

## ANÁLISE DO IMPACTO DA SUJEIRA E PROPOSTA DE PROTÓTIPO PARA LIMPEZA AUTOMATIZADA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Daniel de Jesus Furtado dos Santos<sup>1</sup>; Paulo Ricardo Teodoro Mota<sup>2</sup>; Marcelo Lucas<sup>3</sup>

1,2,3Universidade de Uberaba - Uniube

[daniel\\_san\\_tuc@hotmail.com](mailto:daniel_san_tuc@hotmail.com); [marcelo.lucas.eng@gmail.com](mailto:marcelo.lucas.eng@gmail.com)

### Resumo

O aumento constante no consumo global de energia elétrica, previsto para atingir cerca de 30.000 TWh em 2030, destaca a necessidade de fontes sustentáveis. A energia solar, proveniente do Sol, é vista como uma solução viável, embora a sujeira nas placas solares possa afetar sua eficiência. O projeto apresentado propõe um protótipo automatizado para a limpeza eficiente dessas placas.

O estudo analisa dois sistemas fotovoltaicos residenciais e desenvolve um protótipo de limpeza que utiliza movimentos rotativos de rolos, água e detergente neutro. Resultados mostram que a sujeira pode reduzir a produção de energia em até 25%. Um sistema de limpeza automatizado é implementado, composto por uma estrutura mecânica, componentes elétricos, e lógica controlada por Arduino.

A análise de dados revela que a sujeira impacta significativamente no desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Um sistema em Uberaba, durante a reforma do telhado, teve uma produção inicial de 2.6 kWh, aumentando 121% após a limpeza. Um segundo sistema em Conceição das Alagoas, afetado pela seca e poeira, mostra um crescimento na produção após a limpeza e chuvas.

A conclusão destaca a importância da limpeza regular das placas solares, evidenciada pelos aumentos de produção após a remoção da sujeira. O estudo ressalta que a chuva desempenha um papel significativo na limpeza parcial das placas, influenciando positivamente a eficiência do sistema solar. Esses resultados reforçam a necessidade de soluções eficazes para a manutenção de sistemas fotovoltaicos, contribuindo para a sustentabilidade da energia solar.

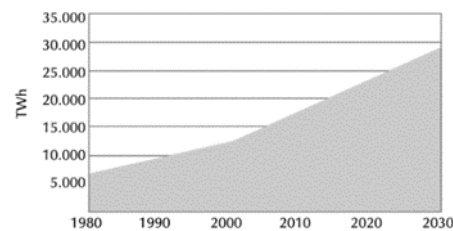
**Palavras-chave:** Energia solar, Sujeira em placas solares, Limpeza de sistemas fotovoltaicos, Desafios na geração solar, Células fotovoltaicas.

### 1 Introdução

Com o passar dos anos a humanidade tem crescido o consumir energia elétrica. Em 1980 o mundo todo consumia cerca de 7.000 TWh (Terrawatts-hora) de eletricidade. Segundo previsões da Agência Internacional de Energia (IEA), esse número vai subir para quase 30.000 TWh em 2030, é certo que o mundo precisa de uma quantidade muito grande de energia elétrica para

sustentar o seu consumo atual e para atender a demanda crescente. (VILLALVA, 2012).

**Figura 1: Previsão de consumo de energia elétrica no mundo até 2030**



Fonte: IEA World Energy Outlook, 2009

O Sol é a nossa principal fonte de energia no planeta, sendo uma fonte praticamente inesgotável e acessível a todas as pessoas, enquanto as demais fontes energéticas são obtidas através da conversão dessa energia. (PINHO; GALDINO, 2014).

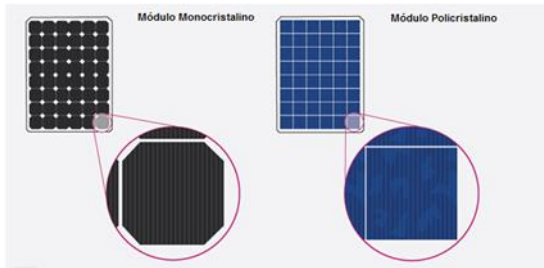
A energia solar, que hoje é apenas considerada alternativa e tem pouca participação na matriz energética mundial, porém será uma das principais fontes de energias para o futuro da humanidade. (VILLALVA, 2012).

As células solares são responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica, este efeito é conhecido como efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica é composta basicamente por uma junção p-n, a qual quando submetida a exposição de luz solar gera uma corrente elétrica (IMHOFF, 2007). A diferença de potencial é observada na junção p-n do semicondutor, esse efeito fotovoltaico é gerado através da absorção da luz solar. A célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, ela apenas mantém um fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre a sua superfície (NASCIMENTO, 2014).

O silício lidera o ranking dos materiais mais utilizados em células fotovoltaicas e tem sido explorado sob diversas formas como nas formas de monocristalino, policristalino e amorfo (CRESESB, 2006). As suas formas mais utilizadas são as células de silício monocristalino e as células de silício policristalino. As células de silício monocristalino são mais eficientes, pois geram mais energia por uma área semelhante, porém geralmente são mais caras em relação as células de silício policristalino. As células monocristalino

são melhores em situação de pouca luz e devem ser preferidas em aplicações com restrição de espaço, peso e luminosidade (CHASE, 2018).

**Figura 2: Comparação entre células de p-Si e m-Si e sua disposição em módulos fotovoltaicos.**



Fonte: Adaptado de Energysage (2017).

Contudo um dos principais problemas com essas placas solares são a exposição a intempéries e fatores ambientais entre esses fatores estão a poeira, as folhas e a seiva de árvores, os excrementos de pássaros e, principalmente, a fuligem da poluição, e isso influenciam tanto quanto na eficiência energética quanto em sua vida útil. (CS Energia Solar, 2023).

Segundo dados do National Renewable Energy Laboratory (NREL) De acordo com a pesquisa, a limpeza dos painéis pode resultar em uma melhora de cerca de 12% na produção de energia. A mesma pesquisa concluiu que na prática o acúmulo de sujeira pode resultar em uma perda de até 25%. Isso significa, que está gerando até 25% menos eletricidade. (CS Energia Solar, 2023).

Dessa forma, o propósito deste projeto é analisar o impacto energético causado pela sujeira nos módulos solares, além de desenvolver um protótipo automatizado destinado à limpeza eficiente dessas placas. O objetivo é minimizar ao máximo os potenciais efeitos adversos decorrentes dessa contaminação.

## 2 Materiais e Métodos

Para a análise do impacto da sujeira, observamos duas amostras. A primeira consiste em um sistema fotovoltaico residencial, composto por 9 placas solares, usando um inversor modelo GW3000-XS. Esse sistema está localizado em Uberaba, na rua Padre Ângelo Pozzani.

O segundo sistema fotovoltaico também é residencial e está localizado na área rural na Fazenda Barra Ponte Queimada em Conceição das Alagoas, composto por 12 placas solares e um inversor modelo On Grid 1.6KWp EGT 1600 LITE INTELBRAS.

Em paralelo a isso, desenvolvemos um protótipo para limpeza automatizada de sistemas fotovoltaicos. Sucintamente, o projeto consiste em um mecanismo que percorre a superfície da placa

solar, limpando-a por meio de movimentos rotativos de rolos com cerdas, água e detergente neutro.

O protótipo foi construído utilizando os seguintes itens da tabela abaixo:

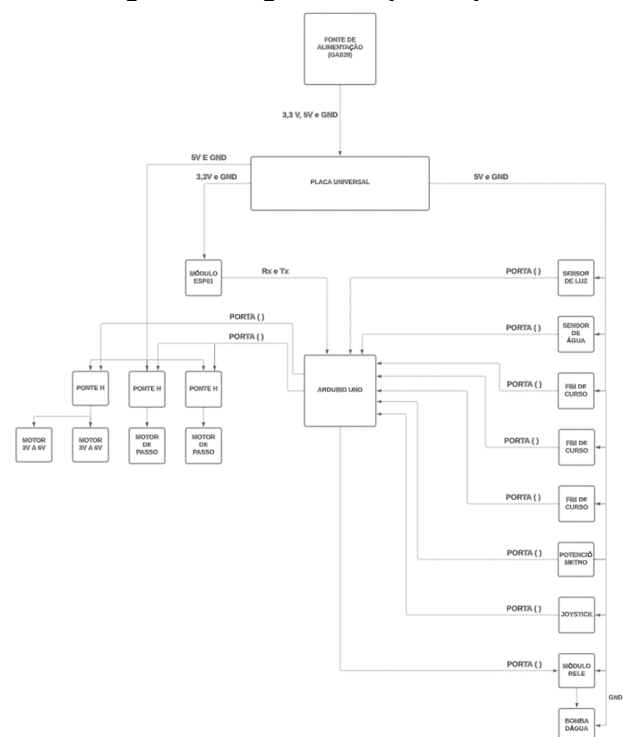
**Figura 3: Materiais do protótipo**

| DESCRIÇÃO                 | QUANTIDADE |
|---------------------------|------------|
| ARDUINO UNO               | 1          |
| ESTRUTURA DE MDF          | 1          |
| ESTRUTURA METÁLICA        | 1          |
| FIAÇÃO                    | N/D        |
| FIM DE CURSO              | 3          |
| FONTE DE ALIMENTAÇÃO      | 1          |
| JOYSTICK                  | 1          |
| MANGUEIRA                 | 2          |
| MINI BOMBA SUBMERSÍVEL    | 1          |
| MINI RESERVATÓRIO         | 1          |
| MÓDULO ESP01              | 1          |
| MÓDULO RELE               | 1          |
| MOTOR DC (3V A 6V)        | 2          |
| MOTOR DE PASSO (28BYJ-48) | 2          |
| PLACA UNIVERSAL           | 1          |
| PONTE H                   | 3          |
| POTENCIÔMETRO             | 1          |
| SENSOR DE ÁGUA            | 1          |
| SENSOR DE LUMINOSIDADE    | 1          |
| TRILHO SUIÇO              | 1          |

Autor: Autoria própria.

A alimentação do sistema é feita pela fonte GA039 da Multilaser, a qual fornece diversas tensões de saída, sendo utilizada no projeto somente 3,3V e 5V. Para o processamento do protótipo utilizamos o Arduino Uno, sendo ele integrado com o chip do microcontrolador ATmega328P. A figura 4 representa a visão geral do nosso projeto.

**Figura 4: Diagrama do protótipo**



Autor: Autoria própria.

Para construção do protótipo, dividimos em 3 áreas, sendo elas, mecânica, elétrica e lógica. Além disso, desenvolvemos uma estrutura para comportar todos os equipamentos.

**Figura 5: Estrutura do protótipo**



**Autor: Aatoria própria.**

Esse suporte simula um telhado com placas solares, sendo o protótipo mais próximo da realidade. A seção referente a mecânica foi constituída por duas cremalheiras e duas engrenagens, as quais ficaram responsáveis pelo deslocamento do sistema de limpeza. Por se trata de um sistema móvel, aplicamos uma cortina de cabos em paralelo ao movimento.

A parte elétrica foi alimentada por uma fonte de alimentação GA039, da Multilaser, e sua energia distribuída para uma placa universal. O deslocamento pela cremalheira foi realizado por dois motores de passo, modelo 28byj-48. Para rotacionar os rolos foram usados dois motores com redução.

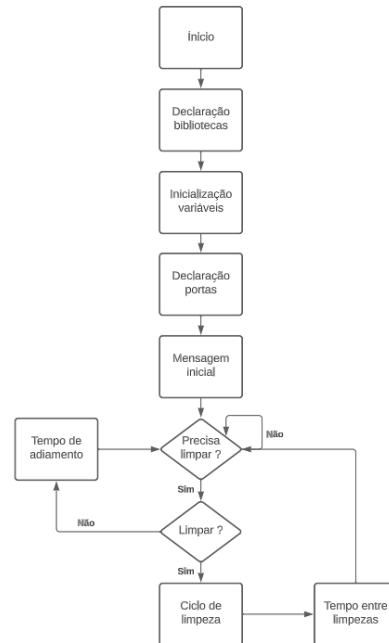
Os parâmetros de decisão da limpeza vieram do sensor de luminosidade, associado a um potenciômetro, o mesmo tendo o papel de simular a produção de energia a partir da sua variação de resistência. Para controle de limites, usamos o sensor de água para monitorar o nível do reservatório, além dos três fins de curso para gerenciar a posição atual do deslocamento, sendo elas, inicial, final e de repouso.

No intuito do protótipo ser uma maquete com ações repetitivas, empregamos uma bomba d'água para recircular o líquido, sendo ela acionada por meio de um módulo rele.

Na parte lógica, utilizamos o arduino uno, composto pelo microcontrolador ATMEGA328,

sendo responsável por toda a parte de controle do sistema de limpeza. Associado a ele, usamos o Esp01 para controle remoto do equipamento, sendo possível o acionamento da limpeza.

**Figura 6: Fluxograma do código do Arduino**

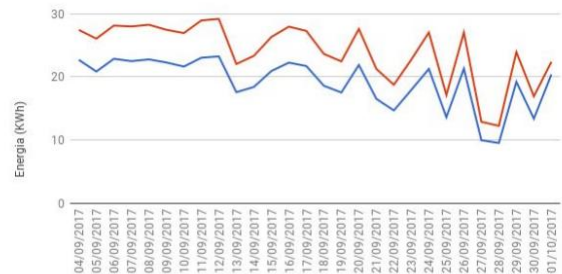


**Autor: Aatoria própria.**

### 3 Resultados

Segundo o artigo “IMPACTO DA SUJIDADE SOBRE O DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS”, escrito por Jair Gomes Soares Júnior, Silvia Ramos Cruz e Leonardo Santos Amaral, a sujeidade tem um impacto significativo na produção de sistemas fotovoltaicos, como mostra o gráfico a seguir.

**Figura 7: Geração de Energia após Limpeza das Placas do Array II**



**Autor: Retirado do artigo “IMPACTO DA SUJIDADE SOBRE O DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS”.**

Para efeito de comparação, foi utilizado primeiro a amostra de Uberaba, sistema está localizado em rua Padre Ângelo Pozzani, bairro Elza Amuí.

O período analisado foi do dia quinze e dezesseis de junho, no qual a residência do sistema estava com reforma do telhado. Diante dessa situação houve o acúmulo de poeira nas placas, ocasionado a diminuição na produção de energia solar, como podemos notar no gráfico abaixo:

**Figura 7: Geração de energia solar no mês de junho**



**Autor: APP SEMS Portal (2023).**

No período da reforma, a produção era de aproximadamente 2.6kWh, extremamente baixa em relação à média da capacidade. Após a limpeza realizada pelo proprietário, a produção teve um aumento 121% no primeiro dia, crescimento alto pelo nível de sujeira presente nas placas. Isso confirma que a sujidade impacta no rendimento do processo, gerando a necessidade de limpezas periódicas.

Como segunda amostra para análise temos um sistema fotovoltaico localizado na região rural de Conceição das Alagoas. Vale ressaltar que os módulos estão instalados em uma área agrícola, onde transitam frequentemente caminhões carregados com cana-de-açúcar, resultando em acúmulo de sujeira nos painéis solares devido à poeira levantada na região.

Analisando o gráfico abaixo de precipitação pluviométrica da região de Conceição das Alagoas, notamos que até o dia 15 de novembro não houve chuva. Essa estiagem, conseqüentemente o acúmulo de sujeira, gerou a necessidade de limpeza por parte do proprietário, sendo ela realizada no dia 4 de novembro.

**Figura 8: Gráfico de precipitação do mês de novembro**



**Autor: Site INMET.**

Diante disso, podemos analisar pelo gráfico abaixo o aumento de produção após a limpeza. No período entre essa limpeza e o primeiro dia de chuva deste mês a produção teve queda gradativamente. Mas com a chuva dos dias 16 e 20 de novembro, notamos um crescimento na produção.

**Figura 9: Gráfico de produção energética do mês de novembro**



**Autor: APP (2023).**

Com isso podemos confirmar que a chuva limpa parcialmente as placas, tendo em vista o aumento de produção.

**Figura 10: Gráfico de produção energética do mês de março**



**Autor: APP (2023).**



**Figura 11: Gráfico de produção energética do mês de abril**



**Figura 12: Gráfico de precipitação mensal do ano**



Uma análise que se destaca está nos meses de março e abril, mostrado nos gráficos acima. Durante março, um período caracterizado pela ausência de chuvas, a produção de energia foi de 645,30 kWh. Em contraste, abril, marcado por precipitações, registrou um aumento significativo na produção, totalizando 734,00 kWh. A variação percentual entre esses dois meses foi de  $\left(\frac{734 - 645,30}{734,00} \times 100\right)$ , resultando em 12,08%. Pode-se inferir que esse aumento está relacionado à limpeza proporcionada pela chuva nos módulos solares, impactando positivamente a eficiência do sistema.

#### 4 Discussão

Considerando os dados de eficiência energética obtidos a partir das placas solares em condições limpas e sujas, é evidente que a limpeza tem um impacto significativo na eficiência. Embora

seja importante levar em consideração outros elementos, como a intensidade da radiação solar, presença de sombras e níveis de nebulosidade, que também influenciam na eficácia.

Podemos concluir que a manutenção regular das placas é essencial. Nosso protótipo oferece uma solução prática e segura para a limpeza, eliminando a necessidade de os proprietários subirem no local ou contratarem serviços externos para realizar essa tarefa.

Entretanto, esse modelo de protótipo é viável apenas para sistemas fotovoltaicos pequenos, pois seu funcionamento necessita de uma estrutura que abrange todas as placas. Além disso, a disposição das mesmas deve ser uniforme para garantir a eficiência.

#### 5 Conclusão

Com as análises das amostras reafirmamos que a sujidade impacta negativamente na produção de energia solar. Tendo em vista, a correlação da limpeza proveniente do proprietário e da chuva que proporcionou o aumento da produção amostrada, sendo comprovada pelos gráficos presentes no artigo.

O projeto, mesmo sendo um protótipo, por ele enfatizamos a praticidade de uma limpeza automatizada das placas solares o qual se mostrou funcional e eficiente, atendendo as expectativas estabelecidas. Diante disso, construímos um equipamento prático que simulasse o processo de limpeza em todas suas etapas.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se aperfeiçoar a conexão remota, sendo comunicado o proprietário sobre a necessidade da limpeza.

Portanto uma limpeza das placas solares é excepcional para que se tenha um melhor aproveitamento na geração de energia e nosso protótipo vem como uma solução para uma limpeza mais prática e segura para o proprietário. A energia solar está uma constante crescente e novas tecnologias iram surgir para um maior facilidade e qualidade para o sistema.

#### Referências

**ADAFRUIT.** Arduino IO Library. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-io-basics-esp8266-arduino/arduino-io-library>. Acesso em: 21 setembro 2023.

**ARDUINO.** Arduino Uno - Documentation. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 21 setembro 2023.

**INMET.** Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 27 agosto 2023.

**NASCIMENTO,**R.L. Energia solar no Brasil: situação e perspectiva. Estudo técnico. Brasília: Câmara dos Deputados do Brasil,2014.

**PAINÉIS solares domésticos precisam de limpeza e manutenção.** São Paulo: Portal Solar, 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/consumidor/paineis-solares-domesticos-precisam-de-limpeza-e-manutencao>>. Acesso em: 26 outubro 2023.

**PINHO,** João Tavares; **GALDINO,** Marcos Antonio (org.). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014.

**ROSER,** Max. Why did renewables become so cheap so fast?. 1 dez. 2020. Disponível em: <[https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth?utm\\_source=newsletter&utm\\_id=thebiznes&utm\\_content=referral](https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth?utm_source=newsletter&utm_id=thebiznes&utm_content=referral)>. Acesso em: 10 out. 2023.

**VILLALVA,** Marcelo Gradella; **GAZOLI,** Jonas Rafael. Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações, sistemas isolados e conectados à rede. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.