

1539 X- CARACTERIZAÇÃO DA SUJIDADE E QUANTIFICAÇÃO DE SEU ACÚMULO EM UNIDADES FOTOVOLTAICAS SITUADAS EM IRECÊ-BA

Édler Lins de Albuquerque⁽¹⁾

Engenheiro Químico e Especialista em Processos Químicos pela UFAL. Especialista em Engenharia Ambiental, Mestre e Doutor em Engenharia Química pela UNICAMP. É professor do Curso de Engenharia Química no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), onde tem desenvolvido pesquisas sobre gestão e controle da poluição atmosférica e química ambiental.

Mariana Simões Queiroz⁽¹⁾

Estudante do Curso de Engenharia Química do IFBA, Campus de Salvador.

Eduardo Filippo Oliveira Allatta⁽¹⁾

Engenheiro eletricitista pela Universidade Federal da Bahia, Mestre em Regulação da Indústria de Energia pela Universidade Salvador. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em sistemas de geração de energia elétrica, atuando nos temas: energia solar fotovoltaica, energia eólica e políticas de incentivos.

Reginey Azevedo Barbosa⁽²⁾

Engenheiro Eletricista com ênfase nas áreas de Eletrotécnica; e Automação e Controle pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA. Especialista em Automação Industrial pela Universidade Cândido Mendes. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia - UFBA. Atua como professor no Instituto Federal da Bahia, Campus de Irecê, nas áreas de engenharia elétrica e automação.

Rodrigo Estevam Coelho⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal da Paraíba (1985), Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (1996) e Doutor em Tecnologia Nuclear e Materiais pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (2001). É professor associado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia. Tem experiência nas áreas de Engenharia Mecânica, Materiais e Metalurgia.

Endereço⁽¹⁾: Rua Emídio dos Santos, s/n, Barbalho, Salvador-BA, CEP: 40301-015 - Brasil - Tel: (71) 2102-9421 - e-mails: edler@ifba.edu.br, marsiqueiroz@gmail.com, eduardo.allatta@gmail.com, roesco@ifba.edu.br.

Endereço⁽²⁾: Rodovia BA 148, km 04, n.º. 1800 – Bairro Vila Esperança, Irecê – BA, CEP: 44.900-000 - Brasil - Tel: (74) 3688-67003 - e-mail: engreginey@gmail.com.

RESUMO

O atual crescimento da participação da energia solar na matriz elétrica brasileira vem incentivando pesquisas que visem aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, tanto em sua fabricação, quanto na análise dos fatores que podem levar a perdas de eficiência na geração, como é o caso da sujidade depositada nos módulos, que diminui a incidência da radiação nos módulos e provoca efeitos outros que diferem para cada tecnologia fotovoltaica empregada. Nesta pesquisa, foi realizado um estudo experimental na Usina Fotovoltaica (UFV) existente no IFBA de Irecê-BA, onde se identificou, caracterizou e quantificou a sujidade sobre os módulos, através de análises de composição mineralógica, determinação do tamanho das partículas depositadas e foram quantificadas as massas acumuladas e as taxas de acúmulo da sujeira nas cinco tecnologias existentes na UFV da Irecê-BA (Silício amorfo de baixa tensão, Silício amorfo de alta tensão, Telureto de Cádmiio, CIGS e Silício policristalino). A composição mineralógica demonstrou maior presença de sílica (SiO₂) com 52,3% e alumina (Al₂O₃) com 19,6%, minerais com dureza suficiente para riscar superfícies vítreas como os painéis fotovoltaicos. O comportamento observado tanto para a massa acumulada e a taxa de acúmulo da sujidade nos módulos ao longo do tempo mostraram comportamentos semelhantes ao que vem sendo reportado na literatura científica, gerando em termos médios curvas que permitem prever as massas de sujidade acumulada ($MSA = 0,0614 t$; $R^2 = 0,93$) e as taxas de acúmulo ($TA = 170,64 t^{-0,286}$; $R^2 = 0,825$) ao longo do tempo.

PALAVRAS-CHAVE: Sujidade, energia fotovoltaica, análise mineralógica, taxas de acúmulo, Irecê.

INTRODUÇÃO

Com os avanços observados nas tecnologias fotovoltaicas para geração de energia, aumentou-se muito o interesse em desenvolvimentos que levem ao aumento da eficiência destes sistemas, os quais incluem o desenvolvimento de novos materiais e novos processos de produção das células fotovoltaicas (FV), conduzindo a contínuos avanços na eficiência e redução dos custos de fabricação das células. Outras muitas pesquisas e desenvolvimentos em sistemas solares tem se concentrado em estudar a disponibilidade da radiação, o projeto e o dimensionamento de sistemas e as estratégias operacionais mais eficientes, de forma a minimizar as perdas observadas na geração. Entre os fatores que mais impactam na produção solar fotovoltaica, pode-se destacar os particulados presentes na atmosfera local, assim como o clima típico da região onde os módulos estão instalados, além é claro, de algumas características dos próprios módulos fotovoltaicos como a rugosidade do vidro e o material utilizado na composição das células (DARWISH et al, 2015).

De particular interesse neste trabalho, a presença de particulados na atmosfera terrestre dá-se das mais diferentes formas, como por exemplo através de poluição, poeira, grãos de areia suspensos em tempestades e materiais orgânicos. A redução da radiação solar devido à absorção, reflexão e dispersão dada através de contaminantes na superfície do módulo FV é tratado na literatura como *soiling*, ou na tradução livre do inglês, sujidade (SINHA et al., [S.d.]). A deposição destes materiais sobre os módulos FV representa um obstáculo para que a radiação solar realize o efeito fotovoltaico, constituindo o terceiro fator que mais impacta na produção fotovoltaica, logo após irradiância e temperatura, conforme Gostein, Caron e Littmann (2014).

Embora o principal efeito do acúmulo de sujeira sobre o módulo FV seja a atenuação da irradiação incidente, esta não é a única causa que a sujeira implicará na redução de potência produzida pelo sistema FV. Diferentes concentrações de sujeira sobre o módulo FV, ou até mesmo uma distribuição desigual de concentração de sujeira sobre o módulo apresentam impactos diferentes no desempenho do sistema. Pesquisas evidenciaram que entre diferentes tecnologias FV o impacto da mesma concentração de sujeira também se dá de forma diferente (QASEM et al, 2012; JIANG, 2015). Hickel (2017) confirmou que o tamanho das partículas depositadas sobre os módulos desempenha um papel significativo na reflectância, dispersão e absorção de luz incidente nas células solares e, por sua vez, leva à degradação do desempenho fotovoltaico. Ou seja, são diversos os fatores relacionados à sujidade que podem influenciar no desempenho dos sistemas solares.

A influência do ambiente e, mais especificamente, a influência da deposição de sujidade sobre os módulos começou a atrair mais a atenção da comunidade científica recentemente, pois boa partes das estações fotovoltaicas de grande porte estão localizadas em áreas desérticas ou semiáridas, isto se deve principalmente ao grande potencial solar nestas localidades, bem como à disponibilidade de terra, sendo favoráveis para a localização de grandes instalações solares, mas que sofrem com a questão da sujidade (SAIDAN et al., 2016). Muitos estudos realizados nessas localizações mostram grandes perdas na eficiência de conversão devido a sujidade, da ordem de 3-6% em médias anuais, podendo chegar a valores de 20% ao mês ou até 30% em períodos menores (base diária) (ZORRILLA-CASANOVA et al, 2011). Adinoyi e Said (2013) encontraram, na Arábia Saudita, que o desempenho dos módulos fotovoltaico sofreu uma redução de 50% devido ao efeito da poeira, após uma exposição de seis meses ao ambiente natural.

O problema da sujidade não preocupa somente em regiões de clima seco. Experiências em locais com climas diferentes também reportam consideráveis perdas de geração devido a deposição de particulados. A perda diária variar de 4,4% em locais com maior incidência de chuva, até perdas de desempenho diárias superiores a 20% em locais de clima desértico com menor incidência de chuva (ZORRILLA-CASANOVA et al, 2011). Em uma pesquisa sobre a variação das perdas de desempenho devido a sujidade, realizada por Mekhilef, Saidur e Kamalisarvestani (2012), analisando-se as informações descritas, pode-se observar que painéis fotovoltaicos instalados em ambientes desérticos são mais afetados pela deposição de poeira, enquanto os painéis localizados em ambientes tropicais, apresentam uma redução de desempenho menor proporcionada pela limpeza natural fornecida pelo ambiente, por possuírem maior incidência de chuva. Além destes, Elminir et al. (2006) observaram que o posicionamento do painel na mesma direção de predominância do vento, agrava a questão da perda de desempenho, devido a sujidade sobre os módulos, pois aumenta a quantidade de particulados que é transportado até a superfície dos mesmos.

Kazmerski et al. (2016) e Javed et al. (2017a) destacam que a afinidade das partículas com as superfícies fotovoltaicas não é somente dependente das propriedades da superfície, mas também das propriedades das partículas depositadas, mostrando ser essencial conhecer as características físico-químicas das partículas depositadas. A taxa de acúmulo de sujeira na superfície dos módulos depende principalmente da concentração de partículas no ar, da distribuição de tamanho destas partículas e das condições meteorológicas da região (SAID E WALWIL, 2014). Adicionalmente, a taxa de acúmulo pode também variar com o tempo de exposição (MASTEKBAJEVA E KUMAR, 2000) e há indícios que o tamanho e a composição química do material depositado sofrem alterações com o tempo de exposição, podendo levar inclusive ao aumento da população de partículas mais finas (JAVED et al. 2017a). Em função de todas estas particularidades, as taxas de acúmulo de partículas em painéis fotovoltaicos apresentam os mais variados valores e mostram forte dependência de características de cada localidade (HEGAZY, 2001; KALDELLIS E KOKALA, 2010; ADINOYI E SAID, 2013; BOPANA, 2015; BOYLE ET AL., 2015; JAVED ET AL., 2017b).

Outro fator que impacta diretamente na perda de desempenho dos módulos fotovoltaicos é a tecnologia utilizada, podendo variar de 3,5% para a tecnologia CIGS até 11,3% para a tecnologia de silício-monocristalino, conforme Hickel et al. (2016). Essa variação na perda de desempenho é ocasionada pelas diferentes composições das tecnologias que compõem os módulos, como rugosidade do vidro, diferentes topologias elétricas (disposição e conexão elétrica das células, diodos de bypass, etc.), sendo um fator que deve ser considerado ao avaliar o impacto da sujeira. Costa et al. (2018) verificaram que painéis de Telureto de Cádmio (CdTe) e Silício Policristalino (p-Si) apresentam diferentes níveis de perdas para um mesmo índice de sujeira, sendo que os módulos de Silício amorfo (a-Si) e de CdTe perderam desempenho mais acentuadamente pela deposição de sujidades do que os de tecnologia de silício cristalino, devido a diferença entre a faixa de resposta espectral de ambos, resultado semelhante ao encontrado por Qasem et al. (2014). Costa et al. (2018) observaram ainda que a moldura metálica, presente tecnologia de silício policristalino, pode contribuir para maior acúmulo de sujeira na parte inferior do módulo, aumentando a não uniformidade da deposição, no entanto, em sua pesquisa os módulos de silício cristalino mostraram-se menos sensíveis à deposição não uniforme de poeira devido a presença dos diodos de by-pass.

Nesta pesquisa foram realizadas análises nos particulados (sujidade) que se depositam sobre os módulos de uma usina fotovoltaica (UFV) instalada no Campus do Instituto Federal da Bahia (IFBA) na cidade de Irecê-BA. Essa usina foi concebida num projeto de pesquisa anterior que objetivou avaliar a performance de cinco diferentes tipos de tecnologias de células fotovoltaicas no semiárido nordestino, as quais incluem: Silício amorfo de Baixa Tensão (a-Si BT), Silício amorfo de Alta Tensão (a-Si AT), Telureto de Cádmio – CdTe, liga de Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS) e Silício policristalino (p-Si). Os resultados apresentados nas seções seguintes compreendem uma das partes integrantes do “Projeto e Desenvolvimento de Tecnologia para Identificação de Sujidade e Limpeza Automática em Sistemas Fotovoltaicos” (PD-06961-0007/2017), projeto desenvolvido por equipes de pesquisadores e técnicos de diversas instituições (Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS), Instituto Federal da Bahia (IFBA) e empresa Nexsolar Soluções em Energia Solar LTDA (Nexsolar)) no período de dezembro/2017 até abril/2020.

No estudo realizado na UFV de Irecê, procurou-se identificar e caracterizar os particulados (sujidade) sobre os módulos, através de análises de composição e tamanho. A taxa de acúmulo da sujeira e sua massa acumulada nas cinco tecnologias existentes, também foi registrada para guiar nas decisões sobre o funcionamento e a operação de um dispositivo automático de limpeza para a UFV estudada, fruto final do projeto-mãe desenvolvido em parceria com as demais instituições.

MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa foi identificar e caracterizar os particulados acumulados sobre os módulos fotovoltaicos existentes na UFV existente no IFBA, Campus de Irecê-BA. Para chegar a este objetivo geral, realizou-se:

Parte 1 - Coleta de amostras e quantificação das taxas de acúmulo nos módulos fotovoltaicos;

Parte 2 - Análise da composição e do tamanho do material particulado acumulado ao longo do tempo;

Parte 3 - Modelagem massa de sujidade acumulada nos módulos em função do tempo.

PRIMEIRA ETAPA: COLETA DE AMOSTRAS E QUANTIFICAÇÃO DAS TAXAS DE ACÚMULO NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para a análise da composição, a coleta das amostras de solo e da sujeira depositada nos módulos ocorreu por meio do uso de espátulas e frascos coletores (potes de plástico), previamente esterilizados. Os solos foram coletados em profundidade média de três centímetros de forma a não serem capturadas partículas das camadas mais superficiais, aquelas com maior probabilidade de serem ressuspensas e se depositarem nos módulos fotovoltaicos. Ao todo foram coletadas 14 amostras de solo, sendo 9 dentro do IFBA e 5 em locais fora do IFBA Campus de Irecê.

Com o objetivo de determinar a massa de sujeira acumulada e suas taxas de acúmulo nos módulos, empregou-se filtros circulares de algodão isentos de partículas, placas Petri e balança analítica dotada de cinco casas decimais. A determinação das taxas de acúmulo ocorreu inicialmente com a limpeza da UFV, com o objetivo de eliminar qualquer sujeira nos módulos antes do experimento. Para a coleta do material particulado sobre os módulos, secou-se 3 filtros absorventes de algodão limpos em dessecador por 24h, pesou-se os 3 filtros e placas Petri de vidro de 6 cm de diâmetro em balança analítica dotada de 5 casas decimais, para registro da massa antes da amostragem. Este procedimento foi realizado no Laboratório 06 do Departamento de Química do IFBA, Campus de Salvador. Tendo registrados seus pesos, as amostras foram levadas para Irecê, onde a coleta foi efetuada.

A coleta propriamente dita foi realizada umedecendo-se os filtros de algodão, borrifando-se pequena quantidade de água e deslizando-os sobre um comprimento de 20 cm na superfície de três módulos das cinco mesas FV do sistema. Após a coleta, as amostras foram levadas a dessecador por 48h e pesadas. A massa depositada foi obtida descontando da massa da amostra final (discos de algodão + placa petri + sujeira) a massa antes da coleta. Os dados foram convertidos em taxas de acúmulo considerando o período de exposição e a área superficial ocupada pela sujeira.

Na figura 1, verificam-se a sujeira depositada nos módulos ao longo das semanas, as amostras e o procedimento realizado para a coleta. A Equação 1 ilustra o cálculo das taxas de acúmulo.

$$TA = (MA - MB)/(A \times t) \quad (1)$$

onde TA é a taxa de acúmulo em mg/(m² dia), MA a massa da amostra (mg), MB a massa do branco (mg), A a área de coleta nos módulos (m²) e t o tempo de exposição até a coleta (dia).

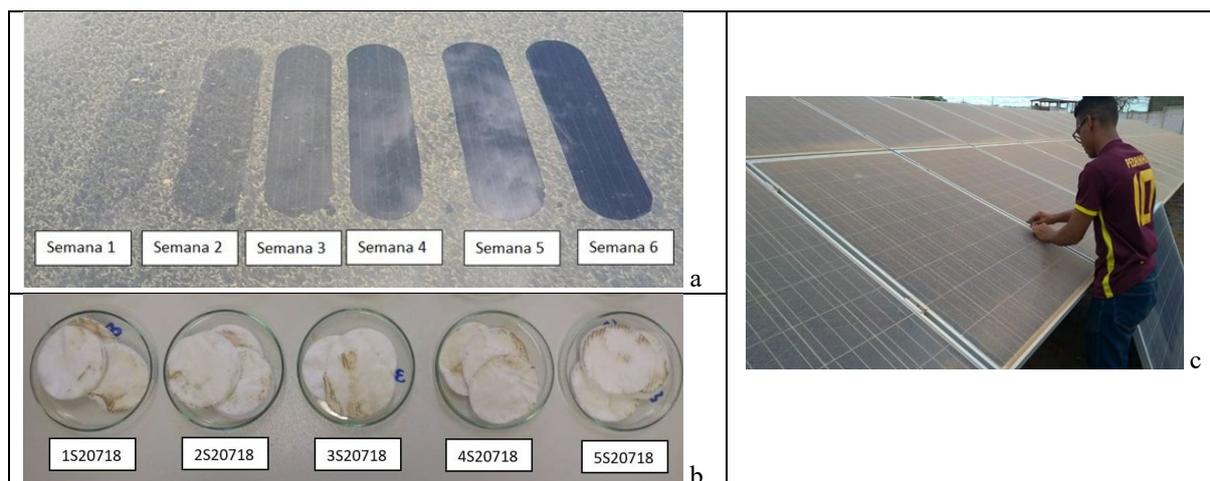


Figura 1. Coleta do material particulado nos módulos. Fonte: Autoria própria.

SEGUNDA ETAPA: ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO E DO TAMANHO DO MATERIAL PARTICULADO ACUMULADO AO LONGO DO TEMPO

A análise da composição dos particulados foi realizada através do Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). Uma pequena quantidade da amostra armazenada em potinhos de plástico esterilizados foi transferida para a matriz de compactação. Ácido esteárico foi adicionado a esta matriz e o material foi transferido a uma prensa hidráulica, sendo submetido a uma compressão de 2,5 toneladas. Após prensagem, o material foi levado para ser analisado no FRX e o método de EQUA Oxides foi selecionado como critério. O diagrama simplificado na figura 2, a seguir, revela como ocorre o processo.



Figura 2. Processo de compactação do material coletado para análise da composição.

A análise do tamanho das partículas foi efetuada em Espectrômetro por difração a laser, modelo MASTERSIZER 3000 (MS3000), sendo necessário 10g de amostra por análise. Neste dispositivo, as análises foram efetuadas considerando-se o índice de refração do óxido de silício por ser este o óxido presente em maior composição, de acordo com os resultados da análise mineralógica via FRX. Os resultados foram plotados na forma de histogramas e curvas de distribuição de frequência.

PARTE 3 - MODELAGEM MASSA DE SUJIDADE ACUMULADA NOS MÓDULOS EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Dispostos dos dados das taxas de acúmulo e massas acumuladas nos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo utilizou-se o Microsoft Excel para modelar as tendências encontradas. Os resultados obtidos foram comparados com resultados da literatura científica.

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

Avaliando as taxas de acúmulo e massa acumulada obtidas, observou-se que a presença de chuvas causou grande impacto por aumentar bastante a umidade das amostras. Para fins de cálculos finais, foram considerados somente as amostras/períodos secos e que apresentaram dados para todas as mesas/módulos simultaneamente. Os resultados obtidos podem ser vistos nas figuras 3 e 4, mostrando que se chegou a registrar cerca de dois meses (60 dias) de estiagem na UFV do IFBA em Irecê.

Para a massa acumulada, verificou-se um crescimento com o tempo numa tendência constante aparentemente até próximo aos 50 dias de estiagem, tendendo a uma saturação desta massa no final do período seco, esta última tendência poderia ter sido confirmada caso o período seco houvesse se prolongado por mais semanas. Comparando-se as diversas tecnologias existentes, observa-se que tecnologia CIGS apresentou aparentemente as maiores massas acumuladas, o que não há registro explícito na literatura até o momento que explique esta tendência.

Obteve-se valores elevados para as taxas, sobretudo nos primeiros dias quando se registrou valores tão elevados quanto 400 a 600 mg/(m² dia). Este fato foi notado logo após a primeira limpeza ou a incidência de chuvas, quando os painéis estavam limpos, gerando grandes gradientes de acúmulo de sujeira. Os valores medidos para as taxas de acúmulo nesta pesquisa são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em estudos similares encontrados na literatura, tais como Javed et al. (2017a), Boyle et al. (2016), Saidan et al. (2016), Boppana (2015), Jones et al. (2016), Hegazy (2001).

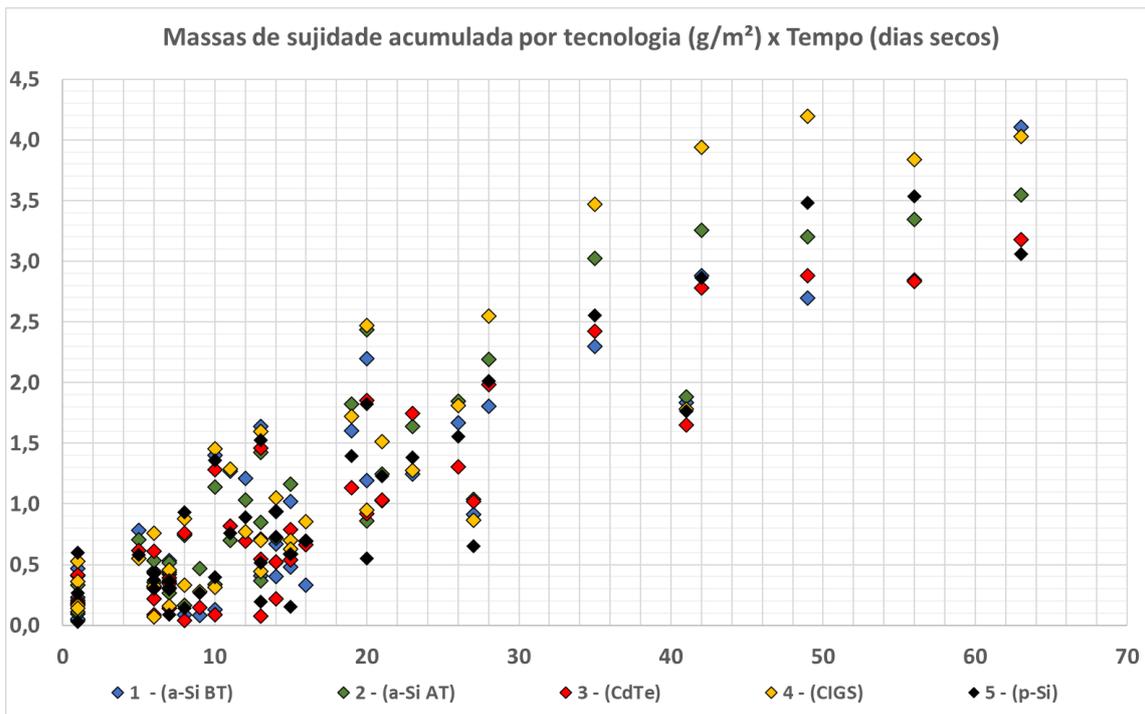


Figura 3. Massa acumulada (g/m^2) x tempo (dia).

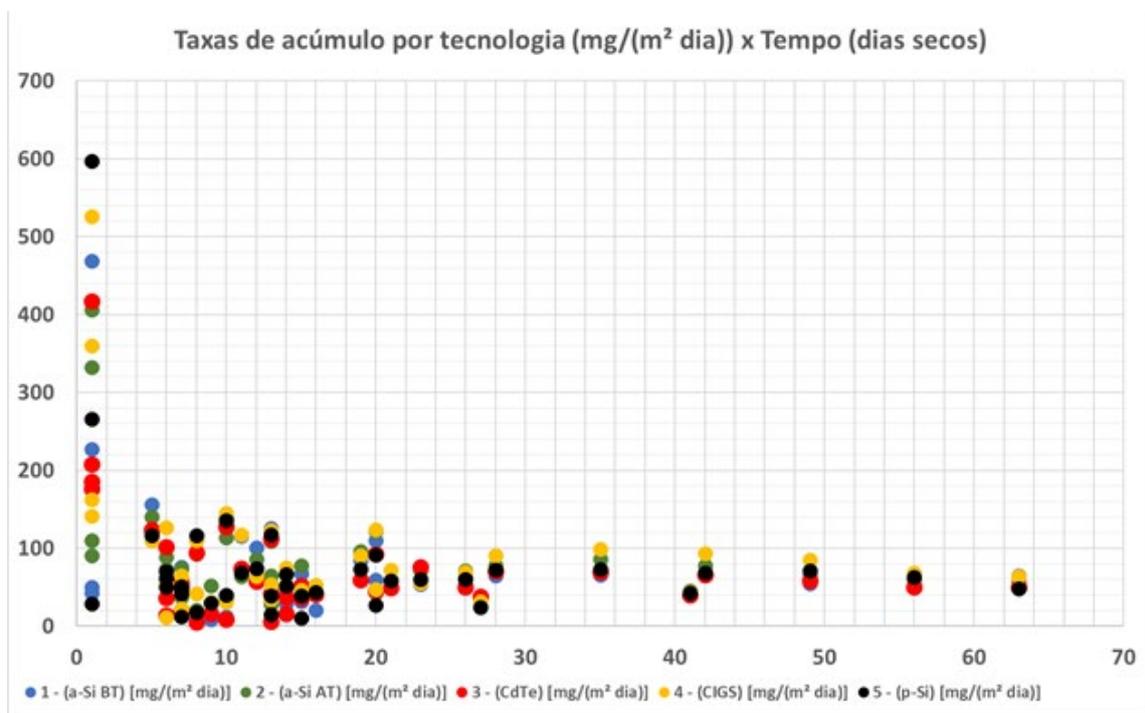


Figura 4. Taxas de acúmulo ($\text{mg}/(\text{m}^2 \text{ dia})$) x tempo (dia).

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Nas Tabelas 1 e 2 podem ser visualizados os resultados médios obtidos para a análise da composição mineralógica efetuada.

Tabela 1: Composição média da sujidade depositada nos módulos.

Identificação	1 (a-Si BT)		2 (a-Si AT)		3 (CdTe)		4 (CIGS)		5 (p-Si)		Média global	Desvio padrão
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão		
SiO ₂ (%)	52,41	0,69	52,46	0,18	53,18	2,36	51,85	0,66	52,41	0,79	52,46	1,20
Al ₂ O ₃ (%)	19,41	0,21	19,73	0,15	19,51	0,52	19,69	0,87	19,77	0,54	19,63	0,51
CaO (%)	14,35	1,72	14,13	0,86	13,91	2,54	14,24	1,88	14,43	1,15	14,21	1,57
Fe ₂ O ₃ (%)	7,44	0,46	7,30	0,12	7,53	0,48	7,54	0,37	7,55	0,38	7,48	0,35
MgO (%)	2,53	0,06	2,57	0,06	2,60	0,08	2,50	0,14	2,25	0,25	2,48	0,19
K ₂ O (%)	1,17	0,08	1,19	0,03	1,15	0,08	1,23	0,08	1,19	0,04	1,19	0,06
TiO ₂ (%)	1,07	0,02	1,05	0,02	1,08	0,04	1,10	0,04	1,08	0,03	1,08	0,03
Na ₂ O (%)	0,80	0,00	0,70	0,00	0,40	0,00	0,60	0,14	ND	ND	0,62	0,16
SO ₃ (%)	0,44	0,36	0,46	0,34	0,23	0,05	0,57	0,39	0,46	0,27	0,43	0,29
P ₂ O ₅ (%)	0,33	0,13	0,30	0,05	0,27	0,03	0,34	0,12	0,26	0,01	0,30	0,08
Cl (%)	0,33	0,32	0,24	0,26	0,12	0,08	0,09	0,26	0,27	0,21	0,26	0,22
MnO (%)	0,10	0,01	0,10	0,00	0,11	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01
ZrO ₂ (%)	0,08	0,00	0,08	0,01	0,07	0,02	0,07	0,02	0,07	0,01	0,07	0,01
ZnO (%)	ND	ND	ND	ND	0,05	0,00	ND	ND	0,08	0,00	0,07	0,02

Na Tabela 1, estão os resultados para o particulado depositado nos módulos FV (mesas). Comparando-se é possível perceber que os minerais mais presentes foram o SiO₂ (média ± desvio padrão = 52,5 ± 1,2%), o Al₂O₃ (19,63 ± 0,51%), o CaO (14,2 ± 1,6%) e o Fe₂O₃ (7,48 ± 0,35%). Dos resultados expostos na Tabela 1, pode-se perceber ainda a presença de outros minerais em composições menores e uma certa manutenção nas composições destes minerais em todas as amostras coletadas. Destacam-se os menores teores de pentóxido de fósforo, trióxido de enxofre, óxido de potássio, dióxido de titânio, óxido de manganês, cloretos e óxido de zircônio (IV).

Na Tabela 2 estão os resultados obtidos para a análise dos solos, separados em solos dentro e fora do IFBA em Irecê. Os minerais presentes em maiores concentrações foram, respectivamente, o SiO₂ (dentro: 51,9 ± 10,7% e fora: 59,0 ± 3,6%), o Al₂O₃ (dentro: 19,5 ± 4,5% e fora: 23,0 ± 1,8%), o CaO (dentro: 15,2 ± 15,4% e fora: 4,1 ± 3,3%) e o Fe₂O₃ (dentro: 8,1 ± 1,1% e fora: 9,2 ± 0,4%), boa parte destes materiais apresenta dureza suficiente para riscar os módulos fotovoltaicos.

Tabela 2: Composição média dos solos no IFBA / Campus de Irecê.

Identificação	Geral Solos			
	Dentro (9 amostras)		Fora (5 amostras)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
SiO ₂ (%)	51,9	10,7	59,0	3,6
Al ₂ O ₃ (%)	19,5	4,5	23,0	1,8
CaO (%)	15,2	15,4	4,1	3,3
Fe ₂ O ₃ (%)	8,1	1,1	9,2	0,38
MgO (%)	2,3	1,3	1,6	0,15
K ₂ O (%)	1,17	0,14	1,10	0,13
TiO ₂ (%)	1,07	0,10	1,15	0,058
P ₂ O ₅ (%)	0,23	0,047	0,24	0,21
SO ₃ (%)	0,13	0,037	0,14	0,047
MnO (%)	0,081	0,0093	0,10	0,015
SrO (%)	0,060	-	ND	-
ZrO ₂ (%)	0,056	0,0055	0,070	0,0071
ZnO (%)	ND	-	ND	-
Na ₂ O (%)	ND	-	ND	-
Cl (%)	ND	-	ND	-

Em relação ao que foi observado sobre os módulos/mesas, vê-se que, em geral, as composições das partículas depositadas nestes aproximam-se bastante daquelas observadas no solo dentro do IFBA, porém algumas diferenças são observadas. Verificou-se que o trióxido de enxofre possui teores cerca de três vezes maiores nas mesas e o fato de não terem sido detectados os óxidos de sódio e de zinco, além do íon cloreto nas amostras de solo, assim como não foi detectado óxido de estrôncio nas mesas.

Os resultados para as composições da sujidade depositada nas mesas e do solo especialmente dentro do IFBA/Campus de Irecê, onde há uma predominância dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_3O_2 , sugerem que o material acumulado nas mesas deve ter origem na ressuspensão da poeira local. Como houve durante o monitoramento efetuado aumento no teor de CaO no solo e foi verificada a realização de obras civis (reformas nas instalações do IFBA e surgimento de um condomínio de casas em terreno próximo situado aos fundos do IFBA), é provável que o CaO tenha sido originário destas fontes. Especialmente dióxido de silício e óxido de alumínio, os mais abundantes, segundo a escala de dureza de Mohs apresentam durezas, respectivamente iguais a 7 e 9, portanto, estão entre as substâncias mais duras, riscando superfícies vítreas e podendo danificar os módulos FV existentes, o que deve implicar numa restrição para o uso de sistemas de limpeza que empregam escovas e podem através do atrito danificar os módulos.

A composição mineralógica também mostra a presença de óxidos metálicos, especialmente de metais dos grupos 1A, 2A e óxidos de metais de transição. A maioria destas substâncias é praticamente insolúvel em água, à exceção de óxidos de cálcio, e óxidos de elementos do grupo 1A, como é o caso do óxido de potássio e óxido de sódio. Assim sendo, acredita-se que, para os minerais encontrados nas amostras analisadas a água terá um efeito mais pronunciado como elemento de arraste do que propriamente como elemento solubilizante. Entretanto, cloro e óxido de sódio encontrados em algumas amostras podem ser indício da presença de NaCl , o qual poderá levar a ocorrência de cimentação nos módulos, o que já foi verificado em alguns deles. Este efeito tem sido reportado pela literatura (JAVED et al., 2017a; JAVED et al., 2017b) e deve ser uma preocupação para o uso de água no sistema de limpeza dos módulos.

Na tabela 3 estão mostrados os resultados obtidos para a análise de tamanho das partículas coletadas nas mesas e no solo a partir dos diâmetros obtidos em cada distribuição numérica. Maior variabilidade nos dados parece ser observada no particulado depositada nas mesas, especialmente a Mesa 1 (a-Si BT), o que pode ser decorrente da tecnologia existente em cada placa e/ou de sua disposição espacial em relação ao vento e presença de obstáculos na UFV. Observando-se o valor $\text{Dn}(90)$ (diâmetro correspondente ao percentil 90), que nas amostras 90% das partículas possuem diâmetro menor que $1,60 \mu\text{m}$, enquanto nos solos este valor foi de $6,54 \mu\text{m}$, mostrando-se que estão depositadas partículas predominantemente finas nas mesas e partículas maiores no solo.

Tabela 3: Composição média dos solos no IFBA / Campus de Irecê.

Amostras	Diâmetros (μm)				
	D[3;2]	D[4;3]	Dn(10)	Dn(50)	Dn(90)
Mesa 1 (a-Si BT)	9,1	24,7	0,23	0,29	0,60
Mesa 2 (a-Si AT)	11,9	70,7	0,38	0,50	1,27
Mesa 3 (CdTe)	8,0	15,0	0,44	0,64	1,60
Mesa 4 (CIGS)	11,8	111	0,33	0,43	1,02
Mesa 5 (p-Si)	9,0	19,6	0,29	0,38	0,94
Solo a 20m	61,5	220	2,01	2,86	6,54
Solo a 30m	63,6	227	1,75	2,36	5,50
Solo a 60m	64,9	229	1,75	2,37	5,45

Nas figuras 5a) a 5e) vê-se a comparação entre os tamanhos dos particulados encontrados nas mesas, expostos na forma de distribuição numéricas. Pode-se notar que as distribuições de tamanho encontradas para as mesas são similares, existindo, como esperado, uma porcentagem maior de partículas com tamanhos menores, geralmente variando de 0,2 a 0,5 μm de tamanho, chegando a valores máximos geralmente em torno de 4 μm . Observa-se que o perfil de distribuição da mesa 3 (CdTe) difere relativamente dos demais por não apresentar praticamente partículas com tamanhos de 0,2 a 0,4 μm e por possuir maiores porcentagens em diâmetros maiores, de 0,5 a 1,5 μm .

a)

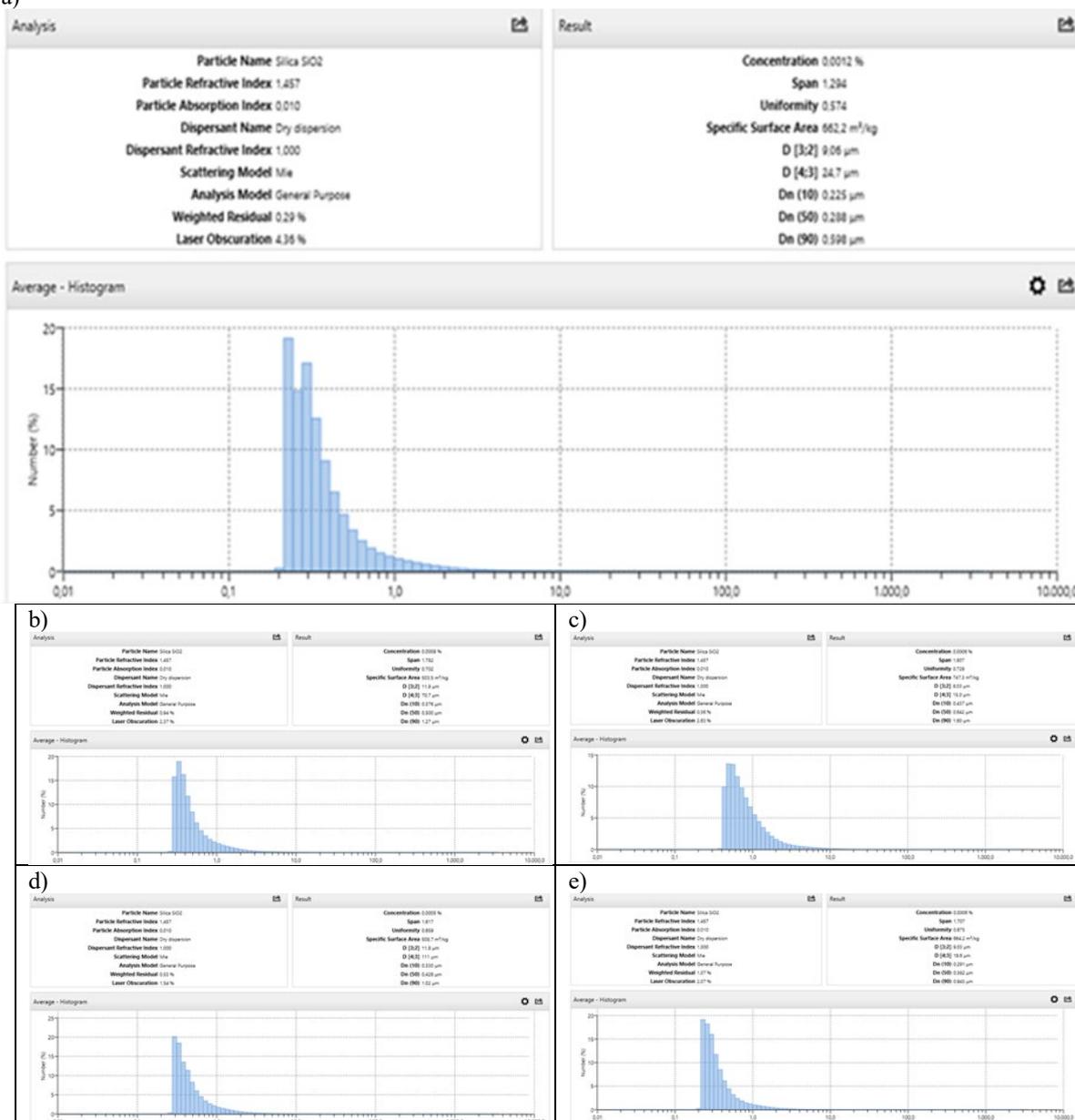


Figura 5. Distribuições numéricas de tamanho: a) mesa 1 (a-Si BT), b) mesa 2 (a-Si AT), mesa 3 (CdTe), mesa 4 (CIGS) e mesa 5 (p-Si).

Nas figuras 6a a 6c são mostrados os resultados obtidos para as amostras de solo a distâncias diferentes da UFV de Irecê (20, 30 e 60 m). Nota-se que as distribuições de tamanho foram similares entre os solos, mostrando que na região próxima há homogeneidade no tamanho das partículas de solo. Como observado, as partículas apresentaram tamanhos geralmente compreendidos entre 1,5 e 10 μm , demonstrando que, na localidade estudada, as partículas da crosta terrestre são maiores (cerca de sete a dez vezes) que as depositadas nos módulos FV.

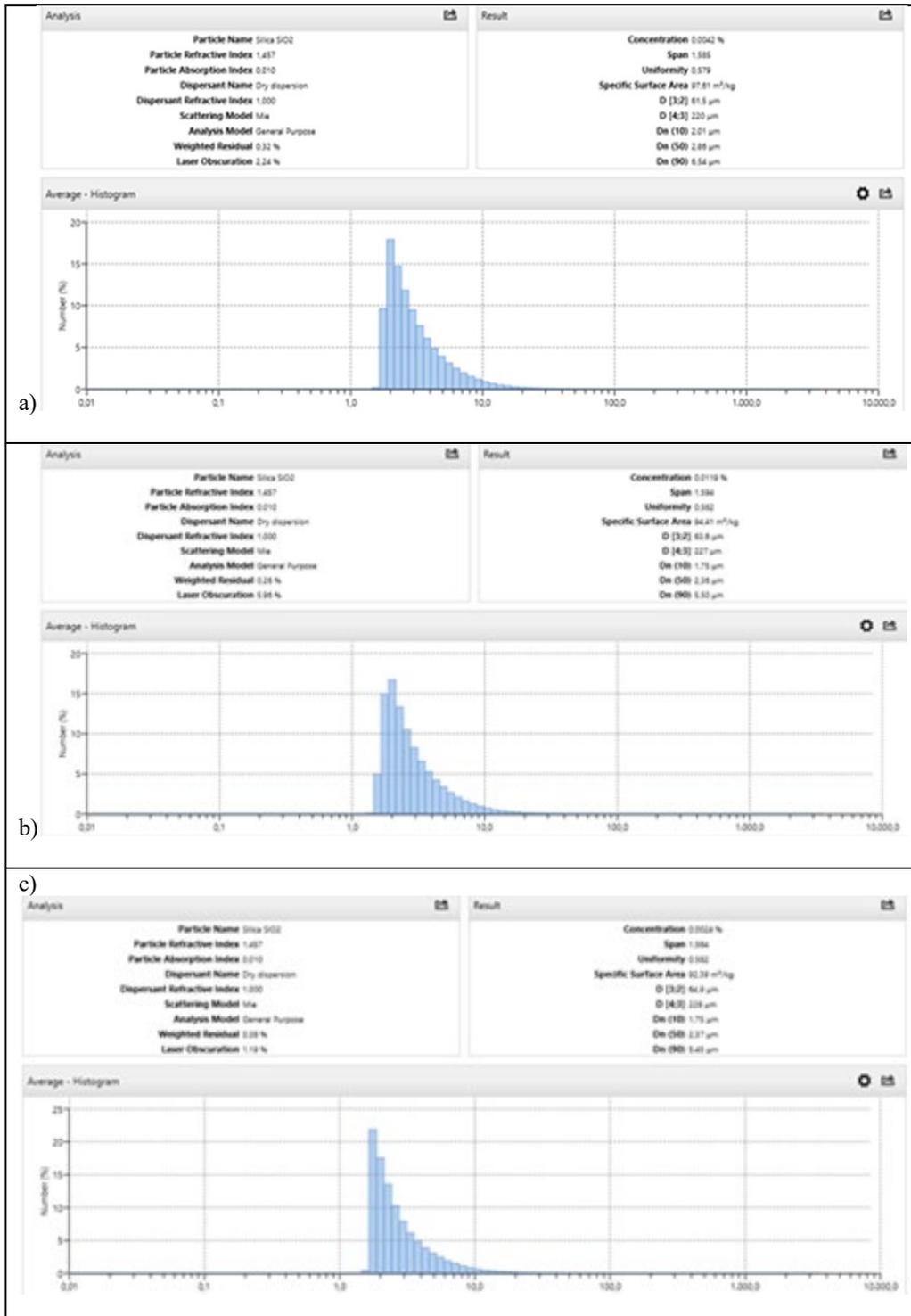


Figura 6. Distribuições numéricas de tamanho: Distribuições numéricas de tamanho da sujidade nos solos a a) 20 m, b) 30 m e c) 60 m da UFV de Irecê.

RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

Na figura 6, observa-se a variação da massa acumulada em todos os módulos e as massas médias acumuladas em função do tempo. Nota-se que em todos os casos os dados ajustam-se bem a um modelo linear com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,91 em todos os casos, indicando que a massa média de sujidade acumulada nos módulos seguir uma tendência média descrita pela equação (2):

$$MSA = 0,0614 t \quad (2)$$

onde MSA é a massa média de sujidade acumulada nos módulos em (g/m^2) e t é o tempo de exposição (dia).

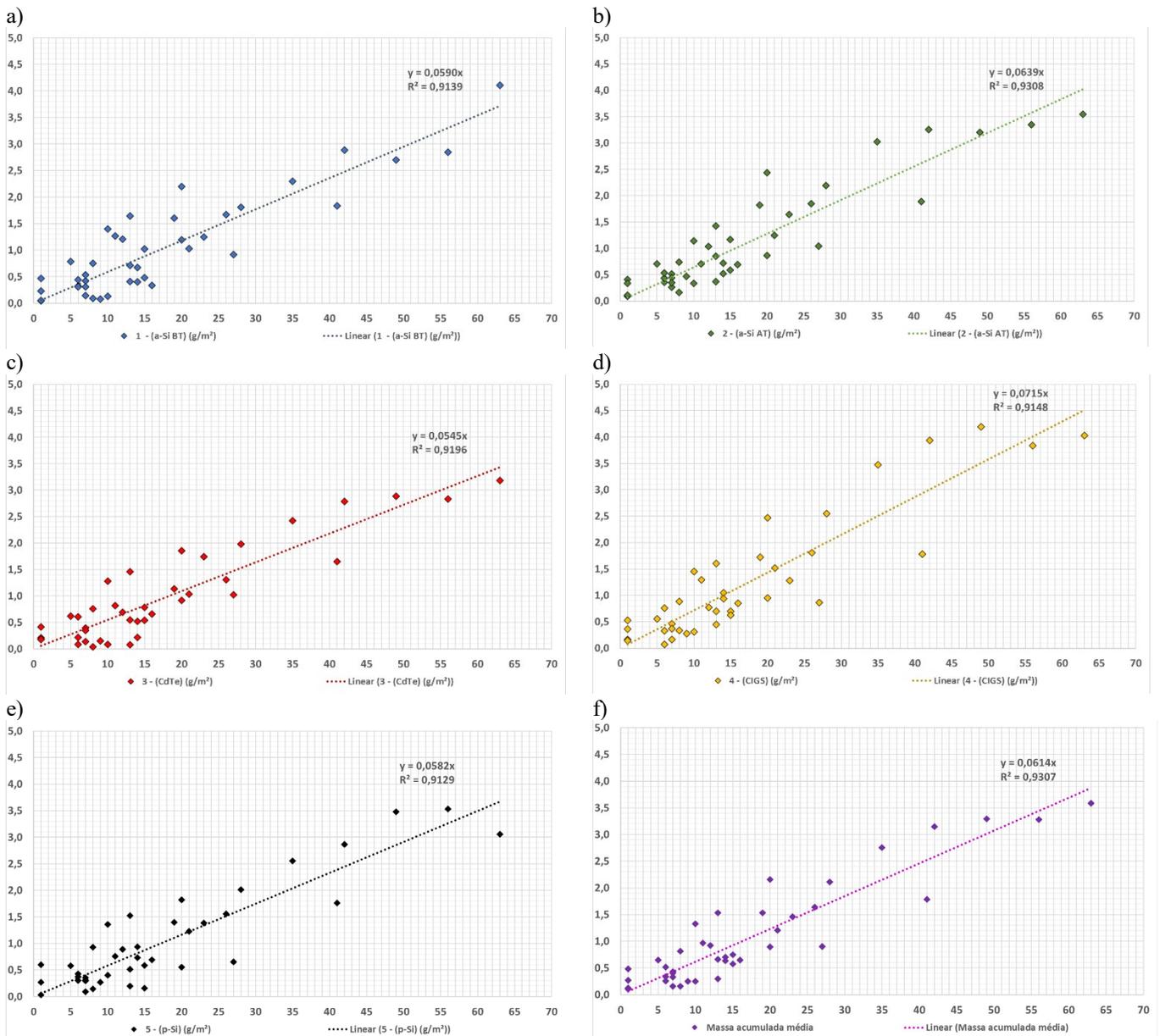


Figura 6. Modelos previstos para massa de sujidade acumulada (g/m^2) x tempo (dia): a) 1-(a-Si BT), b) 2-(a-Si AT), c) 3-(CdTe), d) 4-(CIGS), e) 5-(p-Si) e f) média de todos os módulos.

Na figura 7, observa-se a variação da taxa de acúmulo de sujidade em todos os módulos e as taxas médias obtidas em função do tempo. Nota-se que em todos os casos os dados ajustam-se bem a um modelo do tipo lei de potência com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,82 na maioria dos casos, exceto para a tecnologia CIGS ($R^2 = 0,78$), indicando uma taxa média de acúmulo de sujidade seguindo uma curva dada pela equação (3):

$$TA = 170,64 t^{-0,286} \quad (3)$$

onde TA é a taxa de acúmulo em $mg/(m^2 \text{ dia})$ e t é o tempo de exposição (período seco) em dias.

Comparando-se as tendências obtidas nesta pesquisa com Javed et al. (2017a), verifica-se que estes autores previram, para períodos secos, variações do tipo lei de potência para a taxa de acúmulo e exponencial para a massa acumulada em função do tempo; que no caso de sua pesquisa chegou a períodos com 175 dias de estiagem. Nos modelos propostos pelos autores, tanto a massa acumulada quanto a taxa de acúmulo tendem à saturação após determinado período. Os resultados aqui expostos parecem seguir tendências semelhantes, embora não tenha sido possível verificar a saturação nas massas acumuladas, possivelmente pela menor duração da estiagem em Irecê no período. A massa acumulada seguiu uma variação linear bem estabelecida.

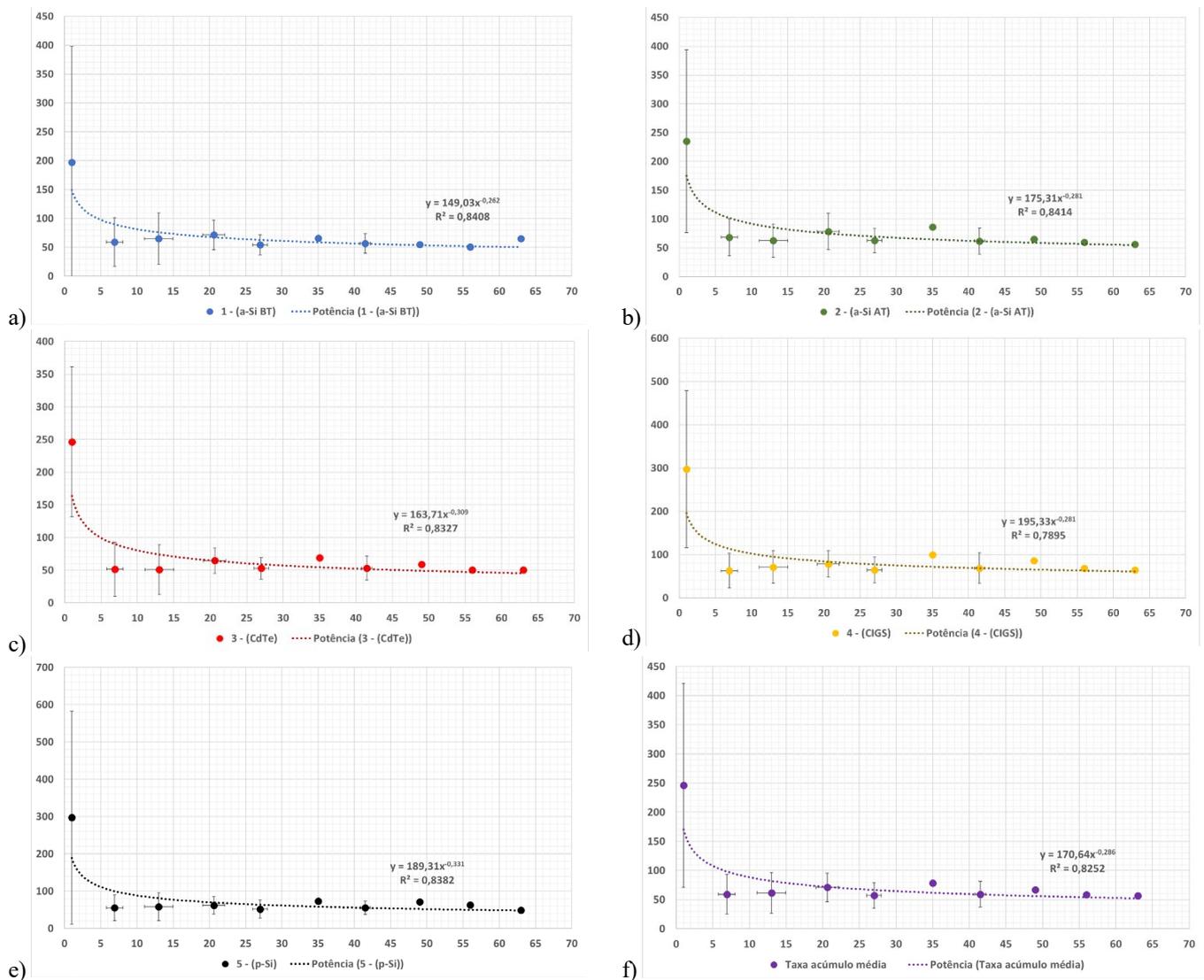


Figura 7. Modelos previstos para taxa de acúmulo média ($mg/(m^2 \text{ dia})$) x tempo (dia): a) 1-(a-Si BT), b) 2-(a-Si AT), c) 3-(CdTe), d) 4-(CIGS), e) 5-(p-Si) e f) média de todos os módulos. As barras de erro correspondem aos desvios-padrões obtidos para cada medida.

CONCLUSÕES

A análise mineralógica realizada na composição do solo e da sujidade presente nas UFV de Irecê evidencia um percentual maior dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 , característicos de elementos químicos abundantes na crosta terrestre, indicando a predominância de ressuspensão do solo, com possível influência da presença de construções que estão sendo realizadas dentro e fora das instalações do IFBA/Campus de Irecê. Especialmente dióxido de silício e óxido de alumínio, segundo a escala de dureza de Mohs, apresentam durezas, respectivamente iguais a 7 e 9, portanto, estão entre as substâncias mais duras, riscando superfícies vítreas e podendo danificar os módulos FV existentes.

A composição mineralógica também mostra a presença de óxidos metálicos, especialmente de metais dos grupos 1A, 2A e óxidos de metais de transição. A maioria destas substâncias é praticamente insolúvel em água, à exceção de óxidos de cálcio, e óxidos de elementos do grupo 1A, como é o caso do óxido de potássio e óxido de sódio. Assim sendo, acredita-se que, para os minerais encontrados nas amostras analisadas a água terá um efeito mais pronunciado como elemento de arraste do que propriamente como elemento solubilizante. Entretanto, cloro e óxido de sódio encontrados em algumas amostras podem ser indício da presença de NaCl , o qual poderá levar a ocorrência de cimentação nos módulos.

A análise da distribuição do tamanho das partículas de sujidade depositadas nos módulos revelou que estas partículas são menores que as dos solos, havendo predomínio de partículas finas nas mesas (geralmente entre 0,2 a 0,5 μm), sendo as maiores partículas com até cerca de 4 μm , menores que as encontradas nos solos.

Apesar da influência pronunciada das chuvas nos resultados, foi possível analisar o acúmulo de sujidade ao longo do tempo para períodos secos. Para o estudo realizado sobre a taxa de acúmulo e massas acumuladas, 58 períodos monitorados (41 deles válidos), os resultados apresentam valores e tendências bastante similares aos encontrados na literatura especializada, gerando curvas que representam o comportamento da massa de sujidade acumulada e a taxa de acúmulo ao longo do tempo de exposição.

Por tudo que foi citado, entende-se que os estudos aqui expostos sobre a composição mineralógica, características de tamanho e informações sobre a deposição dos particulados encontrados na UFV no IFBA de Irecê-BA propiciaram informações que embasaram a tomada de decisões técnicas sobre o tipo, o funcionamento e a operação do dispositivo de limpeza desenvolvido no projeto-mãe. Espera-se que este tipo de estudo possa inspirar a comunidade acadêmica, governos, empresas especializadas e demais interessados no tema na busca de soluções para os problemas hoje enfrentados na geração fotovoltaica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADINOYI, M.J., SAID, S.A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renew. Energy* 60, 633–636, 2013.
2. BOPANA, S., *Outdoor Soiling Loss Characterization and Statistical Risk Analysis of Photovoltaic Power Plants*. Arizona State University, 2015.
3. BOYLE, L., FLINCHPAUGH, H., HANNIGAN, M.P.. Natural soiling of photovoltaic cover plates and the impact on transmission. *Renew. Energy* 77, 166–173, 2015.
4. BOYLE, L.; FLINCHPAUGH, H.; HANNIGAN, M.. Assessment of PM dry deposition on solar energy harvesting systems: measurement–model comparison. *Aerosol Sci. Technol.* 50 (4), 380–391, 2016.
5. COSTA, S. C. S. et al. Avaliação Da Sujidade Em Módulos Fotovoltaicos em Minas Gerais, Brasil. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, n. 2015, 2018.
6. DARWISH, Z. A. et al. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp.735-744, 2015.
7. ELMINIR, H.K. et al. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy conversion and management*, 47(18-19), pp.3192-3203, 2006.
8. GOSTEIN, M.; CARON, J.R.; LITTMANN, B. Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants. In 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE, pp. 0885-0890, June, 2014.
9. HEGAZY, A. A.. Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors. *Renew. Energy* 22 (4), 525–540, 2001.

10. HICKEL, B. M. O impacto no desempenho de sistemas fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos fv – metodologia e avaliação através de curvas ixv em campo. 2017. 110 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
11. HICKEL, B.M. et al. Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos FV: revisão e medições de campo. In VI CBENS–VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, Junho, 2016.
12. JAVED, W. et al. Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar. *Solar Energy*, v. 142, n. December 2016, p. 123–135, 2017a.
13. JAVED, W. et al. Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables. *Solar Energy*, v. 157, p. 397–407, 2017b.
14. JIANG, Y.; LU, L. A Study of Dust Accumulating Process on Solar Photovoltaic Modules with Different Surface Temperatures. *Energy Procedia*, v. 75, p. 337–342, 2015.
15. JONES, R. K. et al. Optimized cleaning cost and schedule based on observed soiling conditions for photovoltaic plants in central Saudi Arabia. *IEEE J. Photovolt.* 6 (3), 730–738, 2016.
16. KALDELLIS, J. K., KOKALA, A.. Quantifying the decrease of the photovoltaic panels’ energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal. *Energy*, 35(12), 4862–4869, 2010.
17. KAZMERSKI, L.L., DINIZ, A.S.A., MAIA, C.B., VIANA, M.M., COSTA, S.C., BRITO, P.P., CAMPOS, C.D., NETO, L.V.M., DE MORAIS HANRIOT, S., DE OLIVEIRA CRUZ, L.R.. Fundamental studies of the adhesion of dust to PV module chemical and physical relationships at the microscale. *IEEE J. Photovolt.* 6 (3), 719–729, 2016.
18. MASTEKBAYEVA, G., KUMAR, S.. Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate. *Sol. Energy* 68 (2), 135–141, 2000.
19. MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; KAMALISARVESTANI, M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16 (5), pp. 2920–2925, 2012.
20. QASEM, H. et al. Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, v. 17, n. June 2012, p. 11–33, 2012.
21. QASEM, H., BETTS, T.R., MÜLLEJANS, H., ALBUSAIRI, H., GOTTSCHALG, R.. Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.* 22 (2), 218–226, 2014.
22. SAID, S.A.M., WALWIL, H.M.. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. *Sol. Energy* 107, 328–337, 2014.
23. SAIDAN, M. et al. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. *Renewable Energy*, p. 499–505. 499–505, 2016.
24. SINHA, P. et al. Environmental Variables Affecting Solar Photovoltaic Energy Generation in Morocco. [S.d.].
25. ZORRILLA-CASANOVA, J. et. al. Analysis of dust losses in photovoltaic modules. In *World Renewable Energy Congress-Sweden*, Linköping; Sweden, No. 057, pp. 2985–2992. Linköping University Electronic Press, November, 2011.