

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ACÚMULO DE SUJEIRA SOBRE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FV: REVISÃO E MEDIÇÕES DE CAMPO

**Bernardo Meyer Hickel** – bernardohickel@hotmail.com  
**Eduardo Martins Deschamps** – deschamps.ufsc@gmail.com  
**Lucas Rafael do Nascimento** – nascimento.ufsc@gmail.com  
**Ricardo Rütter** - ricardo.ruther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

**Gabriel Claudino Simões** – gabriel.simoes@statkraft.com  
Monel Monjolinho Energética S.A. / Statkraft Energias Renováveis S.A.

**Resumo.** Este trabalho realiza uma avaliação criteriosa do acúmulo de sujeira (*Soiling*) em um sistema fotovoltaico localizado no interior da Bahia e seus efeitos nas diferentes tecnologias de módulos FV. O sistema FV contempla cinco diferentes tecnologias das mais difundidas no mercado mundial atual. Para esta análise, é realizada uma ampla revisão bibliográfica, visando destacar os principais aspectos sobre os quais a sujeira atenua a geração de energia no sistema FV. Para quantificar estas perdas, uma medição em campo é realizada, gerando dados para uma subsequente análise que levou em consideração as principais métricas utilizadas entre a comunidade fotovoltaica internacional. A análise é feita separadamente por tipo de tecnologia FV, visando destacar qual aspecto relativo à sujeira é mais relevante para cada tipo de tecnologia FV. Os resultados obtidos apresentaram perdas por sujeira consideráveis e com diferenças não negligenciáveis entre as tecnologias utilizadas no projeto e ressaltam a importância de serem avaliadas as condições de acúmulo de sujeira de determinado local antes da implantação e durante a operação do sistema.

**Palavras-chave:** *Soiling*, sujeira em módulos FV, tecnologias FV, energia solar FV.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica começa a ganhar escala nacional no Brasil. Com a aprovação da resolução normativa nº 482 da ANEEL, de 17 de Abril de 2012, ficam estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, a partir de fontes renováveis. Associado ao programa de leilões específicos para a geração solar fotovoltaica de grande escala, isso está causando um aumento significativo de empreendimentos na área fotovoltaica, tanto para a escala residencial como para grandes usinas espalhadas pelo país.

O Brasil, em especial o Nordeste Brasileiro, possui enorme potencial em termos de recurso solar. Todavia, é importante a realização de estudos analisando aspectos locais, pois a influência do clima e das características do ambiente podem acarretar em diferentes impactos, específicos da região, na geração fotovoltaica. Segundo Gostein et al., 2014 e Dunn et al., 2013, o acúmulo de sujeira (*soiling*) é o terceiro principal fator ambiental que influencia nos valores de geração do sistema FV, após irradiância e temperatura. Sinha et al., 2014, define *soiling* (ou sujidade, em tradução livre), como “A redução da radiação solar eficaz devido à absorção, reflexão e dispersão dada através de contaminantes na superfície do módulo FV”. Diversos estudos apontam valores significativos de perda de energia gerada por *soiling*, sejam da ordem de 3-6%/ano (Kimber et al., 2006), podendo chegar a valores de 20%/mês (Townsend e Hutchinson, 2000) e 30% em curtos períodos (Zorrilla-Casanova et al, 2011).

O estudo apresentado neste artigo é realizado no âmbito do projeto de P&D Solar Bahia, localizado no interior do Estado da Bahia, na Cidade de Brotas de Macaúbas. Este projeto faz parte do investimento da Usina Hidrelétrica Monel Monjolinho Energética S.A., subsidiária da Statkraft Energias Renováveis S.A., em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, segundo regulamentos estabelecidos pela ANEEL. O projeto tem como objetivo a investigação do potencial de geração de cinco diferentes tecnologias FV (m-Si, p-Si,  $\mu$ -Si/a-Si, a-Si e CIGS), cada uma com potência instalada de aproximadamente 2 kWp. O Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da UFSC (Fotovoltaica/UFSC [www.fotovoltaica.ufsc.br](http://www.fotovoltaica.ufsc.br)) é responsável pelo acompanhamento da geração (monitoramento e análise dos dados). O estudo aqui apresentado trata da análise da influência do acúmulo de sujeira sobre as cinco diferentes tecnologias FV do projeto. Para tal, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre os principais fatores que influenciam a atenuação da geração devido ao acúmulo de sujeira, bem como diferentes maneiras de mensurá-la. Utilizando-se dados do sistema de monitoramento e de medições realizadas em campo, foram quantificadas as perdas devido ao acúmulo de sujeira nas cinco diferentes tecnologias FV.

## 2. O SISTEMA FV DE ESTUDO

O Sistema Fotovoltaico (FV) utilizado nesse estudo (Fig. 1) está localizado no interior do Estado da Bahia (Lat.: -12.36, Long.: -42.28) e teve sua operação iniciada em Dezembro de 2013. O sistema possui 10,712 kWp de potência instalada total, distribuída em cinco tecnologias. A Tab. 1 exhibe as principais características dos sistemas FV utilizados no projeto. O sistema FV utiliza cinco inversores idênticos (SMA modelo SB2500HF), com intervalo de aquisição de

dados de cinco minutos. O projeto dispõe também de uma estação solarimétrica com piranômetros de padrão secundário (Kipp&Zonen modelo CMP11) para medição de irradiação global horizontal, global inclinada (no plano dos módulos) e difusa, sensores de temperatura ambiente, umidade do ar e pressão atmosférica.



Figura 1 – Vista Geral do Sistema FV.

Tabela 1 – Resumo das principais características dos sistemas FV utilizados no projeto.

Tecnologia	Potência Nominal [kWp]	Série x Paralelo	Eficiência do Módulo (%)	Área utilizada (m <sup>2</sup> )	Coef. Pmpp (%/°C)	Perdas Pmpp @50°C (%)
a-Si/ $\mu$ c-Si	2,272	2x8	9,1	25	-0,30	7,5
a-Si	2,100	3x7	6,4	33	-0,25	6,25
CIGS	2,160	6x3	11,0	19	-0,39	9,75
m-Si	2,065	7x1	15,2	14	-0,45	11,25
p-Si	2,115	9x1	14,4	15	-0,45	11,25

### 3. PERDAS POR SUJEIRA (*soiling*)

Conforme descrito por Sinha et al., 2014, quando um sistema FV está instalado em locais pouco chuvosos e com muito material particulado na atmosfera, os módulos podem acabar sujos de pó e poeira, o que pode resultar em redução da radiação incidente no semicondutor fotoativo. Entretanto, o acúmulo de sujeira sobre a superfície do módulo FV também impacta na geração através de outros fatores, descritos a seguir.

#### 3.1 Atenuação da radiação

Quando a radiação solar atinge um módulo FV com distribuição uniforme de sujeira, ela é atenuada, diminuindo a energia recebida pelo dispositivo. Quando os módulos FV possuem uma inclinação de pelo menos 5 a 10°, a própria chuva é suficiente para limpar os módulos, não sendo normalmente necessárias limpezas adicionais. Todavia, em alguns casos pode ocorrer o acúmulo de sujeira mais aderente (e.g. excrementos de pássaros) e nesses casos pode-se justificar a limpeza em pontos estratégicos do sistema. A Fig. 2 mostra a atenuação da irradiância sobre um dispositivo FV com sujeira uniforme, Fig. 2(a), e a relação entre as perdas causadas pela sujeira em uma célula FV e a precipitação de chuva, Fig. 2(b). É possível observar que as perdas ocasionadas pela sujeira aumentam consideravelmente em períodos de pouca precipitação.

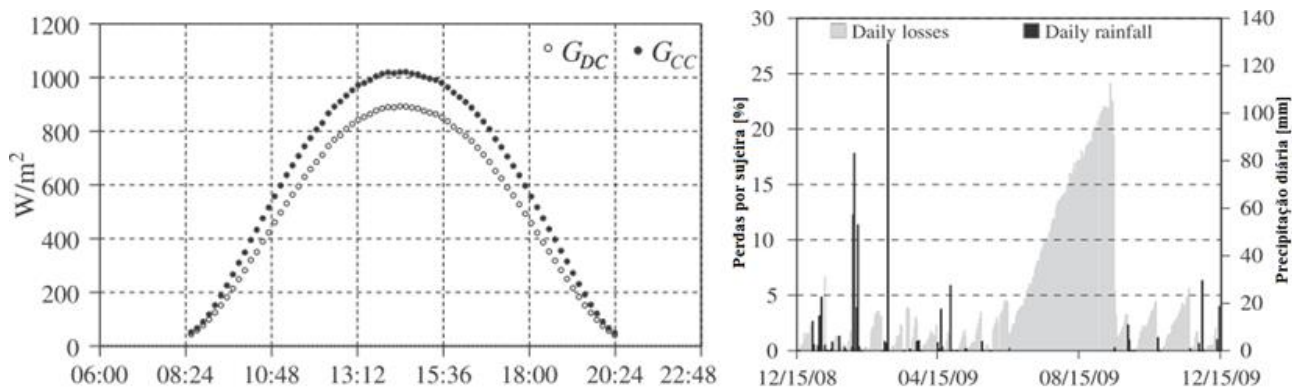


Figura 2 - Irradiância solar – célula de referência suja (GDC) e limpa (GCC), Fig. 2(a), e relação das perdas diárias causadas pela sujeira (cinza claro) versus chuva (preto) em uma célula FV, Fig. 2(b). (Zorrilla-Casanova et al., 2013)

### 3.2 Transmitância espectral

A sujeira também possui diferentes impactos dependendo da tecnologia FV utilizada. A Fig. 3 mostra a resposta espectral para diferentes tecnologias FV, Fig. 3(a), e a transmitância espectral para diferentes níveis de acúmulo de poeira, Fig. 3(b), em função do comprimento de onda. Observa-se que, à medida em que a densidade de poeira é aumentada, Fig. 3(b), as curvas de transmitância espectral continuam com o mesmo perfil e que, para comprimentos de onda menores, existe uma maior atenuação, ou seja, a sujeira atenua mais comprimentos de onda menores. Portanto, considerando a transmitância espectral, pode-se esperar que em tecnologias FV com resposta espectral mais azul (comprimentos de ondas menores), o acúmulo de sujeira tenha maior impacto.

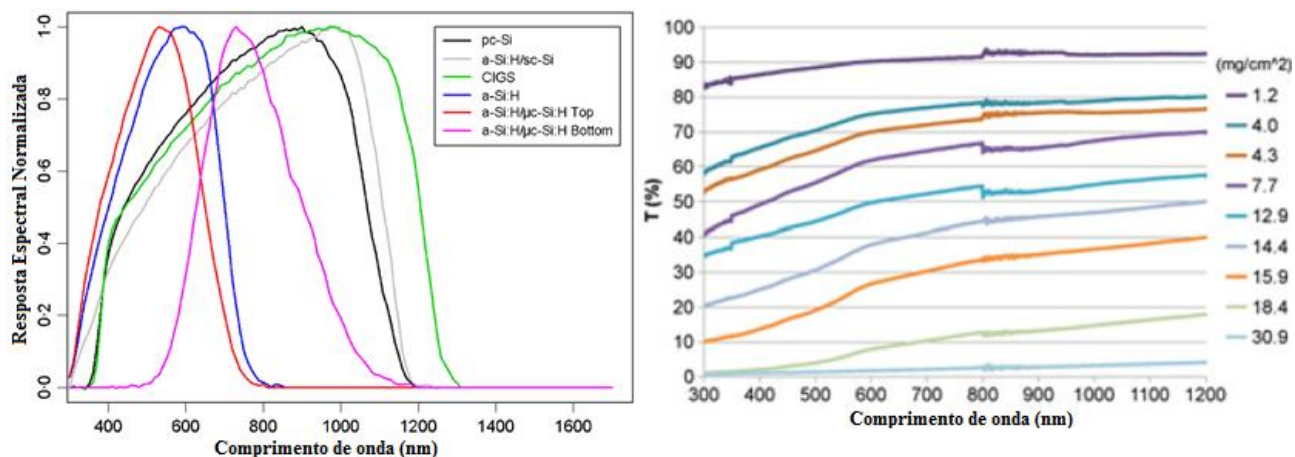


Figura 3 - Resposta espectral para diferentes tecnologias FV, Fig. 3(a) (Ishii et al., 2013) e transmitância espectral para diferentes níveis de acúmulo de poeira, Fig.3(b) (Qasem et al., 2012), em função do comprimento de onda.

### 3.3 Não homogeneidade

Em um módulo FV, tanto de silício cristalino como de filme fino, as células são conectadas em série. Isso significa que a corrente que circula por todas as células é a mesma. Quando uma célula é sombreada, sua corrente será menor e a corrente das demais células, de maneira geral, será limitada pela corrente da célula sombreada. Isso faz com que um acúmulo de sujeira concentrado em uma região do módulo possa acarretar em perdas de potência desproporcionais quando comparado à sua área de cobertura.

Os módulos de silício cristalino (m-Si e p-Si) normalmente vêm equipados com diodos de *bypass* (diodos de desvio). No caso dos módulos de silício cristalino utilizados nesse projeto, existem 3 diodos de *bypass* em cada módulo. Os diodos de *bypass* servem para dividir o módulo em submódulos, de forma que, se uma ou mais células de um submódulo for sombreada, isso não afetará a corrente das células pertencentes aos outros submódulos, reduzindo o impacto do sombreamento parcial. Os módulos de filme fino normalmente não utilizam diodos de *bypass*.

Portanto, quando a distribuição da sujeira não é uniforme nos módulos FV, as perdas não estão somente relacionadas com a atenuação da radiação solar, mas também com descasamentos elétricos (*mismatch*) de tensão e corrente entre células limpas e células sujas e também entre módulos limpos e módulos sujos dentro de uma mesma série (*string*). (Nascimento, 2013).

A Fig. 4 mostra dois dos principais perfis de sombreamento que podem ocorrer em módulos FV, principalmente em usinas FV onde as estruturas são dispostas em fileiras e uma fileira projeta sombra na outra, dependendo da disposição do módulo FV. Com isso, para cada topologia elétrica de módulo FV existe uma recomendação referente à instalação, em posição vertical ou horizontal, dependendo do perfil de sombreamento. Para módulos de silício cristalino, um sombreamento parcial limitado a apenas um dos três submódulos, mesmo que totalmente, terá um impacto muito menor do que um sombreamento que incida nos três submódulos, mesmo que parcialmente. Para módulos de filmes finos (a-Si, a-Si/μc-Si e CIGS), ocorre exatamente o oposto. A mesma lógica pode ser aplicada para avaliar um acúmulo de sujeira não-homogêneo sobre os módulos.

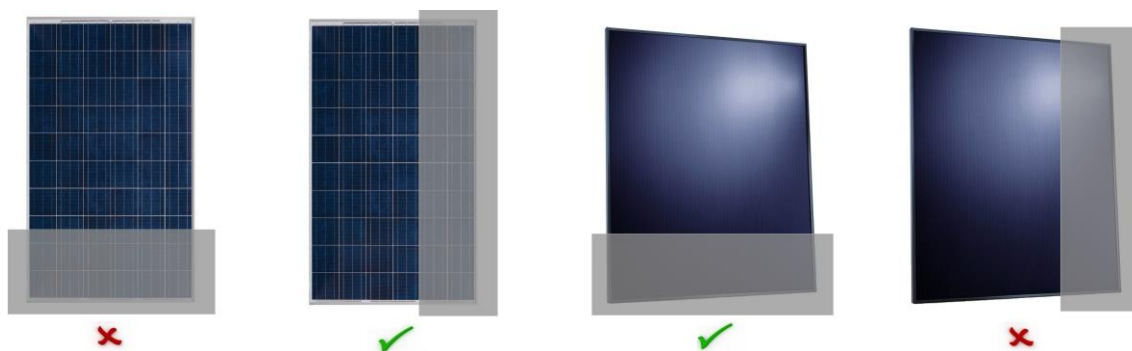


Figura 4 - Perfis de sombreamento, muito e pouco prejudiciais, de acordo com a topologia elétrica do módulo FV (silício cristalino na esquerda e filmes finos na direita, sendo que no módulo de filmes finos aqui representado, as células individuais estão dispostas paralelamente à maior dimensão do módulo). Para silício cristalino, o sombreamento vertical é menos prejudicial. Para as tecnologias de filmes finos, com essa disposição de células, ocorre o oposto.

### 3.4 Métricas de avaliação de sujeira

Para quantificar o impacto da sujeira em módulos FV, podem ser avaliadas a potência de pico e a corrente de curto circuito, através de medições IxV. Avaliar a corrente de curto circuito, que é diretamente proporcional à irradiância recebida pelo módulo, é um método mais rápido e não requer equipamentos sofisticados. Todavia, esse método só pode ser utilizado nos casos em que o acúmulo de sujeira é uniforme, ou seja, não ocasiona descasamentos elétricos entre as células de um módulo avaliado, conforme será mostrado adiante. A avaliação através da taxa de desempenho do sistema (PR – *Performance Ratio*) também é válida e é a que mais aproxima ao valor real de perda do sistema FV, principalmente se comparada a avaliação da corrente de curto circuito.

## 4. MEDIÇÕES

Para avaliar o impacto do acúmulo de sujeira sobre os módulos FV do projeto, foram realizadas medições de curva IxV em campo, para as condições de módulos sujos e limpos. As medições foram executadas respeitando os procedimentos abrangidos pela norma internacional IEC 60904-1 (2006). Para tal, estas medições foram divididas entre os dias 29/09/2014 e 01/10/2014, respeitando as condições de um dia de céu aberto (*Clear Day*), sem interferência por sombreamento, com horários das medições entre 11:00h e 13:00h, para que fossem atingidos valores de irradiância > 800 W/m<sup>2</sup>. Foram necessários três dias devido ao tempo destinado para a limpeza dos módulos.

### 4.1 Equipamentos

O equipamento utilizado para as medições foi o traçador de curva IxV, modelo PVPM1000C. Para a obtenção dos dados de irradiância solar no instante das medições, uma célula de referência estava conectada ao traçador de curva IxV e posicionada no mesmo plano e junto ao sistema avaliado. Para obter a temperatura do módulo no momento da medição, foi utilizado um sensor de temperatura (Termopar Tipo J, precisão:  $\pm [0.20\% + 0.3^{\circ}\text{C}]$ ) fixado na superfície traseira de um módulo de cada sistema medido.

### 4.2 Incertezas dos equipamentos

O processo de medição para módulos fotovoltaicos é definido para condições-padrão, as chamadas STC (*Standard Test Conditions*): Irradiância = 1000 W/m<sup>2</sup>; temperatura da junção da célula solar fotovoltaica = 25 °C; conteúdo espectral da irradiância equivalente a AM 1,5). Tais condições não são reproduzidas simultaneamente no ambiente e para medições em campo são aplicados modelos matemáticos para correção dos valores medidos para valores em STC, sendo assim produzido algum tipo de incerteza. Os procedimentos de correção utilizados pelo equipamento apresentam uma incerteza de 1% nos valores corrigidos (Wagner, 2000); contudo a incerteza total do equipamento (incertezas associadas à célula de referência, medição IxV e correção para STC) é de 5%. Para reduzir as incertezas dessas medições, diversas precauções foram tomadas, podendo-se destacar:

- Utilizar o mesmo equipamento (traçador IxV) e mesma célula de referência em todas as medições;
- Realizar as medições com níveis de irradiância próximos a 1000 W/m<sup>2</sup>, reduzindo assim as incertezas relativas à correção dos valores medidos para valores em STC;
- Tomar medidas de temperatura dos módulos, utilizando metodologia adequada e sensores de boa precisão;

Vale ressaltar que todas as medidas são relativas, ou seja, as medições com os módulos sujos foram feitas com o mesmo equipamento, nas mesmas condições e sofreram as mesmas correções das medições dos módulos limpos. Isso faz com que as incertezas no resultado da avaliação de sujeira, proveniente das medições em si, sejam reduzidas.

## 5. RESULTADOS

A Fig. 5 mostra o acúmulo de sujeira sobre um módulo de cada tecnologia FV, evidenciando que o acúmulo de sujeira foi não-homogêneo, se concentrando mais na parte inferior direita dos módulos FV, de forma semelhante em todas as tecnologias. Os módulos não haviam sido limpos desde sua instalação, em dezembro de 2013.

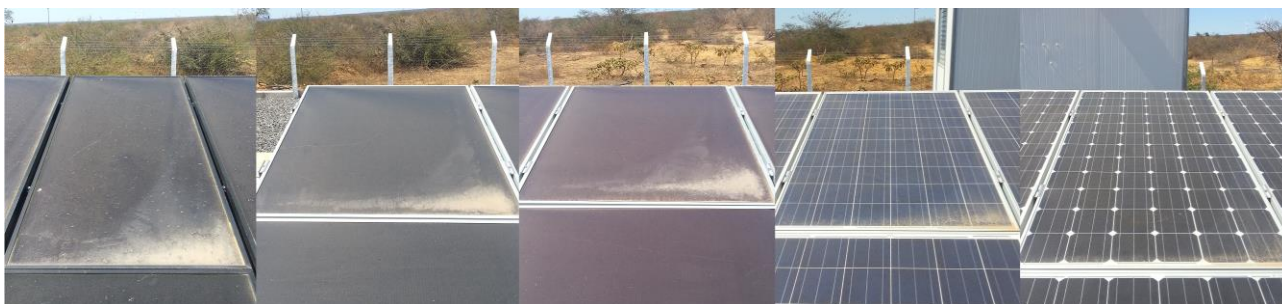


Figura 5 – Acúmulo de sujeira sobre um módulo de cada tecnologia FV (em ordem da instalação dos sistemas, da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/ $\mu$ c-Si, a-Si, p-Si, m-Si) evidenciando o perfil não-homogêneo.

Os resultados da avaliação de sujeira estão resumidos na Tab. 2. Para todas as tecnologias existem diferenças significativas entre as análises de corrente de curto-circuito e potência, indicando que, para esse caso, a análise de corrente não seria a mais correta, conforme esperado, devido à distribuição não-uniforme da sujeira. A Fig. 6 resume os resultados da influência da sujeira na potência total de cada tecnologia. Os valores percentuais, mostrados nas barras cinzas, representam o ganho de potência, para cada tecnologia após a limpeza dos módulos. Esses são os resultados finais do impacto do acúmulo de sujeira.

Tabela 2 - Dados elétricos do gerador FV antes e após sua limpeza.

		T mod (°C)	E eff (W/m <sup>2</sup> )	Isc STC		Voc STC		Imp STC		Vmpp STC		Pmpp STC		Fill Factor	
a-Si	Limpo	62	988	13,4		280		10,5		198		2080		55,3	
a-Si	Sujo	56	1056	12,6	6,4%	272	2,9%	9,8	6,6%	194	1,9%	1908	8,2%	55,8	-0,9%
CIGS	Limpo	55	859	9,6		351		8,2		248		2041		60,6	
CIGS	Sujo	57	870	9,2	4,6%	353	-0,5%	7,9	4,5%	251	-1,1%	1970	3,5%	61,0	-0,7%
a-Si/ $\mu$ c-Si	Limpo	43	1171	10,9		293		9,3		223		2066		64,9	
a-Si/ $\mu$ c-Si	Sujo	58	1072	10,4	3,8%	296	-0,9%	8,9	4,6%	220	1,1%	1951	5,6%	63,2	2,7%
m-Si	Limpo	62	958	9,1		318		8,2		259		2111		72,8	
m-Si	Sujo	52	962	8,5	6,2%	318	0,0%	7,8	4,6%	259	-0,1%	2017	4,5%	74,1	-1,8%
p-Si	Limpo	62	962	8,7		341		8,0		271		2154		72,6	
p-Si	Sujo	50	985	8,3	5,2%	336	1,3%	7,1	11,0%	270	0,3%	1910	11,3%	68,8	5,3%

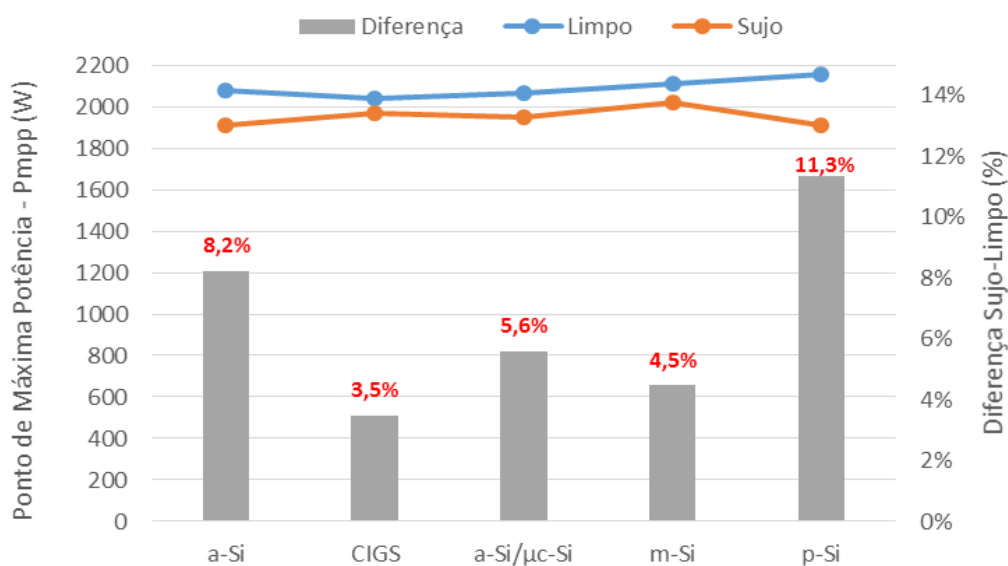


Figura 6 - Ponto de máxima potência para todos os sistemas, antes (curva laranja) e após (curva azul) a limpeza, e suas respectivas diferenças relativas (barras cinzas).

Todas as tecnologias avaliadas tiveram perdas por sujeira não negligenciáveis, desde 3,5% para a tecnologia CIGS até 11,3% para a tecnologia m-Si.

As perdas entre as duas tecnologias de silício cristalino (p-Si e m-Si) foram muito diferentes, sendo que para a tecnologia p-Si verificou-se uma perda 2,5 vezes maior do que para a tecnologia m-Si.

Dentre as tecnologias de filme fino, a que teve mais perdas foi a de a-Si. A tecnologia com menor perda foi a de CIGS. As variáveis que podem ter afetado o desempenho das tecnologias em virtude da sujeira são discutidas a seguir.

### 5.1 Tecnologias de silício cristalino

Os módulos das tecnologias m-Si e p-Si, assim como os todos os demais, estão instalados na posição vertical. A sujeira, apesar de estar localizada na parte inferior dos módulos, se concentra mais no canto direito. Isso faz com que apenas um terço do módulo seja significativamente afetado. A Fig. 7 mostra dois módulos da tecnologia p-Si. Um deles foi escolhido como sendo o módulo mais sujo e o outro um módulo pouco sujo. As curvas IxV e PxV limpa e suja aparecem abaixo dos mesmos. É possível observar claramente que o módulo da esquerda está mais sujo, principalmente no canto inferior direito. Foi verificada uma perda de potência, devido à sujeira, de 12,7% e de apenas 4,5% para o módulo mais sujo e menos sujo, respectivamente. Essa comparação evidencia o efeito que a concentração da sujeira sobre uma célula pode ter em um módulo com essa topologia elétrica.

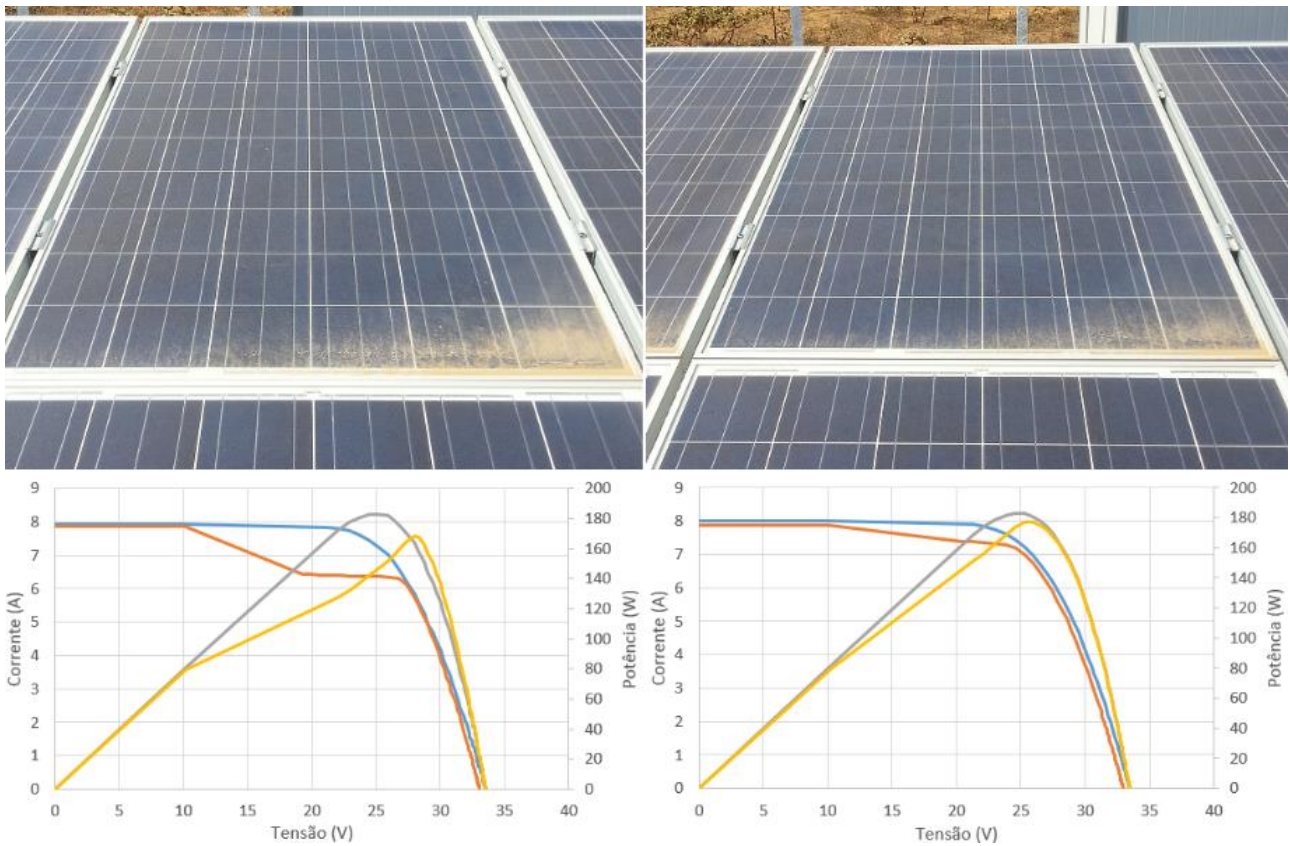


Figura 7 - Tecnologia de p-Si. Módulo muito sujo, Fig. 7(a), e módulo pouco sujo, Fig. 7(b), com suas respectivas curvas IxV limpa (azul), suja (laranja) e PxV limpa (cinza) e suja (amarela).

De maneira geral, a tecnologia p-Si apresenta um acúmulo de sujeira maior, especialmente na parte inferior direita, conforme pode ser observado nas Fig. 5 e 7. Duas hipóteses podem explicar esta diferença no acúmulo de sujeira.

- Posição dos subsistemas e regime dos ventos predominantes na localidade: em virtude da predominância do vento Leste, a tecnologia mais a Oeste (m-Si) poderia, em função da proteção que as outras tecnologias proporcionam, estar menos sujeita ao acúmulo de sujeira.
- Vidro do módulo FV: um importante fator que pode influenciar no diferente acúmulo de sujeira entre os sistemas são os diferentes tipos de rugosidade dos vidros utilizados nos módulos FV, assim como sua hidrofiliabilidade (Klimm et al., 2014).

### 5.2 - Tecnologias de filmes finos

Conforme mencionado, as perdas em função da sujeira para a tecnologia CIGS foram as menores, mesmo estando visualmente tão suja quanto as outras. Já as perdas das tecnologias baseadas em silício amorfo (a-Si e a-Si/ $\mu$ c-Si) foram consideravelmente maiores. Isso pode ser explicado, em parte, pela diferença na resposta espectral entre as tecnologias

de filme fino, em que a tecnologia CIGS tem uma melhor resposta para comprimentos de onda maiores (vermelho) e as tecnologias a-Si e a-Si/ $\mu$ -Si para comprimentos de onda menores (azul). Portanto, o acúmulo de sujeira tende a ter um efeito menor sobre a tecnologia CIGS e maior sobre as tecnologias que utilizam silício amorfo.

### 5.3 Taxa de desempenho - PR

A Tab. 3 apresenta os valores de PR dos subsistemas antes e depois da limpeza efetuada, assim como os valores percentuais de melhora de desempenho dos subsistemas. Os valores de PR foram calculados utilizando a média dos valores instantâneos de PR para dez dias antes (período de 18 a 27 de setembro de 2014) e dez dias depois (período de 2 a 11 de outubro de 2014) da limpeza do sistema.

Tabela 3 - Valores percentuais de PR antes e após a limpeza (média de 10 dias) e melhora relativa no desempenho dos subsistemas.

	Subsistemas por tecnologia				
	$\mu$ -Si	a-Si	CIGS	m-Si	p-Si
<b>PR antes da limpeza</b>	80%	86%	80%	86%	81%
<b>PR após a limpeza</b>	84%	90%	82%	89%	89%
<b>Melhora no Desempenho</b>	4,3%	4,3%	2,8%	2,6%	10,1%

A Tab. 4 mostra a melhora no desempenho dos sistemas por meio das medições de curva IxV realizadas, e a melhora de desempenho utilizando dois tipos de filtros para melhor aproximação de valores válidos de PR (reproduzindo as condições das curvas IxV), sendo estes filtros: valores de irradiância entre 700 e 1000 W/m<sup>2</sup> (excluindo assim dias nublados e de baixa temperatura) e valores de PR entre mais ou menos 5% da sua mediana para cada subsistema (análise estatística). Os filtros têm como objetivo reproduzir as condições em que foram traçadas as curvas IxV.

Tabela 4 - Valores percentuais de melhora do desempenho dos subsistemas relativo às medições IxV e PR filtrada.

PR (%)	Subsistemas por tecnologia				
	$\mu$ -Si	a-Si	CIGS	m-Si	p-Si
<b>Melhora no Desempenho (medição IxV)</b>	5,6%	8,2%	3,6%	4,5%	11,3%
<b>Melhora no Desempenho (PR filtrada)</b>	5,5%	5,3%	5,0%	4,6%	12,1%

Como constatado, os valores de melhora de desempenho estimados pelas medições IxV foram validados para a maioria dos subsistemas, com ótimas aproximações. Observa-se uma diferença de valores principalmente na tecnologia de silício amorfo. Esta diferença deve-se ao tamanho das amostras utilizadas para o cálculo de PR antes e depois da limpeza e, principalmente, pela ausência de dados de temperatura dos módulos FV. Mediante o refinamento do cálculo de PR com inclusão da temperatura de operação de cada subsistema (um terceiro filtro para a aproximação dos valores válidos de PR), obter-se-ia uma condição ainda mais próxima para as amostras anteriores e posteriores à limpeza do sistema.

Observa-se que os resultados de melhora de desempenho apresentados na Tab. 3 e Tab. 4 são diferentes. Isso ocorre porque o acúmulo de sujeira influencia o desempenho dos módulos de forma diferente de acordo com o valor da irradiância, e as medições IxV são feitas em um intervalo restrito de valores de irradiância.

Por fim, a escolha de se utilizar um período de dez dias antes e depois da limpeza para a análise de PR pode ter grande influência nos resultados. Em termos estatísticos, o ideal seria a maior quantidade possível de dias (ex.: 100 dias antes e após), dessa forma, seriam compensadas as ocorrências de dias atípicos em termos de temperatura, vento, irradiância e espectro. Por outro lado, um número pequeno de dias é desejável para reduzir a influência do acúmulo gradual de sujeira após a limpeza.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentado teve como objetivo avaliar o impacto do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias FV, assim como apresentar uma breve revisão do tema.

A sujeira pode afetar de maneira diferente as tecnologias de módulo FV utilizadas no projeto. A transmitância espectral de um vidro coberto por uma camada de poeira decai mais para comprimentos de ondas menores, ocasionando maior impacto nas tecnologias a-Si e a-Si/ $\mu$ -Si. As diferentes topologias elétricas de módulos (disposição e conexão elétrica das células, diodos de *bypass*) devem ser levadas em consideração ao se avaliar o impacto da sujeira, especialmente em casos de sujeira não-homogênea.

A intensa concentração de sujeira no canto inferior direito da tecnologia p-Si, levou a perdas 2,5 vezes maiores quando comparada às perdas da tecnologia m-Si. O forte acúmulo de sujeira concentrado nos módulos de p-Si pode ser devido à posição desse subsistema e ao regime de ventos na região.

Os resultados da avaliação de sujeira, após entendidos todos os aspectos que afetam as tecnologias, ficaram dentro do esperado. Foi mostrado também que, para esse caso, a avaliação da influência da sujeira através da análise da corrente de curto-circuito produz resultados incorretos, devido ao perfil de sujeira ser não-homogêneo.

Os resultados das medições IxV foram validados investigando-se a PR diária para dez dias antes e dez dias após a limpeza do sistema. Para validar as medições IxV, foram aplicados filtros aos valores de irradiância, considerando-se somente níveis de irradiação entre 700 e 1000 W/m<sup>2</sup>, com o objetivo de reproduzir as condições das medições. Porém, como não há medição de temperatura dos módulos FV, essa comparação ainda possui incertezas consideráveis.

Foi observado que os resultados das medições IxV, apesar de validados com os dados de PR, são diferentes da melhora real no desempenho do sistema; isso ocorre porque as medições IxV são feitas em um intervalo restrito de valores de irradiância e portanto em condições específicas de operação do sistema. Também, o resultado de melhora real do desempenho dos sistemas possui influência de possíveis dias atípicos, em relação a irradiância, temperatura, vento e espectro, no período analisado.

## REFERÊNCIAS

- A. Kimber, L. Mitchell, S. Nogradi, and H. Wenger, "The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States," in Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, HI, 2006.
- Gostein, M.; Caron, J.R.; Littmann, B., "Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants," in Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th , vol., no., pp.0885-0890, 8-13 June 2014
- IEC 60904-1: Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics, 2006(E).
- Ishii, T.; Otani, K.; Takashima, T.; Xue, Y. Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Issue 4, v.21, p.481-489, 2013.
- Klimm, E.; Lorenz, T.; Weiss, K.-A. Can anti-soiling coating on solar glass influence the degree of performance loss over time of PV modules drastically?. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Amsterdam - Netherlands. 2014.
- L. Dunn, B. Littmann, J. R. Caron, M. Gostein, "PV Module Soiling Measurement Uncertainty Analysis," 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, FL, 2013.
- Nascimento, L. A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública; Departamento de Engenharia Civil - UFSC, Florianópolis – SC, 2013. 94 p.
- Qasem, H., Betts, T. R., Müllejjans, H., AlBusairi, H. and Gottschalg, R. (2012), Dust-induced shading on photovoltaic modules. Prog. Photovolt: Res. Appl., 22: 218–226.
- Sinha, P.; Hayes, W.; Littmann, B.; Ngan, L.; Znaidi, R., "Environmental variables affecting solar photovoltaic energy generation in Morocco," in Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2014 International , vol., no., pp.230-234, 17-19 Oct. 2014
- T. U. Townsend and P. A. Hutchinson, "Soiling Analysis at PVUSA," in Proceedings of ASES-2000, Madison, WI, 2000.
- Wagner, A. Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions; University of Applied Sciences Dortmund, 2000.
- Zorrilla-Casanova, J., M. Piliouguine, J. Carretero, P. Bernaola, P. Carpena, L. Mora-López, and M. Sidrach-de-Cardona, "Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules," in Proceedings of the World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Sweden, 2011.
- Zorrilla-Casanova, J., Piliouguine, M., Carretero, J., Bernaola-Galván, P., Carpena, P., Mora-López, L. and Sidrach-de-Cardona, M. (2013), Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. Prog. Photovolt: Res. Appl., 21: 790–796.

## SOILING INFLUENCE ANALYSIS ON PV PERFORMANCE FOR DIFFERENT PV MODULE TECHNOLOGIES: LITERATURE REVIEW AND FIELD MEASUREMENTS

**Abstract.** *This study presents an analysis of soiling effects on different PV technologies operating in field conditions on the state of Bahia, Brazil. The project was conceived using five of the most globally consolidated PV technologies. In this study a literature review on soiling of PV was also carried out in order to determine the most common causes and consequences of soiling. In order to quantify the soiling effects, field measurements were performed, providing data for the analysis based on the most common metrics diffused on the literature. The analysis is undertaken separately for the five PV technologies to consider the soiling aspects that are more prominent on each PV technology. The results showed substantial soiling losses, and with considerable differences between the PV technologies, pointing out the need to properly evaluate on site soiling conditions prior to installation and during system operation.*

**Key words:** *Soiling in PV modules, PV module technology, Photovoltaic Energy.*