revista Agrogeoambiental. Florianópolis. v. 1. n. 3. P., 2009. Disponível em: <<https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/221>>. Acesso em: jul. 2021.

MICHELI, Leonardo; MULLER, Matthew. An investigation of the key parameters for predicting PV soiling losses. **Progress in photovoltaics: research and applications**, v. 25, n. 4, p. 291-307, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.2860>. Acesso em: 10 set. 2022.

MICHELI, Leonardo; RUTH, Daniel; MULLER, Matthew. **Seasonal trends of soiling on photovoltaic systems**. In: 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE, 2017. p. 2301-2306. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8366381>. Acesso em: 10 set. 2022.

MOURA, Renan Corrêa de. **Metodologia prática para análise de perda de eficiência de usinas fotovoltaicas com base nos custos de operação**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. 141f. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-06012020-100739/publico/RenanCorreadeMouraCorr19.pdf>> Acesso em: 23 de jul. 2021.

NOCTULA CHANNEL. **Lavar painéis solares no deserto.** Ano desconhecido. Disponível em: <<https://noctulachannel.com/paineis-solares-robo-limpeza/>> Acesso em: ago. 2022.

PENHA, Marcio Bruno Amoras da. **Desenvolvimento de um módulo de comando para uma proposta de sistema de limpeza em painéis fotovoltaicos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2018, 56p. Disponível em:

<<https://sigaa.unifap.br/sigaa/verProducao?idProducao=175139&key=a7ea8e2dcebbbf8c3d77633a2980fb92#:~:text=O%20objetivo%20principal%20do%20trabalho,realiza%C3%A7%C3%A3o%20do%20processo%20de%20forma>>. Acesso em: 22 de jul. 2021.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319305620_Atlas_Brasileiro_de_Energia_Solar_-_2_Edicao>. Acesso em: jul. 2021.

PICININ, Roberta. Dólar americano a R\$ 4,45? Entenda o cálculo do índice Big Mac: A desvalorização do real chega a 17,5% no primeiro semestre. **Estadão**, São Paulo, 1 ago. 2022. E-Investidor. Disponível em: <https://investidor.estadao.com.br/comportamento/dolar-5-reais-indice-big-mac/>. Acesso em: 27 dez. 2022.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014. 530 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> Acesso em: jul. 2021.

RELANCIO, J; RECUERO, L. **Photovoltaic Systems Training. Session 4 - PlantMaintenance.** 2010. Disponível em <<http://www.leonardo-energy.org/node/148631>>. Acesso em: fev. 2013.

RENEW ENERGIA. **Manutenção preventiva: Solar fotovoltaico, poeira e pombos.** 2015. Disponível em: <<http://renewenergia.com.br/manutencao-preventiva-solar-fotovoltaico-poeira-e-pombos/>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

ROCHA, Ian F. B. et al.. Análise da viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede para atender o laboratório de eletrônica analógica e digital do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual do Piauí. In: XL ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2020, Foz do Iguaçu.

ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil.** Revista Brasileira de Energia Solar, [s. l.], ano 7, v. VII, n. 2, p. 140-147, dez. 2016.

ROZZA, Bruno.; PEREIRA, Luis Fernando S. **Processo automático para limpeza de sistema fotovoltaico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Elétrica). Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019, 62p. Disponível em: <<https://sigaa.unifap.br/sigaa/verProducao?idProducao=175139&key=a7ea8e2dcebbbf8c3d77633a2980fb92#:~:text=O%20objetivo%20principal%20do%20trabalho,realiza%C3%A7%C3%A3o%20do%20processo%20de%20forma>>. Acesso em: 23 de jul. 2021.

SANTOS, Jorge Luiz dos. **Poluição atmosférica por emissão de partículas sedimentáveis na área urbana de Ipatinga (MG): em foco a proposição de uma sequência didática contextualizada e interdisciplinar para o ensino de química**. 2021. 187 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.

SARAVANAN, V. S. et al. **Solar Photovoltaic Panels Cleaning Methods A Review**. Department of Mechanical Engineering. Bhivarabai Sawant College of Engineering Research, Symbiosis Institute of Technology, Pune, India, 2018. 17p. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Sanjay-Darvekar/publication/338990581_Solar_Photovoltaic_Panels_Cleaning_Methods_A_Review/links/5e37c59592851c7f7f17baef/Solar-Photovoltaic-Panels-Cleaning-Methods-A-Review.pdf>. Acesso em: 23 de jul. 2021.

SAYYAH, Arash; HORENSTEIN, Mark N.; MAZUMDER, Malay K.. **Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels**. Solar Energy, [s.l.], v. 107, p.576-604, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/1644257>>. Acesso em: jul. 2021.

SILVA, Pedro Henrique Tronco; FLORIAN, Fabiana; PESTANA, Fernanda Augusto Baptistini. **Estudo de Perdas em Sistemas Fotovoltaico**. Universidade de Araraquara, 2018. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_pedrohenriquetronco_04dez2018.doc_3.pdf. Acesso em: set. 2022.

SOLAR Panel Cleaning Services. **Heliotex™, LLC**, 2022. Disponível em: <<https://www.solarpanelcleaningsystems.com/solar-panel-cleaning-services.html>>. Acesso em: 13 de set. 2022.

SOUZA, José Henrique Ferreira de.; SOUZA, Mariana Campos.; FERREIRA, Willian Marlon.; FERNANDES, Alex de Andrade. **Análise do desempenho da usina fotovoltaica do IFMG Campus Avançado Ipatinga**. IX Seminário de Iniciação Científica do IFMG – 07 a 09 de jul. 2021, Planeta IFMG. Ipatinga, 2021. 5p. Disponível em: <<https://www.ifmg.edu.br/sic/edicoes-antiores/resumos-2021/engenharias/analise-do-desempenho-da-usina-fotovoltaica-do-ifmg-campus-avancado-ipatinga.pdf>>. Acesso em: jul. 2021.

SOUZA, Mariana Campos.; SOUZA, José Henrique Ferreira de. Acompanhamento remoto e análise de indicadores de produtividade dos sistemas de geração de energia fotovoltaica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. Relatório Final do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica. Ipatinga, 2022. 20p.

TANFON. **700W 1kW 2kW Home Solar Wind Hybrid System**. Disponível em: <<http://tanfon.en.made-in-china.com/product/jBFEnVwTLLhy/China-700W-1kw-2kw-Home-Solar-Wind-Hybrid-System.html>>. Acesso em: jan. 2017.

WEATHER SPARK. **Clima e condições meteorológicas médias em Ipatinga no ano todo**. Disponível em: < <https://pt.weatherspark.com/y/30691/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Ipatinga-Brasil-durante-o-ano#Figures-PrecipitationProbability>>. Acesso em: set. 2022.