

## **EFEITO DA SUJIDADE NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**Lucélio Oliveira Lemos** – lucelio59@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

**Ângela de Mello Ferreira** – angelamello@des.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Recursos Naturais, água e Biodiversidade. INCT-Acqua

**Patrícia Romeiro da Silva Jota** – prsjota@dppg.cefetmg.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica.

**Aline Geice Vitor Silva** – alinegeice@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

**Resumo.** *Inesgotável na escala terrestre de tempo, a energia gerada pelo Sol, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, uma das alternativas energéticas mais promissoras. Dentre as diversas aplicações da energia solar, a geração direta de eletricidade através do efeito fotovoltaico se apresenta como uma das formas mais ecologicamente corretas. O fornecimento desta energia é geralmente associado com a irradiância disponível do sol, o espectro da luz emitida e a performance de componentes inerentes ao sistema de conversão. No entanto, outros fatores externos, entre estes a sujidade, são comumente negligenciados ou subestimados, podendo se tornar um problema para a viabilidade de uma instalação solar. As células fotovoltaicas estão sujeitas a ação da poluição, e a aderência de sujidades aos vidros dos módulos fotovoltaicos prejudica a transmissividade ótica da radiação solar até as células fotovoltaicas, reduzindo a eficiência do sistema. Este trabalho visa realizar uma revisão bibliográfica sobre o efeito do acúmulo de sujidade no desempenho de módulos solares.*

**Palavras-chave:** *Sujidade; Fotocélulas; Recobrimento; Eficiência.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A tecnologia fotovoltaica converte a radiação solar diretamente em eletricidade. A célula solar é o dispositivo mais utilizado para conversão direta da energia solar em energia elétrica. As células fotovoltaicas (PV - Photovoltaics cells) necessitam de proteção contra fatores ambientais, como poeira, umidade etc. e estão normalmente inseridas entre folhas de vidro ou material similar. Células fotovoltaicas com concentradores (CPV - Concentrating Photovoltaics cells) utilizam lentes concentradoras que concentram os raios solares nas células fotovoltaicas. Quando é necessária uma maior quantidade de energia do que uma única célula consegue produzir, as células são ligadas entre si eletricamente de modo a formar um módulo fotovoltaico (os módulos interligados formam os painéis solares).

O estudo da eficiência das células fotovoltaicas é fator determinante para que se consiga uma boa relação custo / benefício. Um dos fatores que apesar de desprezado por muitos autores, pode vir a ser bastante significativo, principalmente em áreas poluídas ou com uma concentração elevada de partículas, é a sujidade na superfície da célula fotovoltaica. Geralmente, esta superfície é recoberta por algum tipo de vidro, geralmente, temperado e de alta transparência. A sujidade nestas superfícies ocasiona a diminuição do rendimento das células fotovoltaicas, o que pode ser bastante significativo, principalmente se atentarmos para a localização e fenômenos atmosféricos (Sarver et al., 2013).

A instalação de sistemas fotovoltaicos para rendimento ideal é ditada principalmente pela sua localização geográfica (latitude e insolação disponível) e o projeto de instalação (inclinação, orientação e altitude) para maximizar a exposição solar. No entanto, uma vez que estes parâmetros foram tratados adequadamente, existem outros fatores que surgem influenciando na determinação do desempenho do sistema (eficiência e saída). A sujidade é o fator menos reconhecido que influencia significativamente o desempenho destas instalações (Mani e Pillai, 2010).

Nestes casos, a solução habitual consiste em limpar os módulos com água. Em sistemas fotovoltaicos em larga escala, esta tarefa é, muitas vezes, cara, especialmente em áreas com escassez de água, aumentando o custo do projeto (Silva Neto, 2013). O acesso, e muitas vezes a enorme dimensão das usinas fotovoltaicas, podem inviabilizar o processo de limpeza.

Novas tecnologias vêm-se aprimorando sobre a modificação de superfícies baseadas na deposição de recobrimentos com filmes finos de menos de 100 nm de espessura por meio de diferentes rotas de síntese e processos. Um dos processos bastante estudados para modificação de superfícies via recobrimento com filmes finos é a tecnologia sol-gel, visando conferir propriedades autolimpantes às superfícies (Silva Neto, 2013). As modificações dessas propriedades podem colaborar com a redução do acúmulo de sujidades no recobrimento da superfície dos módulos fotovoltaicos.

Acredita-se que os recobrimentos funcionais podem contribuir significativamente para o aumento da eficiência energética das células fotovoltaicas, evitando o acúmulo de sujidades, tais como: poeira e matéria orgânica (Silva Neto, 2013). A Fig. 1 mostra esquematicamente os principais métodos de limpeza em painéis fotovoltaicos.

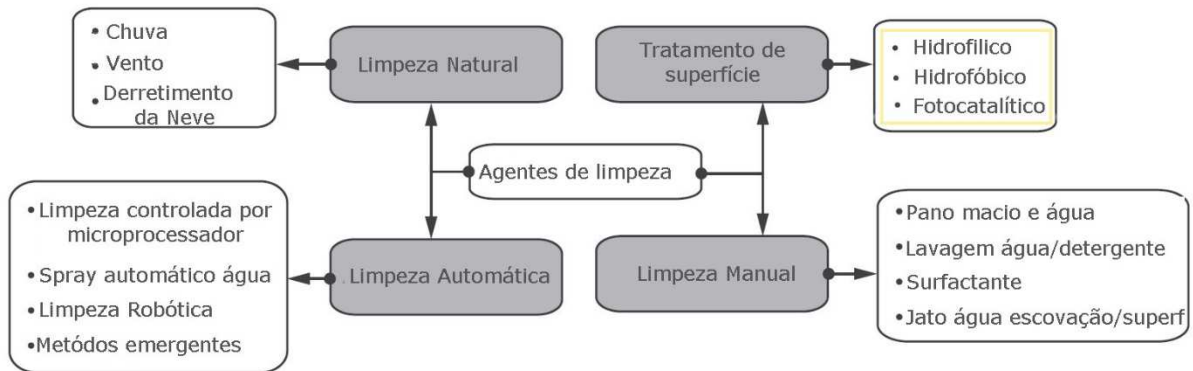


Figura 1 – Métodos de limpeza para remover a sujeira dos coletores solares (Sayyah et al., 2014). (Traduzido e adaptado pelos autores)

## 2. SUJIDADE

A sujeira no contexto deste trabalho, e de maneira geral, é um residual de compostos inorgânicos presentes em poeira, pólen de plantas, carbono amorfo resultante de queima de combustíveis fósseis e incêndios florestais, resíduos oleosos oriundos de processos produtivos e tráfego de veículos.

Poeira é um termo geral para qualquer partícula menor que 500  $\mu\text{m}$  de diâmetro, que é 10 vezes o diâmetro de um cabelo humano (Sarver et al., 2013). Pode incluir pequenas quantidades de pólen (oriundo da vegetação), fungos, bactérias, dejetos humano/animal, células, fibras de cabelo, tapetes e têxteis (às vezes denominadas microfibras) e, mais comumente, minerais tais como areia, argila ou calcário.

Material em suspensão na atmosfera (aerossóis) é atribuída a várias fontes, tais como elementos de solo levantadas pelo vento (poeira eólica), erupções vulcânicas, movimento de veículo e poluição. O tamanho de partícula, constituintes e forma da sujeira variam de região para região em todo o mundo (Sarver et al., 2013).

### 2.1 Fatores que influenciam a sujeira

O comportamento de deposição e as taxas de acumulação podem variar drasticamente em diferentes localidades. Esses fatores são baseados sobre a geografia, clima e urbanização de uma região. A Fig. 2 exemplifica os efeitos e a dificuldade de remoção da sujeira em regiões áridas.

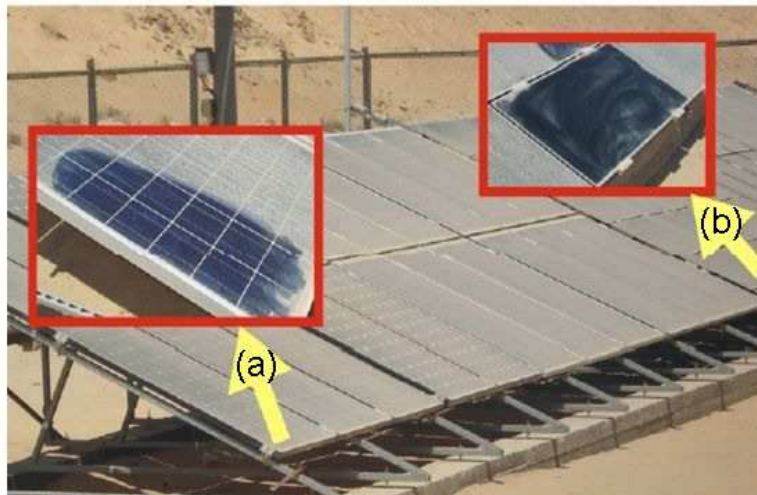


Figura 2 – (a) Efeitos da sujeira e (b) a dificuldade da limpeza (Vashishtha, 2013) - Adaptado pelo autor

Importantes características do pó são, tipicamente, tamanho e distribuição, densidade, forma, composição química, carga e capacidade de adesão. Condições ambientais importantes que se relacionam com estas características são: umidade, vento (variação na direção, velocidade) e variações do tempo de exposição (Sarver et al., 2013).

Outro fator que não deve ser esquecido, é a correta instalação dos módulos tais como inclinação das placas e o efeito do sombreamento. Em equipamentos que utilizam concentradores, a correta instalação do rastreador, que é um equipamento programado para acompanhar o movimento solar onde são fixados os módulos solares, é outra parte crítica no projeto.

## 2.2 Comparação de efeitos da sujidade em módulos fotovoltaicos convencionais e com concentradores (CPV)

Segundo Vivar et al. (2008), os sistemas CPV são mais sensíveis à sujidade que os painéis convencionais. Isto fica claro quando se observa que a poeira interrompe a função pretendida na superfície (alta transmitância e baixa refletância) impedindo que a luz chegue a célula fotovoltaica. Esta interface ótica é mais complexa e crítica em sistemas com concentradores (lentes) o que pode reduzir significativamente a potência de saída e a eficiência ou até interromper completamente a operação do sistema.

Segundo Casanova et al. apud Silva Neto (2013) “O acúmulo de sujidades sobre os vidros que recobrem os módulos das células fotovoltaicas podem causar redução do desempenho dos mesmos de 4 a 26,3%, dependendo do tipo da célula, sendo esse efeito sensivelmente mais crítico para sistemas com concentradores”.

## 3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A Fig. 3 mostra um módulo fotovoltaico convencional e um módulo com concentração.



Figura 3 – (a) módulo fotovoltaico convencional e (b) módulo fotovoltaico com concentração (CPV). (Fotografado pelos autores)

De modo geral, os módulos fotovoltaicos convencionais são compostos de Células de Silício monocristalino ou policristalino com rendimento aproximado de 13 a 20%. Os painéis fotovoltaicos com lentes concentradoras CPV são compostos por células multijunção usando materiais como GaAs (Arsenieto de Gálio) e Ge (Germânio) entre outros, tendo um maior rendimento apesar do custo mais elevado. O rendimento destas células pode chegar a 46% (NREL, 2015).

### 3.1 Rendimento (eficiência) %

A definição de rendimento é a relação entre a potência solar que entra no sistema e a potência útil disponível na saída do sistema.

Os principais procedimentos consistem em verificar os principais parâmetros das células fotovoltaicas limpas e sob a ação da sujidade. O rendimento apesar de ser o principal fator que resume a maioria dos parâmetros, é interessante estudar separadamente as características isoladas tanto das células solares quanto da sujidade. O gráfico IV (Fig. 4) resume as principais características das células fotovoltaicas sejam elas do tipo PV como do tipo CPV.

Estes parâmetros devem ser analisados com o módulo limpo e comparados em relação as características da sujidade acrescentada:

Potência Nominal Máxima	$P_{MP}$	(Wp)	Corrente de curto circuito	$I_{sc}$	(A)
Corrente Máxima	$I_{MP}$	(A)	Tensão de circuito Aberto	$V_{oc}$	(V)
Tensão Máxima	$V_{MP}$	(V)			

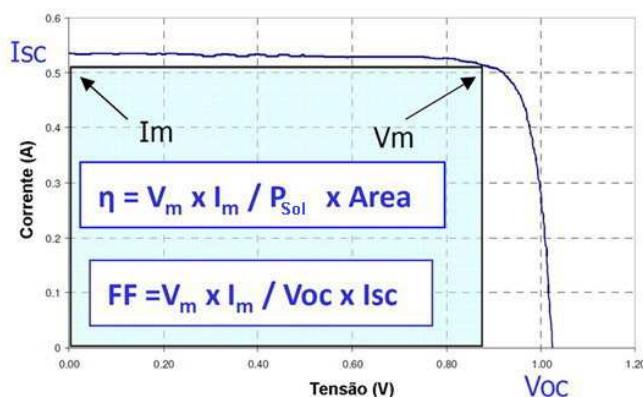


Figura 4 – Curva Corrente (I) x Tensão (v) (Gianluca, 2012)

### 3.2 Modificações de superfície e revestimentos

Visando uma menor sujidade e melhor facilidade de limpeza dos módulos, aumentando sua eficiência e reduzindo os gastos com manutenção, as seguintes características são desejáveis na cobertura da superfície de módulos fotovoltaicos:

- Propriedades fotocatalíticas autolimpantes.
- Propriedades hidrofílicas ou hidrofóbicas.
- Alta transmitância e baixa refletância.
- Resistência mecânica elevada.
- Baixa aderência de produtos químicos (especialmente de materiais classificados como potencialmente 'pegajosos').

O “Santo Graal” para a comunidade de prevenção, é desenvolver um revestimento que simplesmente não permitirá a deposição da poeira na superfície do painel solar do dispositivo. Este revestimento não deve ter apenas essa propriedade desejável, mas deve ser durável e confiável ao experimentar altas temperaturas, tempestades de areia e exposições à radiação no comprimento de onda ultravioleta (UV) e infravermelha (IR). Também devem ser relativamente baratos e fáceis de incorporar no componente solar em questão (Sarver et al., 2013).

De acordo com Sarver et al., (2013), várias tentativas, além de revestimentos com características que impeçam a fixação da sujidade, são a polarização eletrostática (campo elétrico repele as partículas), a vibração superficial (acelera o movimento de superfície movendo as partículas), correntes de ar induzidas (fenômeno usado em telescópios astronômicos), inverter a superfície dos módulos durante a não utilização (noite). Mas todos estes métodos se encontram ainda em estudo onde confiabilidade e custo são ainda fatores a serem considerados.

## 4. SIMULAÇÕES EM AMBIENTES CONTROLADOS E REAIS

### 4.1 Simulações em laboratórios

O problema do estudo da sujidade geralmente esbarra em dois fatores importantes: o tipo de sujidade (qualitativo) e o tempo de acúmulo (quantitativo).

A sujidade pode ser estudada de maneira acelerada, utilizando-se de métodos que nos forneçam dados (controlados) que simulem o tipo e a velocidade de acúmulo, desta maneira, pode-se ter uma primeira ideia do processo e do comportamento das células fotovoltaicas em questão.

### 4.2 Mecânica de deposição de poeira

Goossens apud Sarver et al., (2013) conduziram em um túnel de vento simulações e experimentos de campo para investigar mais cuidadosamente a mecânica de deposição de poeira atmosférica sobre coletores PV. Eles concluíram que a direção e o formato do coletor de vento impactam significativamente a deposição e distribuição de poeira, e que velocidades do vento superiores a 2 m/s tem apenas um pequeno efeito sobre a distribuição de poeira (em um estudo laboratorial).

### 4.3 Composição química e granulação da poeira

De acordo com os estudos realizados por Mani e Pillai (2010), os efeitos de diferentes partículas poluentes na perda de energia nos painéis solares se relacionam como na Fig. 5.

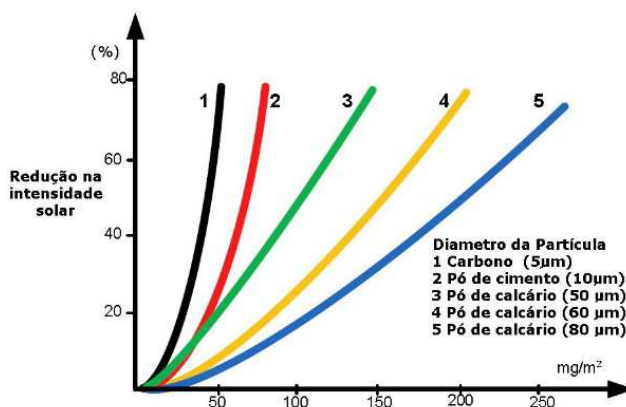


Figura 5 – Redução da intensidade Solar em resposta a deposição de poeira (Mani e Pillai, 2010).

Em um estudo de laboratório, El-Shobokshy e Hussein apud Mani e Pillai (2010) cobriram superfícies PV com tipos diferentes de pó (ou seja, calcário, cimento, carbono) e mediram a saída de energia elétrica das células sob condições diferentes.

A densidade de deposição de poeira foi determinada com precisão para cada experimento, e as partículas mais finas foram encontradas reduzindo as performances com mais intensidade. Curiosamente, estes autores (El-Shobokshy e Hussein), também observaram que as partículas de carbono estando presentes com partículas de óleo eram o pior contaminante para a potência de saída de módulos (Sarver et al., 2013).

#### 4.4 Testes externos (outdoors) de módulos convencionais e com concentrador

No IES-UPM (*Instituto de Energia Solar - Universidad Politécnica de Madrid*), localizado na cidade de Madrid, foi realizado um experimento simples a fim de encontrar alguma informação sobre a questão da sujeira e o tipo de painel solar (com e sem lentes concentradoras). Cinco sistemas de concentradores (CPV) de diferentes tecnologias e um módulo fotovoltaico convencional (PV) foram comparados (Tabela 1).

Os cinco sistemas de concentração utilizados foram o Arquimedes 2 X e Arquimedes 10x de ZSW (Alemanha), Euclides 20 X e Euclides 40 X da IES-UPM e um sistema baseado em lentes de Fresnel 300 X. Todos os concentradores foram instalados para teste nas instalações IES-UPM Madrid – Espanha (Vivar et al., 2008).

Procedimentos:

1. As medições dos módulos começaram com eles sujos durante diferentes períodos de tempo.
2. Mediu-se a curva característica IV do módulo, da corrente nula (aberto) até a corrente de curto circuito  $I_{sc}$ .
3. Limpou-se com água limpa todos os sistemas.
4. Repetiu-se a medição das características da curva IV.
5. Verificou-se as diferenças entre as medições antes e após a limpeza, quantificando as medidas dentro do possível.
6. Foi feita uma comparação entre os resultados das duas tecnologias.
7. Repetiu-se a medição durante vários meses para alcançar conclusões consistentes.

Tabela 1 – Comparação da  $I_{sc}$  entre o módulo convencional e os cinco sistemas concentradores, antes e depois de limpos - resultado mar. 2008 (Vivar et al., 2008)

Sistema	$I_{sc}$ antes de limpo [A]	$I_{sc}$ depois de limpo [A]	Incremento [%]
Módulo Convencional – (PV)	2.87	2.9	1.2
Archimedes 2X	21.46	23.32	8
Archimedes 10X	10.7	12.66	15.5
Euclides 40X	22.14	30	26.2
Euclides 20X	9.7	12.63	23.2
Fresnel Module 300X	3.94	4.49	12.3

Sistemas CPV continuam mostrando um aumento significativo do  $I_{sc}$  (corrente de curto circuito) após a limpeza em comparação com o módulo convencional. Para o Archimedes 2 X o incremento é de 8%; e para o Arquimedes 10 X de 15,5%. Para os sistemas, Euclides 20 X a  $I_{sc}$  aumentou em 23,2%, para o Euclides 40 X houve aumento de 26,2% e o ponto de foco, o sistema CPV 300 X, o aumento da corrente de curto-circuito foi de 12,3%. Nota-se que o incremento da  $I_{sc}$  do módulo convencional após a placa limpa foi de apenas 1,2% (Vivar et al., 2008).

#### 4.5 Efeitos da sujeira em painéis fotovoltaicos convencionais em clima árido

Principalmente em regiões áridas (Fig. 6), o acúmulo de sujeira em painéis solares, pode ter um impacto significativo sobre o desempenho dos sistemas fotovoltaicos onde a precipitação é limitada por vários meses. Este é um efeito importante em muitas regiões áridas, como a região do sudoeste dos Estados Unidos e do Sul da Europa, onde o mercado para projetos de energia solar está em constante crescimento (Kimber, 2007).

Claro que, a natureza física da poeira e as características de deposição são regidas pela região do mundo em que são realizados os estudos de poeira. As inter-relações entre os parâmetros de poeira, a deposição e a adesão são fatores que devem ser levados em consideração principalmente em áreas poluídas.

No Kuwait, Wakim apud Sarver et. al (2013) encontrou uma redução de 17% na potência de PV devido ao acúmulo de areia ao longo de seis dias. Sayigh et al. apud Sarver et. al (2013) e Hasan and Sayigh apud Sarver et. al (2013) realizaram experiências mais extensas e, examinando a redução transmitância em função do ângulo de inclinação das placas de vidro em exposição contínua, 38 dias no deserto do Kuwait. Com ângulos de inclinação do

conjunto de 0 graus (horizontal), 15, 30, 45, e 60 graus. A correspondente redução de transmitância foi 64%, 48%, 38%, 30% e 17%, respectivamente, indicando a natureza crítica do ângulo da instalação dos painéis (Sarver et al., 2013).

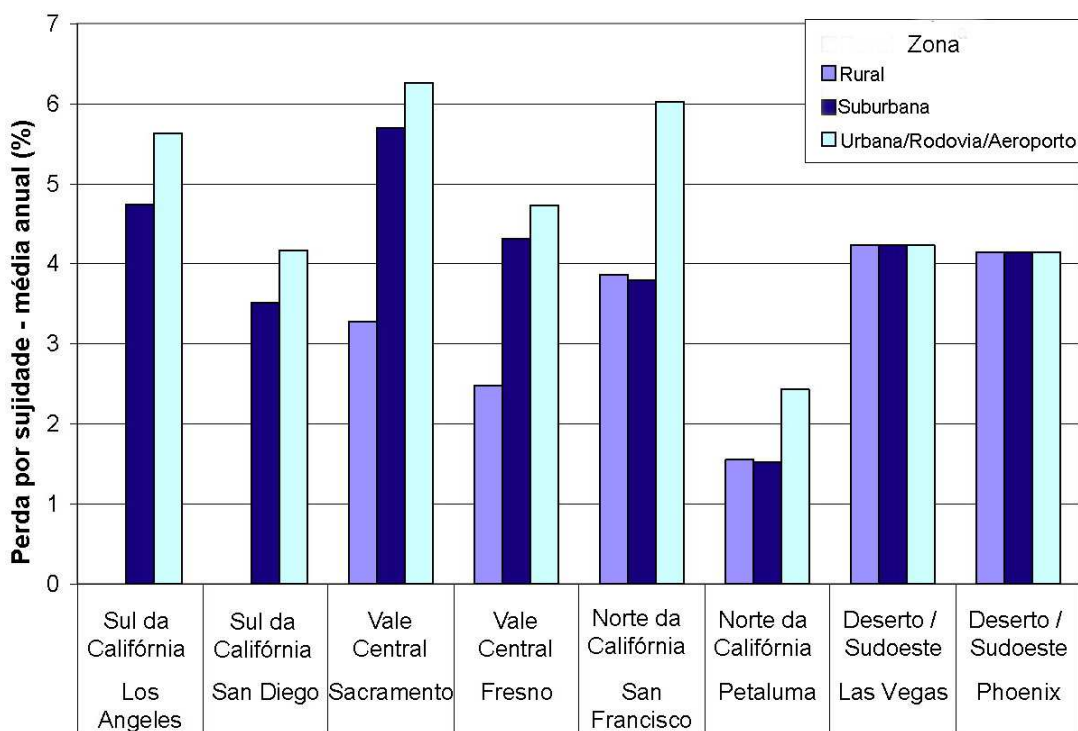


Figura 6 – Taxas médias anuais de perda por sujidade em regiões áridas dos Estados Unidos da América (Kimber, 2007).

## 5. CONCLUSÃO

Conforme a literatura analisada, a maioria dos autores avaliam as perdas por sujidade como significativas. Deve-se, no entanto, levar em conta o clima local, o tipo de sujidade, a época do ano e o custo da manutenção de limpeza.

Conclui-se, que em climas onde o índice pluviométrico é baixo, o problema da sujidade torna-se mais grave, pois a limpeza natural provocada pela chuva quase não acontece, e a possibilidade de acúmulo de sujidade é maior. No Kuwait, por exemplo, foi registrada uma redução de 17% na potência em módulos convencionais devido ao acúmulo de areia ao longo de seis dias. O que é uma perda bastante significativa em um período muito curto.

Os painéis solares que utilizam tecnologia com concentradores, parecem sofrer maior impacto com os efeitos da sujidade, justamente por depender de partes óticas com recobrimentos mais complexos. Os concentradores que utilizaram lentes Euclides tiveram o pior resultado em relação a Isc, apresentando perdas de até 26% devido a sujidade, enquanto as lentes Fresnel, apresentaram perdas em torno de 12%. Comparando com o módulo convencional, onde a perda foi de apenas 1,2% conforme estudos no *Instituto de Energia Solar - Universidad Politécnica de Madrid*.

Uma conclusão importante foi sobre o efeito da poeira no desempenho dos painéis fotovoltaicos já que não poderia ser correlacionado simplesmente pelo tempo de exposição em um determinado lugar, como sugerido por muitos pesquisadores anteriores. Os resultados indicam fortemente que a natureza da poeira – tais como a composição de pó, sua distribuição de tamanho e a densidade de deposição de poeira – influencia fortemente a perda de potência dos painéis PV. Como visto na Fig. 5.

Nos Estados Unidos da América (Fig. 6) observa-se que o provável efeito da poluição nas áreas urbanas, rodovias e proximidades a aeroportos provocam um efeito de perdas maiores nos módulos fotovoltaicos, devido a sujidade.

Os revestimentos óticos, para recobrimento de células solares, independentemente do tipo, podem permitir o aproveitamento máximo da emissão solar e tornar as superfícies autolimpantes. É possível resolver parte desse problema por meio da funcionalização do vidro na cobertura superior dos módulos fotovoltaicos por meio da deposição de revestimentos multifuncionais. “A superfície autolimpante permitiria a remoção da sujidade com a simples ocorrência de chuva ou o próprio orvalho da manhã” (Silva Neto, 2013).

Compreender as relações entre as propriedades físicas de partículas de poeira (por exemplo, tamanho, geometria e química) e o desempenho de um coletor solar é fundamental para desenvolvimento de técnicas eficazes de prevenção e mitigação.

## Agradecimentos

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, pela bolsa de estudos (Mestrado em Engenharia dos Materiais).

A RSE-Itália e projeto SUN ON CLEAN, coordenado pelo Dr. Gianluca Timó e Prof.<sup>a</sup> Ângela de Mello (CEFET-MG) e financiado pela comunidade Européia no SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME-Marie Curie Actions - International Research Staff Exchange Scheme.

## REFERÊNCIAS

- Gianluca T. Células fotovoltaicas: Tecnologia de fabricação, caracterização dos materiais das células e dos módulos. In: Cursos de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Engenharia Elétrica do CEFET-MG, Belo Horizonte/MG 2012.
- Kimber A. The Effect of Soiling on Photovoltaic Systems Located in Arid Climates. In: Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-7 September 2007, Milan, Italy.
- Mani M, Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010; 14 (45): 3124-3131.
- Sarver T, Al-Qaraghuli A, Kazmerski L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 22 (60): 698–733.
- Sayyah A, Horenstein M N, Mazumder M K. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*. 2014; 107 (): 576–604.
- Silva Neto J. T. Propriedades ópticas e estruturais de filmes finos de TiO<sub>2</sub> produzidos pelo processo sol-gel. 2013. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Vashishtha S. Lessons learned through installation of solar pv systems in typical indian hot climatic zone. *Firstgreen*. 2013 [Acesso em 12 de abr. de 2015];06:1 Disponível em: <https://firstgreenconsulting.wordpress.com/2013/06/01/lessons-learned-through-installation-of-solar-pv-systems-in-typical-indian-hot-climatic-zone/>
- Vivar M, Herrero R, Moretón R, Martínez-Moreno F, Sala G. Effect of soiling on PV concentrators: Comparison with flat modules. In: Photovoltaic Specialists Conference, 2008. 33rd IEEE, San Diego, CA, USA.
- NREL. National Renewable Energy Laboratory. Best research-cell efficiencies [figura]. National Center for Photovoltaics, USA, 2015. Disponível em: <[http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg)>. Acesso em: 28 set. 2015

### EFFECT OF SOILING ON PHOTOVOLTAIC PANELS PERFORMANCE

**Abstract.** Inexhaustible in terrestrial time scale the energy generated by the Sun, both as a source of heat and light, is nowadays one of the most promising energy alternative. Among the various applications of solar energy, the direct generation of electricity by photovoltaic effect presents itself as one of the most ecologically friendly. The supply of this energy is usually associated with the irradiance of the sun available, the spectrum of light emitted and the performance of components inherent in the conversion system. However, other external factors, among them the soiling, are commonly overlooked or underestimated that can become a problem for the viability of a solar installation. Photovoltaic cells are subject to action of pollution, dustiness and other natural factors, which hinder or reduce the incidence of solar radiation on the solar cells, thus reducing the efficiency of the system. This paper aims to carry out a literature review on the effect of the accumulation of dirt on the solar modules performance.

**Key words:** *Soiling, Photocells, Coating, Efficiency.*