

---

---

## **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DEPOSIÇÃO SUPERFICIAL DE DETRITOS E COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE LIMPEZA NA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM UMA REGIÃO SEMI-ÁRIDA**

Emanuella Maria Rodrigues de Sousa (Discente de Engenharia Elétrica. Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFRSA). E-mail: emanuellarodrigues1@gmail.com

Sammy Whallyd dos Santos Silva (Discente de Engenharia Elétrica. Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFRSA). E-mail: sammy\_wh@yahoo.com.br

Romênia Gurgel Vieira (Docente na Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFRSA). Email: romenia.vieira@ufersa.edu.br

Maria Izabel da Silva Guerra (Docente na Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFRSA). Email: izabel.guerra@ufersa.edu.br

**Resumo:** A geração de energia elétrica utilizando módulos fotovoltaicos necessita de um plano de manutenção para que a vida útil do sistema seja prolongada, bem como seu rendimento melhorado. Neste trabalho analisou-se a influência da deposição superficial de detritos sobre painéis fotovoltaicos. Este problema pode causar prejuízo à eficiência da geração de energia devido ao sombreamento nas células, além do surgimento de possíveis manchas e corrosão sobre os módulos. O sistema fotovoltaico analisado na presente pesquisa é composto por dois painéis fotovoltaicos, instalados na Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Fez parte também do estudo uma análise comparativa entre as eficiências dos painéis do sistema ao se implementar dois métodos diferentes de limpeza diária, somente com flanela e com flanela e água. O principal resultado observado neste trabalho foi a redução de tensão, e conseqüentemente da potência gerada, além de um aumento significativo de temperatura no módulo sujo. Quanto ao resultado da comparação entre métodos de limpeza, verificou-se menos de 1% a mais de eficiência no painel que foi limpo com água e flanela.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética; Módulos Fotovoltaicos; Semiárido Potiguar; Limpeza do Painel Fotovoltaico; Resfriamento do Painel Fotovoltaico.

## **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE SUPERFICIAL DEBRIS DEPOSITION AND COMPARATIVE BETWEEN TYPES OF CLEANING IN THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC PANELS ON A SEMI-ARID REGION**

**Abstract:** The generation of electric energy using photovoltaic modules requires a maintenance plan so that the useful life of the system is prolonged and the efficiency is improved. In this work, the influence of surface deposition of debris on photovoltaic panels was analyzed. This problem can cause damage to the efficiency of power generation due to shading in the cells, in addition to the appearance of possible stains and corrosion on the modules. The photovoltaic system analyzed in the present research is composed by two photovoltaic panels, installed in the Universidade Federal Rural do Semi-Árido. A comparative analysis was also made concerning the efficiency of the panels of the system when two different methods of daily cleaning, one using flannel only and the other using flannel and water, were implemented. The main result observed in this work was the reduction of voltage, and consequently of the power generated, in addition to a significant increase of temperature in the dirty module. As for the result of the comparison of cleaning methods, less than 1% off better efficiency was found on the panel which was cleaned with water and flannel.

**Keywords:** Energy Efficiency; Photovoltaic modules; semi-arid; Photovoltaic Panel Cleaning; Photovoltaic Panel Cooling.

### **1. INTRODUÇÃO**

A sociedade moderna tem dependência direta da disponibilidade dos recursos energéticos. Com o advento da globalização, a população mundial demanda cada vez mais o uso de energia elétrica. Devido a finitude dos combustíveis fósseis, especialmente o petróleo, a crescente conscientização no que diz respeito a responsabilidade socioambiental, e a ampliação em pesquisas sobre desenvolvimento sustentável, surge um novo ciclo energético, que visa a produção de energia elétrica de maneira menos agressiva e poluente.

Além de trazer uma maior diversificação da matriz energética do Brasil, a energia fotovoltaica gera impactos ambientais mínimos, por ser uma energia limpa, e por causar

impactos visuais considerados pequenos em comparações aos outros meios de geração. Adicionalmente, a instalação do sistema solar fotovoltaico, permite ser desde uma usina de pequeno porte, abastecendo regiões que não são contempladas pelas linhas de transmissão de energia, até unidades de maior potencial de geração de energia elétrica. (RIBEIRO, 2004).

O Brasil possui uma série de fatores naturais favoráveis para geração de energia através do Sol, dentre os quais pode-se citar: os níveis de radiação solar superiores aos dos outros países e as grandes reservas de quartzo de qualidade, que pode ser considerada uma vantagem na produção do silício com alto grau de pureza (CRESESB, 2014). Apesar destes fatores, ela corresponde apenas cerca de 0,01% da matriz energética brasileira, representando 85 GWh de energia elétrica gerada no ano de 2016, ou seja, 44,7% a mais do que no ano de 2015, o que evidencia que apesar do baixo aproveitamento, o crescimento da energia fotovoltaica existe, deixando-a mais competitiva diante das outras fontes de energia a cada ano (BEN, 2017). Dois fatores contribuem diretamente para que essa representação na matriz não seja tão significativa como deveria ser, que são: o alto custo de produção do painel fotovoltaico, afetando diretamente no retorno financeiro da implementação da usina; e seu baixo rendimento comparado as outras fontes de energia (RIBEIRO, 2004).

O elemento básico responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica é o painel fotovoltaico (FV). Ele é um equipamento formado normalmente por células de silício, que é um material semicondutor de grande abundância no Brasil. (MATTOS, 2016).

A utilização de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica requer cuidados para que o rendimento seja satisfatório, e a vida útil do sistema seja prolongada. Ao serem expostos à um ambiente externo não controlado, os painéis fotovoltaicos estão sujeitos à deposição de sedimentos impuros, podendo prejudicar a produtividade energética, principalmente devido ao sombreamento causado por tais sedimentos. Fatores climáticos como, nuvens, precipitações e ventos também influenciam no rendimento dos painéis. (KUDISH, 1992). Há também o fato de os painéis serem projetados para trabalhar em temperaturas em torno de 25°C, ou seja, condições totalmente contrárias as temperaturas no Nordeste do Brasil, especificamente. (CRESESB, 2014).

A instalação de painéis fotovoltaicos mais especificamente em residências vem se tornando um mercado promissor no estado potiguar. A partir dessa demanda, é necessário estudar os planos de manutenção, para otimizar principalmente a durabilidade dos painéis instalados. (RIBEIRO, 2004).

Desta forma, a presente pesquisa estuda a recuperação de parte da eficiência perdida dos módulos fotovoltaicos instalados na cidade de Mossoró através da observação do desempenho elétrico dos painéis analisado e da limpeza dos módulos utilizando a água como fluido resfriador buscando o levantamento de resultados precisos para tentar melhorar o rendimento do sistema montado.

## **2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

### **2.1. Configurações Básicas de um Sistema Fotovoltaico**

Um sistema fotovoltaico é composto por diversos componentes que possibilitam a entrega de energia gerada à carga conectada ao sistema.

Uma associação de módulos fixados a uma estrutura de montagem é denominado arranjo. O módulo fotovoltaico, é o componente fundamental do sistema fotovoltaico, que pode ser formado por um conjunto de células fotovoltaicas eletricamente associadas, em série ou paralelo, visando o aumento da capacidade de energia elétrica e do rendimento do sistema. Se faz necessário o encapsulamento das células fotovoltaicas em módulos para protegê-las contra intempéries, principalmente da umidade. (CRESESB, 2004).

A classificação dos sistemas fotovoltaicos se subdivide em basicamente três categorias distintas: sistema autônomo, híbrido e conectado à rede.

O sistema autônomo ou isolado caracteriza-se por ser um sistema puramente fotovoltaico, que requer uma unidade de controle de potência, armazenamento e em algumas aplicações, inversores. Para o armazenamento em sua maioria é utilizado baterias, entretanto, em determinadas situações não se faz necessário armazenamento, como por exemplo, numa aplicação na irrigação, onde toda a água bombeada teria utilidade imediata. O sistema híbrido traz consigo diversas fontes de geração de energia elétrica que podem ser adicionadas aos módulos fotovoltaicos para otimizar a geração de energia elétrica, como turbinas eólicas e motores à diesel. Geralmente o modelo híbrido é aplicado a sistemas de médio a grande porte, possibilitando atender uma maior quantidade de usuários.

O sistema conectado à rede elétrica apresenta-se como uma fonte elementar ao sistema elétrico no qual está interligado. A desvantagem de o sistema depender diretamente da rede, pode ser contornada com a adição de um sistema de armazenamento, dessa forma, caso de ocorra alguma falha na rede, haverá energia armazenada para suprir a instalação elétrica. Todo o arranjo do sistema deve possuir inversores que satisfaçam as regras que segurança e qualidade exigidas pela concessionária. Uma grande vantagem desse tipo de sistema é proporcionar a negociação da energia elétrica gerada pelo produtor com a concessionária, permitindo abatimento na fatura, tornando-se mais viável financeiramente. A viabilidade econômica da aplicação dos diversos sistemas dependerá da necessidade da aplicação na qual será utilizada (LOPEZ, 2012).

## 2.2. Características Elétricas dos Painéis Fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico opera em um ponto que depende diretamente da carga que está interligada a ele. Para uma demanda de corrente alta, por exemplo, a tensão que o painel fornece, irá ser menor. A representação da curva característica de saída de um módulo fotovoltaico que expõe esse comportamento, está apresentada na Figura 1, e denomina-se Curva Corrente-Tensão. Para a obtenção dessa curva, a NBR 111876/EB2176 e NBR 12137/MB3478, adotaram as Condições Padrões de Teste (STC - *Standard Test Conditions*), sendo radiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . (BELTRÃO, 2008).

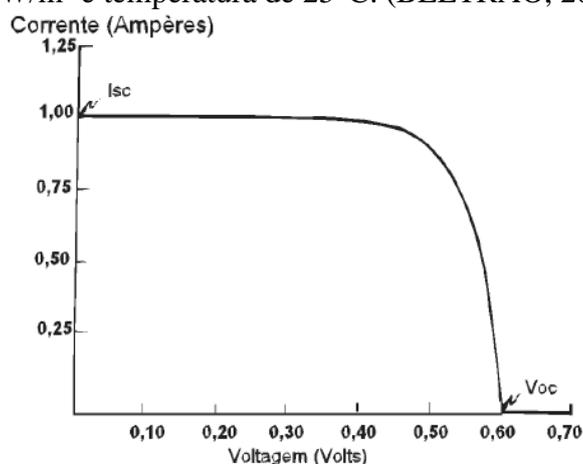


Figura 3 – Curva característica I-V, típica de uma célula de silício monocristalino sob condições padrões de teste  
Fonte: CRESESB, 2004

A tensão de um módulo fotovoltaico, é medida entre os terminais negativo e positivo, utilizando um voltímetro. Caso não exista nenhuma carga conectada ao módulo, não haverá consumo de corrente, assim, será obtida a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ). Analogamente, a

corrente pode ser medida com um amperímetro. A corrente fluirá independentemente de existir carga conectada ao módulo, tal corrente é denominada de corrente de curto-circuito. ( $I_{sc}$ ), quando a tensão for igual a zero nessa situação. Esse parâmetro representa o valor máximo que a corrente poderá assumir. (CRESESB, 2004).

Após compreender as características de corrente e tensão sobre a curva, é necessário analisar o comportamento da potência em função da tensão. Tal levantamento irá caracterizar a potência a ser gerada que dependerá dos valores em volt e ampères combinados. A curva da Figura 2, indica a existência de um ponto ótimo de obtenção de potência máxima do módulo ( $M_{PP}$ ), onde a conversão energética deverá ter seu valor mais eficaz. A potência máxima ( $P_m$ ), que é obtida através da tensão máxima ( $V_{mp}$ ) e corrente máxima ( $I_{mp}$ ), são dados fornecidos pelo fabricante.

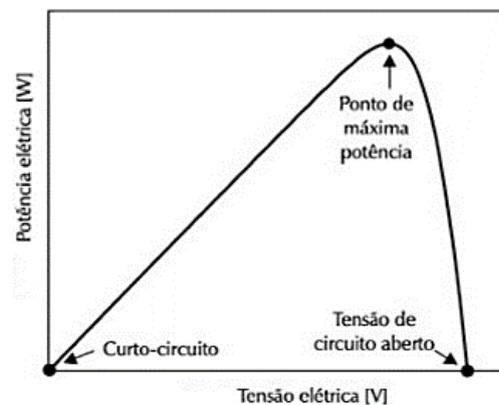


Figura 2 – Curva característica P-V, típica de uma célula de silício monocristalino sob condições padrões de teste

Fonte: VILLALVA, 2012

### 2.3. Efeito dos Fatores Meteorológicos nas Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

Os principais fatores ambientais que influenciam diretamente no comportamento dos módulos fotovoltaicos são a intensidade da radiação solar e a temperatura das células. A variação da intensidade da radiação solar incidente na célula, representada na Figura 3, acarreta uma variação proporcional na corrente a ser gerada. Assim, quando houver valores menores de radiação incidida do módulo, ocorrerá uma redução dos valores de corrente, que implicará na redução do rendimento do sistema. Isto ocorre porque um fóton com energia suficiente, energiza um elétron, assim, com uma maior radiação incidida, haverá uma maior quantidade de fótons, consecutivamente, de elétrons energizados, gerando maior fluxo de corrente elétrica. A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) sofrerá pouca alteração, entretanto, em situações de radiação muito baixa, ( $V_{oc}$ ) irá decrescer rapidamente para zero. (BELTRÃO, 2008).

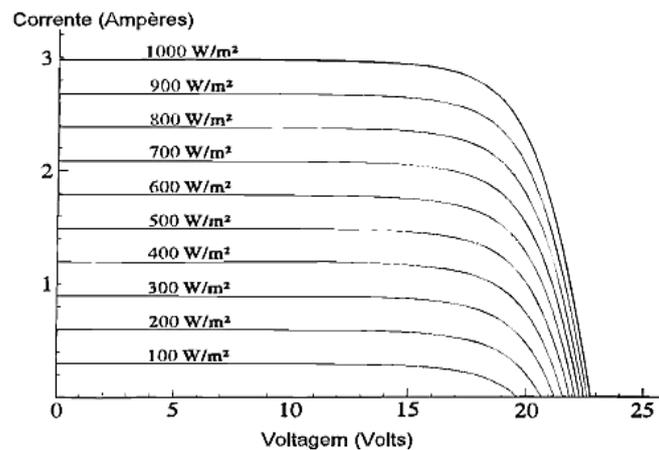


Figura 3 – Efeito causado pela variação da intensidade da luz na curva característica I-V para um módulo fotovoltaico sob condições padrões de teste

Fonte: CRESESB, 2004

É notório que os módulos fotovoltaicos expostos à radiação em dias de muito sol, tendem a ter uma elevação da temperatura de sua superfície. A corrente gerada pelo módulo irá apresentar variações irrelevantes com esse aumento, enquanto a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), irá sofrer diminuição mais significativa em seus valores. Assim, pode-se afirmar que a potência máxima irá decrescer, como consequência. Esse comportamento pode ser observado na Figura 4. (IMHOFF, 2007).

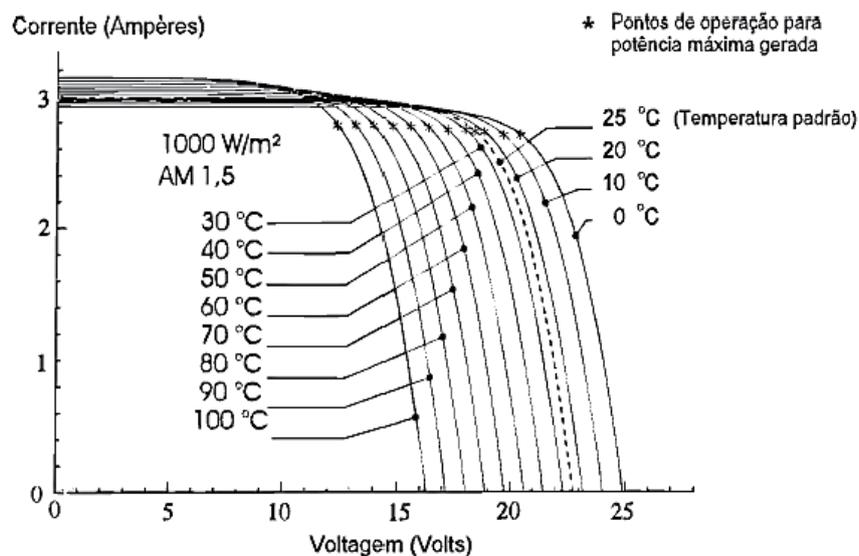


Figura 4 – Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica I-V em um módulo fotovoltaico de silício cristalino sob condições padrões de teste

Fonte: CRESESB, 2004

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram abordadas duas metodologias, aqui chamadas de Metodologia 1 e Metodologia 2. A primeira delas busca comparar o desempenho entre um módulo fotovoltaico limpo e um módulo sujo. Já na segunda metodologia aplica, busca-se comparar os métodos de limpeza, mantendo um dos módulos limpo apenas com flanela e o outro com flanela e água.

### 3.1 Metodologia 1

Para a medição dos parâmetros, utilizou-se equipamentos específicos, como um multímetro, para tensão e corrente. A temperatura medida foi a da célula, utilizando um pirômetro digital, sendo este apontado diretamente para superfície superior do módulo. Para a radiação incidida nos módulos usou-se um medidor de energia solar, direcionado ao sol, com a mesma inclinação de 15° dos módulos.

O protótipo da pesquisa foi instalado no campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada no município de Mossoró-RN, região oeste potiguar, com as coordenadas geográficas de 5° 11' Latitude Sul (S) e 37° 20' Longitude Oeste (W), e altitude de 18 m acima do nível do mar. Devido à grande proximidade de um deserto salino, Mossoró é considerada uma das cidades mais quentes do País. (RIBEIRO, 2004)

A primeira metodologia aplicada buscou comparar o desempenho dos módulos fotovoltaicos, sendo um limpo e um sujo, como ilustra a Figura 5.



Figura 5 – Sistema fotovoltaico analisado

Fonte: Autorial própria

A comparação é realizada fazendo a caracterização dos parâmetros, a saber, tensão, corrente, potência, temperatura e radiação solar, podendo assim verificar o rendimento de ambos os painéis. Os dados obtidos foram referentes a condição climática submetida ao experimento no período do dia 3 ao dia 15 de julho de 2017, sendo descartados os dias de precipitação chuvosa e de alta nebulosidade, resultando em 7 dias de medições. Os parâmetros foram coletados no período de 8:00 às 15:00 horas, a cada 30 minutos. Este horário foi escolhido devido à incidência solar antes das 8:00 e após as 15:00 horas serem consideradas baixas para o padrão da região, o que resultaria num decréscimo discrepante dos parâmetros, afetando diretamente os resultados.

As características de teste padrão das placas solares utilizadas no processo de medição são mostradas na Tabela 1, conforme dados fornecidos na folha de dados do fabricante Suntech.

Potência Máxima (P <sub>máx</sub> )	20Wp
Corrente na Potência Máxima (I <sub>mp</sub> )	1,19A
Tensão na Potência Maxima (V <sub>mp</sub> )	16,8V
Corrente de Curto-Circuito (I <sub>sc</sub> )	1,21A
Tensão no Circuito Aberto (V <sub>oc</sub> )	21,4V
Temperatura nominal de operação da célula	50°C
Área de incidência solar	0,20m <sup>2</sup>
Rendimento	10%

Tabela 1 – Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Fonte: Autorial própria

Para maior precisão dos dados, foi consultada a Estação Meteorológica da UFERSA. A Tabela 2, apresenta as características climáticas relevante ao estudo, observadas nos dias de medição considerados. Foram utilizados os valores médios dos parâmetros, afim de abranger os dados de maneira mais adequada.

Dia	Temp. do Ar (°C)	Rad. (W/m <sup>2</sup> )	Umid. (%)	Vento (m/s)	Condição do Tempo
1	26,82°	968,59	61,12	1,76	Nuvens esparsas
2	27,56°	1138,92	58,39	1,72	Ensolarado
3	27,31°	1129,87	61,65	1,13	Ensolarado com poucas nuvens
4	27,57°	1085,20	60,95	2,04	Ensolarado com poucas nuvens
5	26,86°	1107,55	62,68	1,47	Ensolarado
6	27,43°	1093,52	49,51	1,93	Ensolarado com poucas nuvens
7	28,07°	1251,78	45,75	2,17	Ensolarado

Tabela 2 – Características climáticas

Fonte: Autoria própria

### 3.2 Metodologia 2

Foram utilizados dois módulos fotovoltaicos, no qual um mantinha-se a limpeza apenas com a flanela e outro com a utilização da água e flanela. Foram empregados dois procedimentos de limpeza divergentes em dias diferentes. A análise experimental ocorreu entre 8 horas às 14 horas durante 10 dias, visto que (VIEIRA, 2014) cita que o período de maior radiação solar e temperatura incidente se dá neste intervalo de tempo.

Nos primeiros cinco dias de medições, os procedimentos de limpeza foram realizados às 12 horas, horário em que foi observado em (VIEIRA, 2014) os maiores índices de radiação solar e temperatura. Em ambos os módulos foi realizada a limpeza com uma flanela. Porém, em apenas um dos módulos, além da limpeza com a flanela, foi usado também água em temperatura ambiente, aplicada com um borrifador com cerca de 5ml de água, conseqüentemente realizando também o arrefecimento deste módulo FV. Para um melhor entendimento, o painel em que foi utilizado a limpeza com a flanela e água, será denominado Painel LR, e o outro painel, utilizado apenas a flanela, será chamado de Painel L.

No segundo momento, o mesmo procedimento foi realizado durante os outros cinco dias, às 8 horas, que era o horário inicial das medições dos dados, tomando como base a análise experimental em (VIEIRA, 2014). O painel LR, localizado na parte inferior da base, foi limpo com água e com uma flanela. O painel L, localizado na parte superior, foi apenas limpo com a flanela. A Figura 6 mostra a posição dos respectivos painéis.



Figura 6 – Base estrutural do sistema fotovoltaico para medição

Fonte: Autoria própria

De ambos os módulos foram observados seus dados simultaneamente, de modo a comprometer o mínimo possível a precisão da pesquisa. Buscando as leituras de tensão, corrente, potência, radiação solar, temperatura do módulo e temperatura ambiente com medições realizadas a cada 30 minutos.

Como o objetivo é a comparação entre as potências do sistema e a comparação da eficiência após aplicação dos métodos de limpeza, foi conectada uma lâmpada incandescente de 25W/32V<sub>cc</sub> em cada painel para analisar a tensão e corrente. Além disso, foi conectada um multímetro da marca Icel Manaus, modelo MD-5770, em cada painel e em série com a lâmpada para obtenção da corrente, e com as pontas de prova, foi analisado a tensão com um segundo multímetro do mesmo modelo do primeiro, porém não fixado na estrutura, em paralelo com a lâmpada como mostra a Figura 7. Com posse desses dois dados, de acordo com (VIEIRA, 2014) possível calcular a potência de geração através da Equação 1.

$$P = V \times I \quad (1)$$

Em que:

P - potência, em Watts (W)

V - tensão elétrica, em Volts (V)

I - corrente elétrica, em Ampères (A)

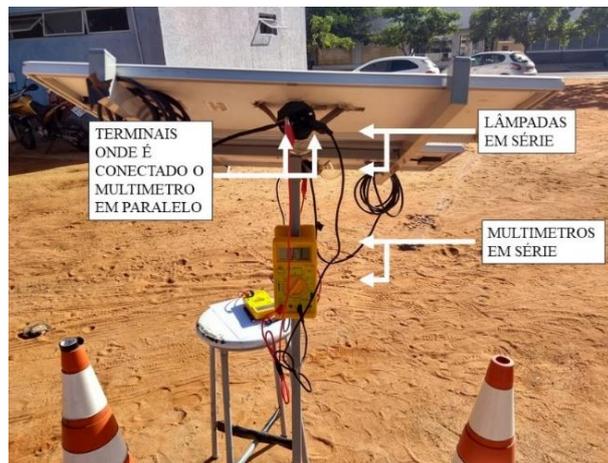


Figura 7 – Processo de análise da potência do módulo  
Fonte: Autoria própria

Após obter os valores das determinadas potências de cada dia de geração e tendo posse do valor da área útil do painel solar de acordo com o fabricante, visto na Tabela 2, segundo (VIEIRA, 2014) é possível calcular a eficiência da placa com a Equação 2.

Vale ressaltar, que as potências L e LR e irradiâncias utilizadas foram medidas diariamente logo após a limpeza do painel.

$$\eta (\%) = \frac{P_{(LR \text{ ou } L)}}{I_c * A} * 100 \quad (2)$$

Em que:

P<sub>(LR ou L)</sub> - potência do determinado painel (W)

A - Área do útil do módulo painel (m<sup>2</sup>)

I<sub>c</sub> - Radiação solar incidente (W/m<sup>2</sup>)

A irradiância solar e a temperatura do módulo foram verificadas, respectivamente através do medidor de radiação solar Instrutherm MES-100 e um termômetro Minipa infravermelho modelo MT-350. O medidor de radiação solar foi posicionado na mesma inclinação das placas, como mostra a Figura 8, afim de se obter de valor próximo ao captado pelos módulos. No que diz respeito a temperatura ambiente diária, essa foi coletada a partir da

estação meteorológica da UFRSA localizada na universidade.



Figura 10 – Processo de análise da radiação solar incidente

Fonte: Autoria própria

Para obtenção dos dados das temperaturas incidentes nos módulos, utilizou-se o termômetro direcionando seu feixe infravermelho diretamente para a placa fotovoltaica, como orientado pelo fabricante e mostrado na Figura 9.



Figura 9 – Processo de análise da temperatura do módulo

Fonte: Autoria própria

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A eficiência de um módulo fotovoltaico é dada pela comparação da potência produzida e a radiação solar incidente. (MICHELS, 2010). Após os dados serem coletados, foi realizado um comparativo para analisar a relação da potência calculada, e a radiação incidida nos módulos durante os horários medidos. Foi considerado também a situação climática de cada dia, pois esse fator influencia diretamente na redução ou aumento dos parâmetros. Para um melhor entendimento, Potência L e Potência S, correspondem aos valores dos módulos limpo e sujo, respectivamente. Os valores médios de potência, irradiância estão apresentados na Tabela 3. O percentual de redução refere-se à potência do módulo sujo em relação ao módulo limpo.

Dias	Potência L (W)	Potência S (W)	Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	Redução
1	8,42	8,10	968,59	3,80%
2	11,22	10,86	1229,00	4,30%
3	10,67	10,03	1016,30	10,17%
4	10,62	10,44	1050,50	4,49%

5	10,68	10,44	1038,50	6,83%
6	10,86	10,50	1174,00	3,82%
7	10,80	10,44	1258,20	3,33%

Tabela 3 – Comparação de desempenho da potência dos módulos  
Fonte: Autorial própria

#### 4.1 Resultados dos módulos limpos e sujo

Como observado na Tabela 3, o dia 7 explicitou a situação climática mais constante da cidade de Mossoró-RN durante grande parte do ano, como também evidenciou uma redução média de 3,33% de potência no módulo sujo, sendo o menor percentual entre os dias analisados. O dia de maior percentual de redução média do módulo sujo em relação ao limpo foi o dia 3, resultante de quedas de tensão devido ao sombreamento do módulo por nuvens. Em todos os dias analisados, e em todos os horários de medição, a potência do módulo limpo foi mais elevada que a do módulo sujo.

Por conseguinte, foi analisado o comportamento da temperatura sobre os módulos. A umidade do ar e vento, são parâmetros que podem interferir na temperatura por meio de troca de calor com os módulos, influenciando em seu aumento ou em sua redução. Os comparativos das temperaturas dos módulos analisados, estão apresentados na Figura 10.

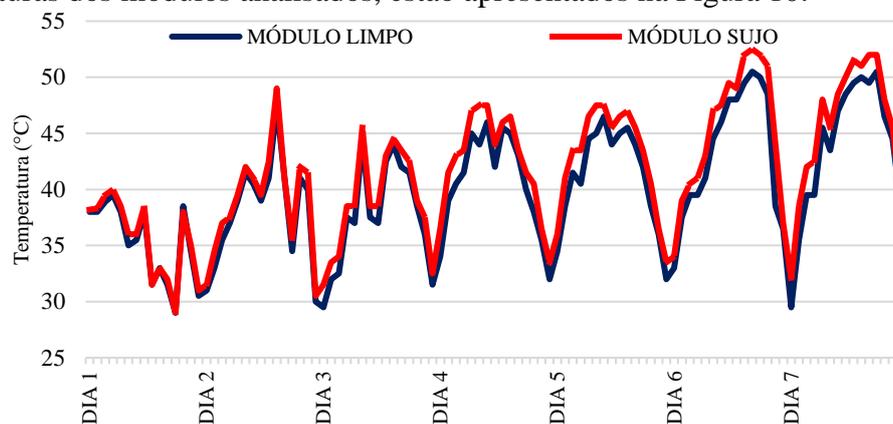


Figura 10 – Comparativo das temperaturas dos módulos limpo e sujo  
Fonte: Autorial própria

Analisando a Figura 10, no decorrer dos 7 dias de medição considerados, a temperatura do módulo sujo foi mais elevada que a do limpo. A média percentual da diferença entre os módulos foi de 3,26%. Com isso pode-se afirmar que a deposição superficial de impurezas sobre os painéis fotovoltaicos, gerou redução significativa de potência e aumento considerável de temperatura.

#### 4.2 Resultados entre os tipos de limpeza

No presente item é analisada a potência de geração dos módulos fotovoltaicos em função das irradiâncias as quais estão submetidas, tanto dos painéis fotovoltaicos limpo ao meio dia, como os painéis fotovoltaicos limpos às oito horas. Também é observado a temperatura que consta no painel, em relação a temperatura ambiente diária e a irradiância incidente.

Através de gráficos é mostrado, o comportamento da potência e temperatura do módulo FV limpo com flanela e água ao meio dia (Painel LR) e do módulo FV feito apenas a limpeza com a flanela (Painel L).

#### 4.3 Desempenho do Modelo 1.

Como citado anteriormente, a limpeza do modelo 1 é realizado às 12:00h durante todos os dias

de teste, devido ao painel FV vem já estar exposto ao Sol há um tempo considerado, havendo grande índices de temperatura incidente no módulo. Através das Figuras 11 e 12, será descrito as análises dos dias separadamente para um melhor entendimento dos resultados.

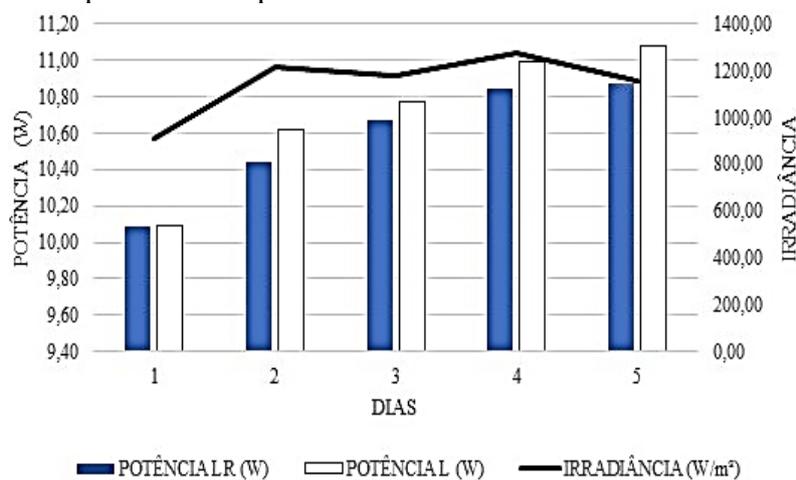


Figura 11 - Desempenho da potência – Modelo 1

Fonte: Autoria própria

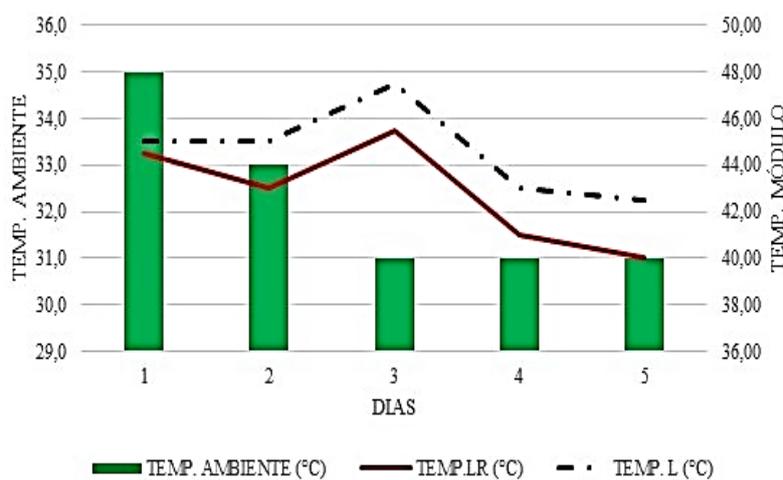


Figura 12 - Desempenho da Temperatura – Modelo 1

Fonte: Autoria própria

#### 4.3.1 Dia 1

No primeiro dia de análise, a irradiância variou entre 900 e 1300 ( $W/m^2$ ) e as potências elétricas mantiveram uma determinada regularidade com valores próximos a 10 (W). Entretanto, nos horários de 8:30h e 13:00h foi visto uma queda nestas potências, fato que pode ser justificado em virtude do céu encontra-se parcialmente nublado no momento, tendo uma redução considerável na irradiância incidente. Após a limpeza, o painel LR sofreu uma diferença de temperatura quando comparada com o Painel L, entretanto, isso representou apenas uma leve diferença na potência gerada entre os dois painéis. Os desempenhos elétricos após as limpezas foram: do Painel LR 5,66% e a do Painel L, de 5,56% valor obtido de acordo com a Equação 2.

#### 4.3.2 Dia 2

No segundo dia, as potências geradas também se mostraram constante, mesmo com uma irradiância variando entre 600 a 1550 ( $W/m^2$ ), com potência máxima medida de 11,29 (W) nas duas placas. As eficiências do Painel LR e do Painel L se mostraram equivalentes com valores de 7,09% e 7,04% respectivamente.

Mesmo com o céu nublado, é percebido que com a limpeza utilizando água, o Painel LR se manteve com uma potência maior, mesmo que levemente. Também foi observado que a temperatura ambiente neste dia se manteve linear, entretanto o Painel LR ainda apresentou uma redução de temperatura de superfície no horário em que ocorria a limpeza, ou seja, às 12:00h.

#### 4.3.3 Dia 3

No dia 3, a potência LR possuía uma potência 0,60W menor que a potência L, e logo após a limpeza, a potência LR obteve 10,85W, valor esse 0,13W maior que à potência do Painel L, que possuía valor de 10,72 W. Como é esperado, a eficiência do Painel LR foi maior que a do Painel L, com resultados de 4,30% e 4,25%.

#### 4.3.4 Dia 4

Durante o dia 4, as potências dos dois módulos se equiparam durante o dia, com uma diferença entre elas menor que 0,4W. Mesmo após realizada a limpeza dos painéis, a potência LR foi de 11,81W e a do Painel L de 11,83W às 12:00h e as eficiências também se mostraram equiparáveis, com a eficiência do Painel LR de 3,48% e a do Painel L de 3,48%.

Outro fator levado em consideração neste dia, foi a velocidade do vento de 7,59 m/s, mostrada na Tabela 2. Devido a esta variável, as temperaturas dos módulos alteravam constantemente, estando em muitas vezes abaixo dos 40°.

#### 4.3.5 Dia 5

No quinto e último dia da análise do Modelo 1, as potências de geração dos dois painéis sofreram um decaimento após às 12:00h, antes deste horário se mantiveram com os valores próximos a 11W. Fato que pode ser justificado pelo céu ter permanecido parcialmente nublado depois do meio dia, o que permitiu observar que a potência da Painel L, em condições de céu nublado, possuiu uma geração maior que a do LR. O Painel LR obteve uma diferença significativa em relação a eficiência do Painel LR. A eficiência LR atingiu o valor de 3,43% contra 3,39% do Painel L.

### 4.4 Desempenho do Modelo 2

Como descrito no item 4.2, a limpeza e arrefecimento do Modelo 2 foi realizada às 8:00h (horário inicial das medições) durante o intervalo cinco dias consecutivos. Através das Figuras 13 e 14, será descrito as análises dos dias separadamente para um melhor entendimento dos resultados.

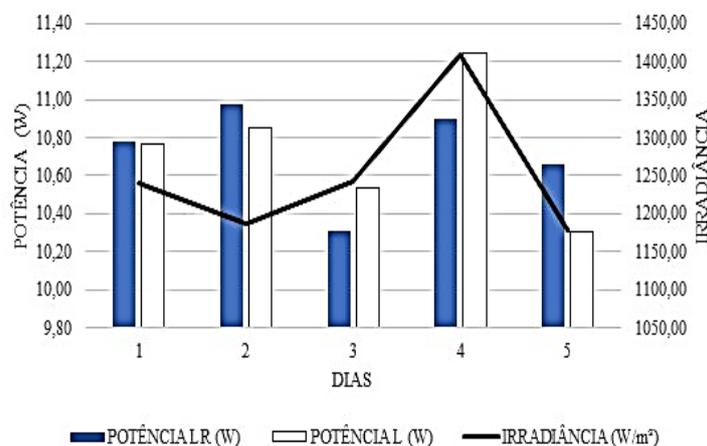


Figura 13 - Desempenho da potência

Fonte: Autoria própria

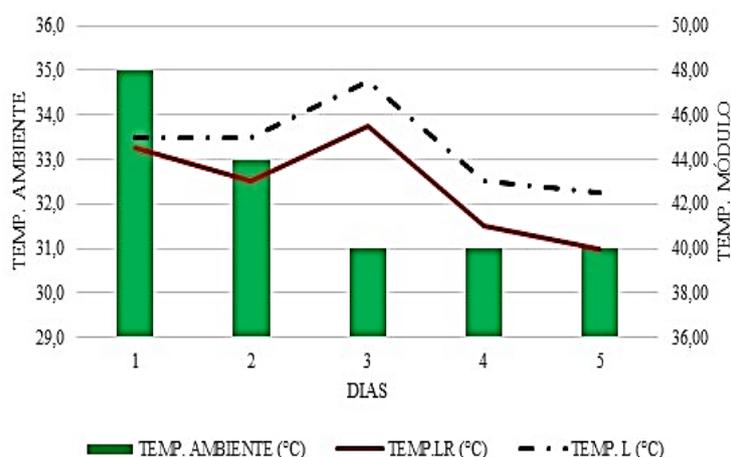


Figura 14 - Desempenho da Temperatura – Modelo 2

Fonte: Autoria própria

#### 4.4.1 Dia 6

No primeiro dia de análise do Modelo 2, a irradiância teve um pico de 1553 (W/m<sup>2</sup>) após às 12:00h. Nos primeiros momentos foi visto que a potência do Painel LR, com valores próximo máximo de 11,20W, permaneceu maior que o Painel L, que obteve o máximo de 11,21 W, isso ocorre devido à limpeza ser realizado às 8:00 horas. Porém, no decorrer do dia a potência do painel L, foi superior a potência do painel LR. E a eficiência das duas placas solares se equiparam, com valores de 5,14% e 5,03%, respectivamente.

#### 4.4.2 Dia 7

Dentre todos os dias de análise, o segundo dia do Modelo 2, ou seja, o Dia 7 se mostrou com maior variação de irradiância. Com isso a potência de geração das placas exibiu algumas oscilações bruscas nos horários de 11:00h e 12:00h com resultados em torno de 6 W. Nos outros momentos, os módulos obtiveram valores de potência próximo a 11W.

E as eficiências não tiveram diferenças significativas, com a L de 4,62% e a LR de 4,58%, evidenciando que apesar de as variações na irradiância, o dia foi de altas temperaturas, com a temperatura ambiente permanecendo constante em 34° C.

#### 4.4.3 Dia 8

No dia 8 observou-se em ambas as placas FV valores entre 10,6W, entretanto a potência elétrica medida no Painel L foi, na maioria das vezes, superior ao do Painel LR. Isso levou a um melhor rendimento do Painel L em relação ao do Painel LR, com 5,27% e 5,19%, respectivamente.

Além disso, o dia foi de constante sol contribuindo potencialmente para elevação da temperatura ambiente, que atingiu 35°C, contribuindo assim, para que as temperaturas dos módulos ultrapassassem 50°C, e a geração de energia fosse mais modesta, visto que a temperatura ótima de operação das placas FV é de 25°C.

#### 4.4.4 Dia 9

No dia 9 se teve valores significativos de potência. Com valores máximos obtido às 11:30h, a potência do Painel LR gerou 11,55W e o Painel L 11,69 W de potência elétrica. Com relação a eficiência, o Painel L obteve um desempenho de 4,91% ao passo que o Painel LR atingiu 4,80%.

No penúltimo dia de análise, o fator com maior destaque foram as baixas temperaturas registradas nas placas FV, mesmo com uma radiação solar alta, o que contribuiu para uma maior potência de geração, fato que se deve a alta velocidade do vento neste dia, como foi observado na tabela 1. Além disso, conforme esperado, a temperatura do Painel LR se manteve bem menor

que a do PaineL no primeiro período da manhã, isso ocorreu devido a água utilizada na sua limpeza contribuir também para o arrefecimento de sua superfície.

#### 4.4.5 Dia 10

No último dia do processo experimental, ou seja, no dia 10 foi observado que a irradiância se manteve entre  $900\text{W/m}^2$  e  $1300\text{W/m}^2$ , mas a potência das duas placas FV não tiveram um pico significativo como analisado nos dias anteriores, que chegou a atingir 11W. Além disso, constatou-se altas temperaturas nos módulos FV, com valores chegando aos  $53^\circ\text{C}$  no PaineL, por exemplo, o que contribuiu para o desempenho do PaineL ser menor que a do PaineLR, com os valores, respectivamente de 5,46% e 5,61%.

É percebido que a temperatura do PaineLR, depois de um certo tempo, se manteve maior que a do módulo L. Fixando que o Modelo 2 com o arrefecimento as 8:00, pode ser considerado menos eficiente que o Modelo 1.

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida no trabalho constatou que a deposição superficial de detritos afetou o desempenho elétrico dos módulos e um método de limpeza em que há maior recuperação da eficiência do módulo FV. Como pretendido, a comparação entre os dois modelos de análise traz consigo algumas deduções.

Os resultados obtidos constataram que a temperatura afeta negativamente o desempenho de um sistema fotovoltaico, desde que a temperatura de operação seja superior às exigidas nas Condições Padrões de Teste (STC- Standart Test Conditions).

Sobre o local de instalação dos painéis, o nordeste brasileiro e seus elevados índices de radiação, colaboram positivamente na conversão de energia solar para elétrica. Entretanto, por possuir uma temperatura ambiente elevada na maioria das suas estações climáticas, a região induz a elevação de temperatura nos módulos, implicando em perdas significantes no desempenho de um sistema fotovoltaico, como também, a redução da vida útil do módulo. É importante salientar que os fatores climáticos, influenciaram diretamente no sistema, como por exemplo, no processo de troca de calor dos módulos, no qual foi observado que nos dias de mais vento e umidade os percentuais de redução do módulo sujo, com relação ao limpo, foram menores devido uma redução na variação da temperatura entre eles.

Durante o processo experimental dos métodos de limpeza, o Modelo 1 se manteve com uma potência elétrica levemente maior, embora, não tão significativa, devido a sua limpeza ser realizada no período em que os módulos FV apresentavam maior temperatura de superfície em virtude aos altos valores de radiação solar incidente e temperatura ambiente da cidade em estudo. Com relação ao Modelo 2, observou-se uma menor eficiência em relação ao Modelo 1 devido ao fato que, às 8:00h, horário de limpeza dos painéis, o módulo vinha de uma madrugada com temperaturas mais baixas e a influência do arrefecimento do módulo com a água utilizada para limpar o módulo FV não atuava como no realizado no horário das 12:00h. Após algumas horas, a temperatura do módulo FV que foi limpo com água e flanela se equiparava com a do módulo que era apenas limpo com a flanela.

O fator que se mostrou mais determinante no experimento foi a temperatura. No Modelo 1, após a limpeza utilizando água, a temperatura do módulo caía cerca de  $10^\circ\text{C}$  na maioria dos dias, o que contribui não somente para a melhora na geração de eletricidade, mas potencialmente, para uma maior vida útil do paineL FV.

Foi constatado a redução de potência no módulo sujo, conseqüentemente de eficiência, em todos os dias de medição, para o sistema analisado. Logo, foi perceptível que o uso da água na limpeza diária dos módulos FV não representa uma recuperação expressiva do desempenho dos painéis, ou seja, não favorecem a produção de energia elétrica quando comparada com à

limpeza utilizando apenas a flanela, uma vez que os valores obtidos se equivaleram. Porém, na pauta que trata da vida útil da célula, a diferença entre elas, pode ser considerada de enorme importância. Desta forma, visando aumentar o tempo de vida do painel FV, um sistema de resfriamento diário para os módulos é de suma importância.

## **REFERÊNCIAS**

BELTRÃO, Ricardo Esberard de Albuquerque. **Efeito da Temperatura na Geração de Energia de Módulos Fotovoltaicos Submetidos a Condições Climáticas Distintas. Estudo de Caso Para as Localidades de Recife e Araripina.** Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, 2008.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. **Manual de engenharia para sistema fotovoltaico.** Rio de Janeiro, 2014.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório síntese do balanço energético nacional 2017,** Rio de Janeiro, 2017.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos.** Dissertação. Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007. 146 f.

KUDISH, A. I., IANETZ, A. **Analysis of a Solar Radiation Data fot Beer Sheeva, Israel and It's Environs.** Solar Energy, Kidlington, v.48, p. 97-106,1992

LOPEZ, Ricardo Albadó. **Energia Solar para produção de eletricidade.** São Paulo: Artliber Editora, 2012.

MATTOS, G.M. **Estudo de rendimento e temperatura de painéis fotovoltaicos com uso de técnica de concentração solar.** Rio de Janeiro, 2016.

MICHELS, Roger Nabeyama. **A Influência da Temperatura na Eficiência de Painéis Fotovoltaicos em Diferentes Níveis de Incidência da Radiação Solar.** Revista Agroambiental, Dezembro de 2010.

RIBEIRO, George Bezerra. **Energia solar fotovoltaica: Estudo de dimensionamento e viabilidade de sistemas autônomos em Mossoró/RN.** Dissertação. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN. Mossoró, 2004