

ESTUDO SOBRE A PERDA DE DESEMPENHO CAUSADA PELO ACÚMULO DE SUJEIRA DEPOSITADO NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DA USINA DA UFABC - CAMPUS SANTO ANDRÉ - SP.

Celso Carlos Soares Spuhl – celso.spuhl@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC, Programa de Pós Graduação em Energia.

Patrícia Teixeira Leite Asano - patricia.leite@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas - CECS.

Ricardo da Silva Benedito - r.benedito@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas - CECS.

Resumo. O acúmulo de sujeira e outros contaminantes ambientais nos módulos fotovoltaicos, classificados como sujidade, resulta em diminuição da irradiância solar que alcança as junções semicondutoras do módulo e portanto, reduz a geração de energia elétrica. Neste contexto, torna-se relevante o estudo do impacto deste fator sobre o desempenho dos sistemas fotovoltaicos instalados em diferentes regiões, para que se possa determinar a necessidade de manutenção de limpeza periódica por meio de um cronograma que leve em conta o custo e benefício desta ação no produto final, que é a energia elétrica. Portanto, este trabalho de pesquisa buscou analisar os efeitos do acúmulo de sujeira sobre a superfície dos módulos no desempenho dos sistemas FV, em um empreendimento localizado no município de Santo André, São Paulo, determinando a perda de desempenho na geração de energia elétrica causada pela sujeira acumulada ao longo de um ano e dez meses de exposição natural, utilizando curvas IxV medidas em campo, em um método de comparação entre referências sujas e limpas. O resultado alcançado apontou uma perda em potência de 16,04% associado à sujidade.

Palavras-chave: Sujidade, poeira em módulos FV, energia solar FV

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Atlas Brasileiro da Energia Solar INPE (2017) o Brasil apresenta grande potencial para exploração do recurso solar na geração de energia. A partir da publicação da resolução normativa nº 482 de 2012 da ANEEL, atualizada pela resolução nº 687 de 2015, o país estabeleceu as condições gerais para o acesso da microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, a partir de fontes renováveis. Tal medida, em conjunto com os leilões para geração e comercialização de energia, promovidos pelo Ministério de Minas e Energia - MME, resultaram em significativa ampliação de sistemas fotovoltaicos instalados em usinas centralizadas e na geração distribuída por todo o país.

Para as próximas décadas o Plano Nacional de Energia 2050 - PNE-2050 prevê grande incremento de capacidade instalada, devido aos preços decrescentes verificados nos últimos anos para os componentes dos sistemas FV, à robustez tecnológica tendo em vista projetos com mais de 30 anos em funcionamento, o vasto potencial técnico existente e a não emissão de gases de efeito estufa durante a operação dos parques.

Embora haja um enorme potencial solar a ser explorado, aspectos locais como fatores climáticos, bioma, tipo de ocupação, atividades humanas predominantes, poluição etc. resultam em impactos específicos sobre os sistemas FV, afetando seu desempenho de geração e portanto, devem ser estudados.

Um destes impactos é causado pelo o acúmulo de sujeira e outros contaminantes ambientais nos módulos fotovoltaicos, classificado como sujidade, que resulta em diminuição da irradiância solar que alcança as junções semicondutoras do módulo e portanto, reduz a geração de energia. Sinha *et al.* (2014) definem sujidade como “A redução da radiação solar eficaz devido à absorção, reflexão e dispersão dada através de contaminantes na superfície do módulo FV”.

Este projeto de pesquisa analisará o efeito da sujeira acumulada por um período de um ano e dez meses no desempenho de módulos FV instalados na usina de 388,8 kWp do campus da Universidade Federal do ABC em Santo André - SP, além de caracterizar propriedades da sujeira encontrada e sua forma de distribuição sobre os módulos.

2. CONCEITOS DE SUJIDADE E POEIRA

Sarver, Al-Qaraghuli e Kazmerski (2013) destacam em seu trabalho que uma quantidade substancial de tempo e dinheiro foi investida para trazer o desempenho dos sistemas fotovoltaicos à atual posição de credibilidade e para garantir a confiabilidade do sistema e de seus componentes. No entanto, muito menos foi investido para enfrentar externalidades que podem ser obstáculos para implantação da tecnologia. Uma destas externalidades, muitas vezes não

considerada na implantação e operação dos sistemas FV, é o impacto da sedimentação de poeira ou partículas de sujeira na superfície dos módulos, que perturba a função pretendida na interface superfície/luz, podendo reduzir significativamente a saída de energia (eficiência) ou até comprometer completamente a operação do sistema.

O acúmulo de sujeira nos módulos de um sistema solar fotovoltaico instalado em campo é um processo natural influenciado por diversos fatores ambientais específicos do local e condições meteorológicas. A sujidade é o efeito da deposição de partículas durante um período de tempo em que não há limpeza externa presente.

Poeira é um termo geralmente aplicável a partículas sólidas minúsculas com diâmetros inferiores a 500 μm , que é aproximadamente 10 vezes o diâmetro de um fio de cabelo humano. A poeira pode conter pequenas quantidades de pólen, vegetação, fungos, bactérias, células humanas/animais, cabelo, e fibras têxteis e, mais comumente, minerais como areia, argila ou calcário erodido (BAGNOLD, 1965 apud SARVER, AL-QARAGHULI e KAZMERSKI, 2013).

Para Mani e Pilai (2010) a poeira ocorre na atmosfera a partir de variadas fontes, como poeira levantada pelo vento, movimento de pedestres e veículos, erupções vulcânicas e poluição.

O tamanho da partícula, os constituintes e a forma da poeira variam de região para região do mundo (SARVER, AL-QARAGHULI e KAZMERSKI, 2013).

A sujeira inclui não apenas o acúmulo de poeira, mas também contaminação da superfície por produtos vegetais, fuligem, sal, excrementos de pássaros e crescimento de espécies orgânicas, afetando adversamente o desempenho óptico (SAYYAH, HORENSTEIN e MAZUMDER, 2014).

O impacto da sujidade no desempenho de geração dos módulos FV pode ser bastante significativo, sobretudo em áreas sujeitas a longos períodos de estiagem ou poluídas com alta concentração de partículas. A taxa de assentamento e acumulação da sujeira dependerá de fatores como as características locais (tipo de vegetação, atividades humanas predominantes), ângulo de inclinação e orientação do sistema FV, temperatura ambiente e umidade, fatores climáticos (chuvas e ventos), propriedades da poeira e características da superfície dos módulos FV (MANI e PILAI, 2010). Assim, faz-se necessário mensurar o impacto deste fator sujidade na geração para os diferentes locais de instalação de sistemas FV.

3. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DO ESTUDO DE CAMPO

Este projeto de pesquisa analisou o efeito do acúmulo de sujeira no desempenho de módulos FV instalados na usina de 388,8 kWp do campus da Universidade Federal do ABC em Santo André, mais precisamente na Torre 1 do Bloco A, tendo as seguintes coordenadas geográficas UTM: Zona: 23 K, Longitude: 344114m E e Latitude: 7384287m S. Trata-se de região de planalto com clima subtropical úmido, segundo classificação climática de Köppen-Geiger (1928), considerada como Zona de Reestruturação Urbana no plano diretor do município (Santo André, 2012), que se caracteriza pela predominância de uso misto (residencial e industrial). O imóvel está localizado às margens do rio Tamandateí, com indústrias de grande porte e avenidas com alto tráfego de veículos em suas proximidades, distante em linha reta, aproximadamente 4,3 km do Pólo Petroquímico de Capuava, que concentra grande refinaria de petróleo e indústrias químicas que processam seus derivados.

A Fig. 1 apresenta foto aérea da região do empreendimento grifado, onde verifica-se a presença de estabelecimentos comerciais e industriais ao longo da avenida na face inferior do imóvel (Av. dos Estados) e a alta concentração residencial no entorno.



Figura 1- Foto aérea UFABC. Fonte: Google Earth (2021a, grifo do autor).

Os sistemas FV estudados foram instalados com recursos provenientes de chamada pública da ANEEL, de Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento P&D, que visou a seleção de

projetos pilotos e demonstrativos em Instituições Públicas de Educação Superior, os quais servirão de referência para a formulação e a implementação de ações conjuntas e coordenadas em vários órgãos e instituições públicas do país (ANEEL,2016). A Universidade Federal do ABC foi contemplada em 2017, em projeto desenvolvido por docentes de seu curso de Engenharia de Energia, que previu a aquisição, instalação e comissionamento do sistema de minigeração FV alvo deste estudo.

3.1 Características do Sistema Fotovoltaico Estudado

A usina estudada tem capacidade de geração de 388,8 kWp e está implantada no campus da Universidade Federal do ABC - UFABC em Santo André - SP. O parque é formado por 4 subsistemas conectados à rede e instalados nos telhados das torres 1, 2 e 3 do prédio denominado Bloco A e no telhado do prédio denominado Bloco B. Os subsistemas das torres 1, 2 e 3, por sua vez, são divididos em dois arranjos FV (águas norte e sul dos telhados), cada um com inversor próprio. O sistema FV selecionado para o trabalho de campo nesta pesquisa é o arranjo do telhado água sul da Torre 1 do Bl. A (apontado na Fig. 2) e será tratado como sistema A-T1S.



Figura 2- Foto aérea da usina FV da UFABC. Fonte: Google Earth (2021b).

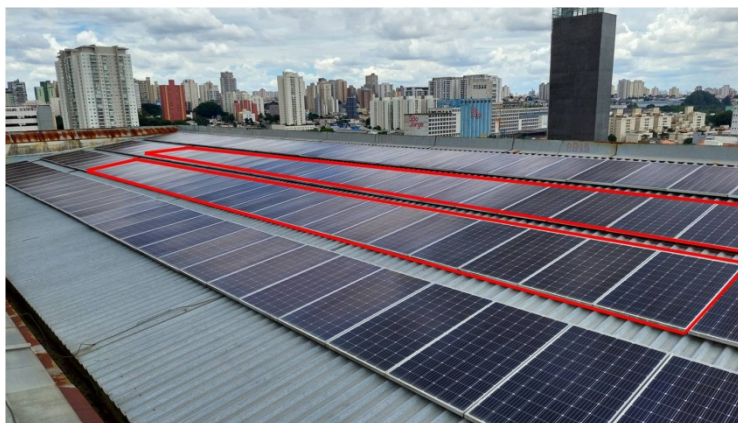
O sistema A-T1S possui capacidade de 64,8 kWp, é composto por 9 strings paralelas, onde cada string é formada pela associação de 20 módulos FV em série. Os módulos são de silício monocristalino (m-Si), de 360 Wp da fabricante alemã Axitec, modelo AC-360M/156-72S.

O módulo é coberto frontalmente por um painel de vidro transparente de 3,2mm, resistente e anti-reflexivo.

O arranjo está instalado a aproximadamente 40 metros do nível do solo, sobre o telhado da Torre 1 do Bloco A, com orientação Sudeste, azimute + 152° e com ângulo de inclinação aproximado de 8,5°, acompanhando a inclinação das telhas de aço galvanizado.

O inversor instalado é da fabricante Ingeteam, modelo INGECON SUN 55TL 220, potência nominal de 55 kW e saída CA em 220V, possui string box com os dispositivos de proteção integrado e eficiência máxima de 99,1%.

O sistema injeta a energia na rede da universidade a partir de um painel de distribuição elétrica do sistema de ar-condicionado. A Fig. 3 apresenta o sistema A-T1S, estando grifadas as strings que foram monitoradas no trabalho de campo.



— Strings selecionadas para o experimento

Figura 3- Sistema AT1-S. Fonte: Autoria própria

4. MÉTODOS PARA COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

4.1 Distribuição da sujidade sobre os módulos

Por meio de inspeção visual e registros fotográficos dos módulos sujos, foi caracterizada a forma de distribuição da sujidade sobre estes, identificando se uniforme ou não uniforme. Tal condição influencia diretamente no impacto causado pela sujidade no desempenho do sistema FV.

4.2 Caracterização da sujeira

Foi realizada coleta de amostra da sujeira depositada sobre os módulos FV, para definição de suas características físicas, tal como tamanho e forma, utilizando-se do recurso de ampliação por microscópio eletrônico de varredura (MEV), pertencente a Central Experimental Multiusuário da UFABC.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é um tipo de microscopia em que um feixe de elétrons focalizado varre a superfície da amostra, interagindo com a matéria, gerando diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e composição química do material. Nesta microscopia os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. Conforme o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição (MALISKA, 1998).

O microscópio utilizado para caracterização da amostra é da fabricante JEOL, modelo JSM-6010LA, (Fig. 4). Este equipamento é um microscópio eletrônico de varredura compacto SEM (do inglês Scanning Electron Microscopy), operado em baixo ou alto vácuo para geração de imagens de alta resolução e alta qualidade de nano e micro-estruturas. É possível obter aumentos da ordem de 300 mil vezes e resolução de 100 nanômetros. Possui um espectrômetro de Raios-X dispersivo em energia (EDS) que permite a obtenção da composição química elementar das amostras em estudo.

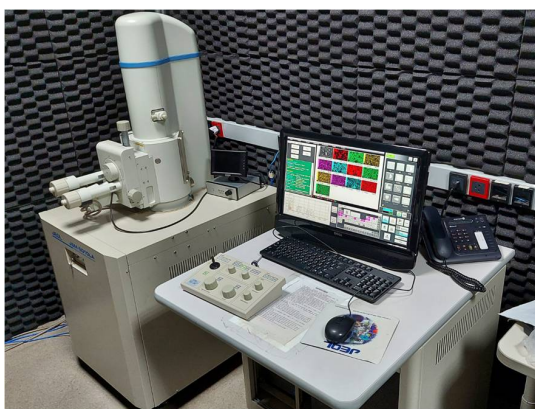


Figura 4 - Foto do microscópio eletrônico de varredura JSM-6010LA, JEOL Fonte: autoria própria.

4.3 Análise da curva IxV para sujeira acumulada.

Para determinar o impacto da sujidade no desempenho de geração do sistema FV estudado, foi realizada análise comparativa dos parâmetros elétricos de geração de módulos sujos e limpos. O estudo consistiu em confrontar o desempenho de duas strings do sistema A-T1S antes e após a realização da limpeza.

Foi avaliado o impacto da sujeira acumulada desde a fixação dos módulos sobre os telhados do prédio em novembro de 2019, um período de um ano e dez meses, no qual o sistema passou apenas por limpeza natural pela precipitação de chuvas e ventos. Para tanto, por meio de um equipamento traçador de curvas IxV foram obtidas as curvas características de ambas as strings de referência na condição "suja" (com a sujeira que foi acumulada durante o período). Na sequência as strings passaram pelo processo de limpeza, realizando nova coleta das curvas na condição "limpa" para comparação.

O equipamento utilizado para as medições foi o traçador de curva IxV, modelo PVPM1100C. O equipamento conta com um sensor combinado Phox / Pt1000 composto por uma célula de referência, que deve ser posicionada próxima e coplanar ao sistema FV estudado, para coletar os dados de irradiância solar no instante das medições, e um sensor de temperatura na parte de trás da célula, para o qual se espera que a temperatura da célula de referência seja próxima ou igual a de operação dos módulos FV analisados.

Por meio de quatro cabos e para uma carga capacitiva variável o equipamento obtém os valores instantâneos de corrente e tensão, e então a curva característica do gerador FV é traçada.

Para possibilitar a comparação das curvas das referências limpa e suja, em iguais condições de operação (irradiância e temperatura), o software que acompanha o equipamento, por meio da aplicação de modelos matemáticos,

possibilita a correção dos valores medidos para valores em STC (Irradiância = 1000 W/m²; temperatura da junção da célula solar fotovoltaica = 25 °C; conteúdo espectral da irradiância equivalente a AM 1,5).

De acordo com o manual, 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 adotadas, destacando-se:

- Utilizar o mesmo traçador IxV e mesma célula de referência em todas as medições;
- Quanto maior a irradiância do módulo, mais exato será o resultado. Portanto realizar as leituras em momentos que garantam uma irradiância superior a 600 W / m², seguindo a orientação do manual.
- Com o sensor Phox / Pt1000 já posicionado e exposto ao sol, aguardar pelo menos 15 minutos, para que a temperatura da célula de referência reflita a temperatura de operação dos módulos. Para maior precisão as temperaturas lidas no equipamento foram confirmadas com termômetro de contato externo.

Ressalta-se que as medições com os módulos sujos e limpos foram realizadas com o mesmo equipamento, nas mesmas condições e sofreram as mesmas correções. O que fez com que as incertezas no resultado da avaliação do estudo comparativo, proveniente das medições em si, fossem reduzidas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Modo de distribuição da sujeira sobre os módulos

A classificação da distribuição da sujeira depositada sobre a superfície dos módulos do sistema FV em estudo, se uniforme ou não uniforme, foi realizada via inspeção visual e registro fotográfico dos módulos sujos, com a sujeira depositada acumulada desde as suas fixações sobre os telhados (1 ano e 10 meses). Para determinar em quais células há uma maior concentração de sujeira, o módulo de 72 células estudado, foi tratado como uma matriz de 12 linhas e 6 colunas - $M_{12,6}$, sendo que cada célula FV correspondeu a um elemento $a_{i,j}$ desta matriz.

As Figs. 5 (a), (b) e (c) apresentam fotos de módulos da string com a sujeira acumulada. A partir delas, verifica-se uma distribuição bem uniforme da sujeira sobre as superfícies, com uma leve maior concentração nas células mais próximas a borda inferior dos módulos (fileira $a_{12,1}$ à $a_{12,6}$), esta situação se repete para todos os módulos que compõem o sistema AT1-S.

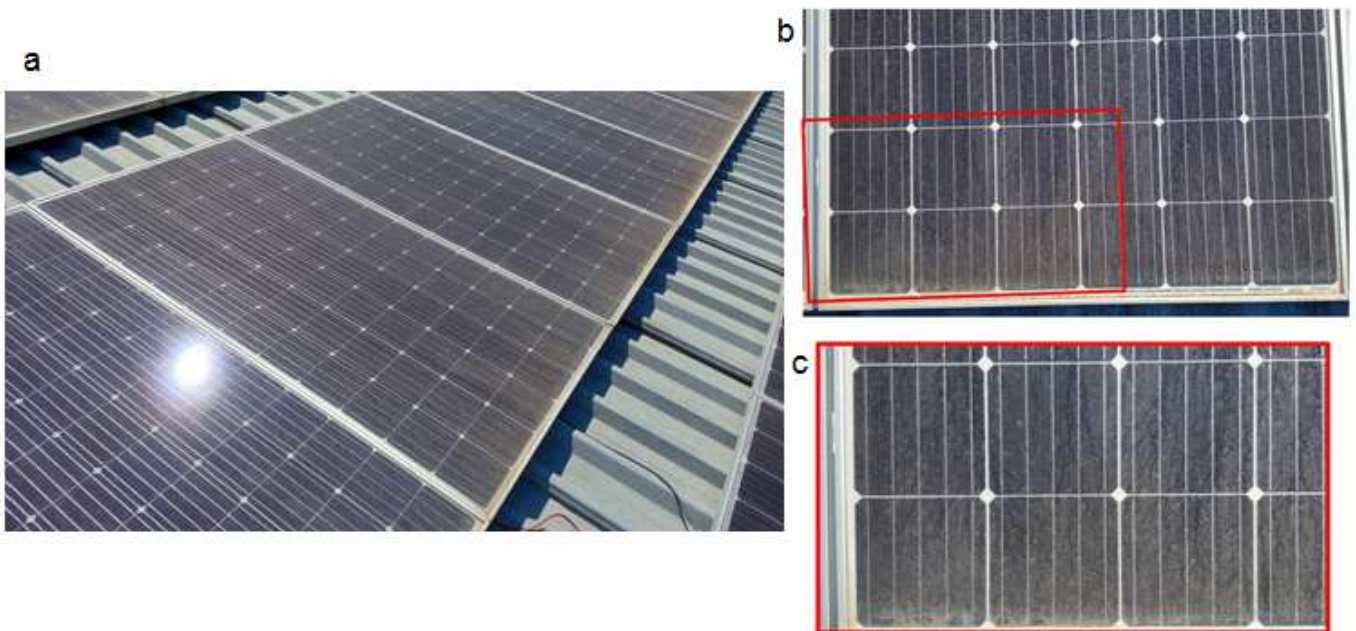


Figura 5 (a), (b) e (c) - Fotos da distribuição da sujeira acumulada ao longo de um ano e dez meses sobre os módulos.

Fonte: autoria própria.

Tal situação era esperada devido à inclinação que os módulos estão fixados (8,5°), em que, o efeito da gravidade acrescido dos fenômenos naturais de chuvas e ventos, faz com que parte da sujeira depositada sobre a superfície se desloque e acumule próximo à borda inferior, conforme também observado no trabalho de Gostein *et al.* (2015).

Esta maior concentração de sujeira não chega a causar um sombreamento severo nestas células, que por sua vez implicaria na atuação dos diodos de desvio.

5.2 Caracterização da amostra de sujeira

5.2.1 Coleta das amostras

Para a caracterização física da sujeira predominantemente verificada sobre os módulos FV do sistema em estudo, foi realizada no dia 29 de julho de 2021 coleta de amostras da referida sujeira, seguindo as etapas:

1. Paramentação com luvas cirúrgicas esterilizadas, visando preservar as características da amostra e evitar contaminações.
2. Coleta das amostras de sujeira depositadas sobre os módulos do sistema estudado, por meio da aderência dos particulados por fita dupla-face de carbono fixada sobre os STUBS (pequenas estruturas metálicas utilizadas como porta-amostras do MEV) (Fig. 6).
3. Armazenagem das amostras em estojo plástico compartimentado, para posterior análise laboratorial.

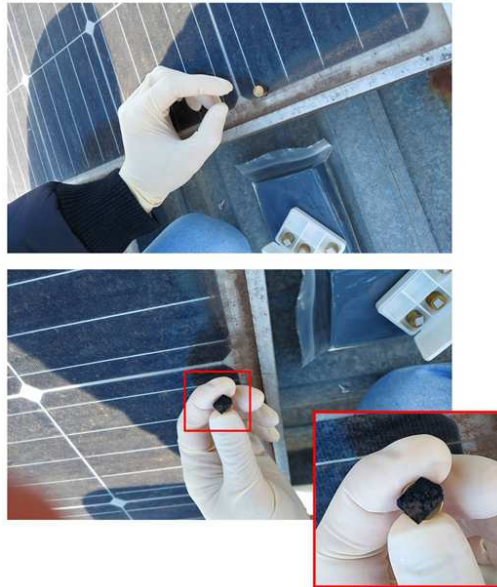


Figura 6 - Coleta das amostras de sujeira sobre os módulos FV. Fonte: autoria própria.

5.2.2 Caracterização das propriedades físicas no MEV

O contato elétrico entre a amostra (sujeira) e o porta-amostra foi feito com uma fita de carbono. Os parâmetros de análise no MEV foram: tensão de aceleração de 10 kV, detector secundário e a distância de trabalho de 9 mm. As imagens foram capturadas com a magnificação de 100, 500 e 1000 vezes do tamanho original.

Na sequência, para imagem com ampliação de 1000 vezes, foram retiradas quinze cotas, visando demonstrar a presença de partículas muito finas (diâmetro inferior a 10 μm), conforme apresentado na Fig. 7.

Este tipo de partícula, segundo o trabalho de El-Shobokshy e Hussein (1993), possui um efeito mais deteriorante sobre o desempenho de geração dos módulos FV em comparação à partículas mais grossas, para uma mesma densidade de deposição de poeira. Isto ocorre pela maior capacidade que as partículas finas têm de se assentar na superfície, diminuindo os espaços pelos quais a luz pode passar.

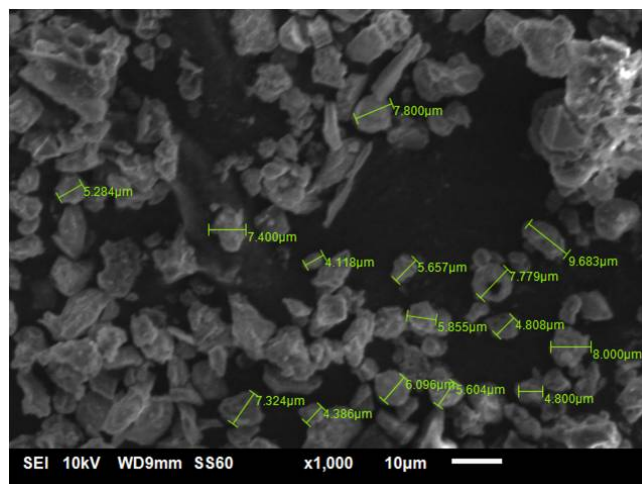


Figura 7 - Presença de partículas muito finas (<10 μm) na amostra. Fonte: autoria própria.

5.2.3 Composição química por EDS

Por meio do recurso de espectrômetro de Raios-X dispersivo em energia (EDS) do MEV, foi possível a obtenção da composição elementar da amostra em estudo. O resultado apontou a presença dos seguintes elementos químicos: C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Cu e Zn, nas proporções em massa e em mols descritas no gráfico da Fig. 8.

A presença massiva de Carbono (C) pode estar relacionada à composição da fita, na qual foi depositada a amostra para a análise pelo equipamento (fita de carbono). Embora, esperava-se encontrar concentração elevada deste elemento, devido à poluição veicular e dos processos industriais presentes na região, sendo este o produto da maioria dos processos de combustão. A também elevada presença de oxigênio (O), deve-se a composição das moléculas das partículas, que em sua maioria apresentam o formato de óxidos.

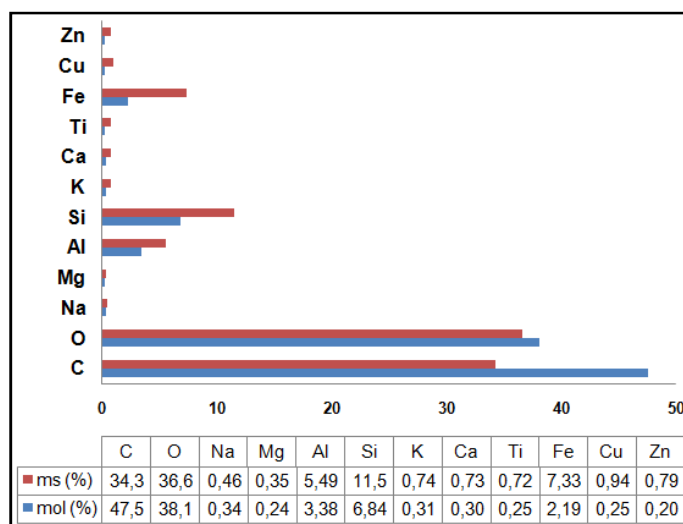


Figura 8 - Composição elementar da amostra de sujeira coletada sobre os módulos FV. Fonte: autoria própria.

De acordo com Rosasco *et al.* (2011), as partículas componentes do material particulado podem ter origem direta das fontes poluidoras (naturais ou antropogênicas) ou origem secundária pelos processos físico-químicos de “transformação gás-partícula”, que ocorrem na própria atmosfera. Deste modo, há uma variação nas propriedades e na composição das partículas, que dependerá, tanto da fonte poluidora, quanto da localização geográfica e das condições meteorológicas.

Os mesmos autores em seu trabalho, apresentam uma relação de fontes poluidoras presentes comumente em meio urbano e seus elementos componentes típicos:

- Al, Si, Fe, Ca, K, Ti: Partículas procedentes de ressuspensão do solo, sejam pelo tráfego veicular ou pelo vento;
- Negro de fumo (em inglês Black carbon - BC (C)) e Cu: Fuligem procedente da emissão veicular;
- BC (C), K e Cl: Emissões de queima agrícola, tais como a queima da cana-de-açúcar e queima de vegetação rasteira;
- Na e Cl: Partículas de origem marinha; e
- V e Ni: Produtos de queima residual de combustível diesel.

Muitos destes elementos foram detectados na análise por EDS realizada na amostra das partículas de sujeira coletada sobre os módulos FV da UFABC, e podem estar associados à presença destas fontes poluidoras na região do sistema FV em estudo.

5.3 Análise da curva IxV para sujeira acumulada

Em 02 de setembro de 2021 foram coletadas, a partir do equipamento traçador de curvas PVPM1100C, as curvas características das strings do sistema AT1-S que serão utilizadas como referência no estudo comparativo (strings nº 4 e nº 6, seguindo a numeração dos projetos), estas apresentaram o impacto da sujeira acumulada por um ano e dez meses de exposição natural.

Na sequência em 11 de setembro, foi realizada a limpeza do sistema AT1-S por completo, pela empresa Solstício Energia, responsável pela instalação do sistema, como pré-requisito para o comissionamento e entrega da usina. Nas Figs. 09 (a), (b) é possível observar os contrastes dos módulos limpos e sujos durante o processo de limpeza.

Devido a presença de manchas de sujeiras que permaneceram nos módulos após a limpeza realizada, dentre elas manchas de difícil remoção próximas às bordas inferiores, uma nova limpeza nas strings selecionadas para pesquisa foi executada pelos autores do projeto no dia 24 de setembro de 2021.

Com os módulos devidamente limpos, foram coletadas novamente as curvas características para comparação. A Fig. 10 demonstra a estrutura montada com o equipamento traçador de curvas IxV, para coleta dos dados diretamente nos cabos CC provenientes das strings de referência, na entrada do inversor.

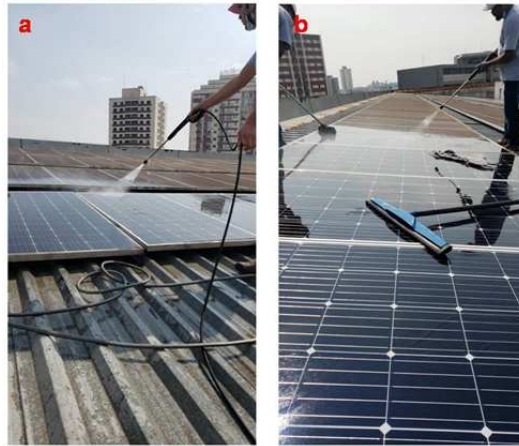


Figura 9 (a) e (b) - Contraste entre módulos sujos e limpos durante processo de limpeza realizado. Fonte: autoria própria

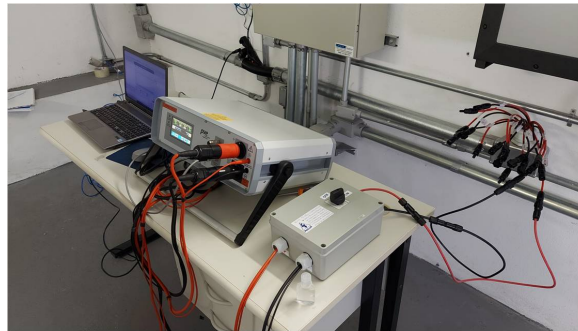


Figura 10 - Estrutura montada para coleta dos dados pelo traçador de curvas IxV. Fonte: autoria própria.

As Figs. 11 (a) e (b) apresentam as curvas características IxV da string nº 4 estudada, medida e convertida para as condições padrão de teste (STC), nos cenários de sujeira acumulada por um ano e dez meses e após a realização da limpeza.

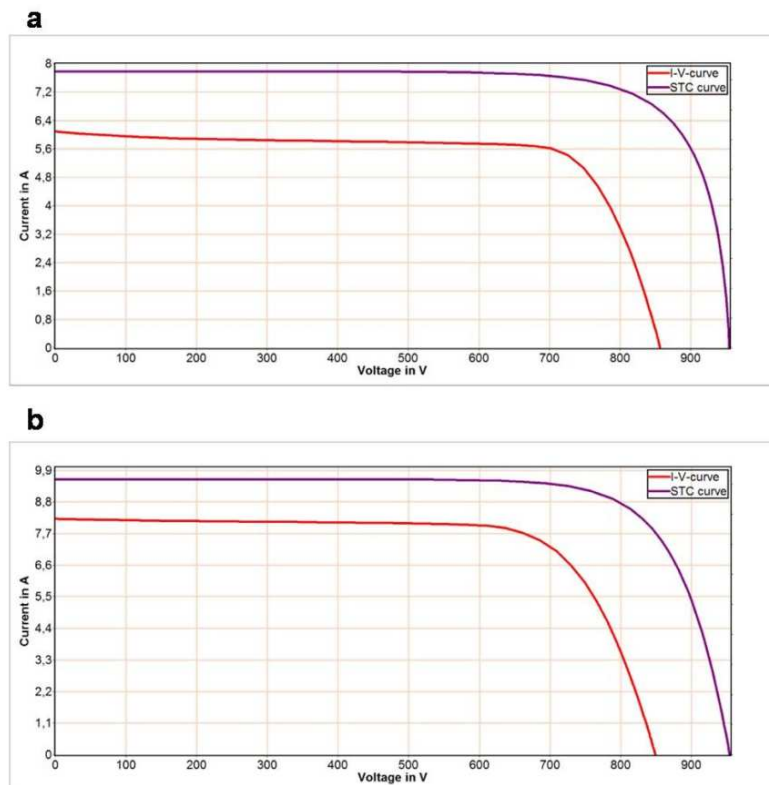


Figura 11 - (a) Curvas característica da string nº 4, medida e convertida para STC na condição "suja", com um ano e dez meses de sujeira naturalmente acumulada e (b) Curvas característica da string nº 4, medida e convertida para STC na condição "limpa", após realização de manutenção de limpeza.

Os dados dos parâmetros elétricos obtidos nas medições e convertidos para STC estão registrados na Tab. 1, que também apresenta a variação calculada para corrente de curto circuito (Isc) e ponto de máxima potência (Pmp), entre as situações suja e limpa e associado a perda de desempenho pela sujidade.

Tabela 1 - Variação obtida para Isc e Pmp para strings com um ano e dez meses de sujeira acumulada e após a limpeza.

Data da medição	Status	Condição STC						Δ isc (%) médio	Δ Pmp(%) médio
		String 6			String 4				
		Voc (V)	Isc (A)	Pmp (W)	Voc (V)	Isc (A)	Pmp (W)		
02/09/2021	Sujeira acumulada por 1 ano e 10 meses	961,98	7,85	5882,00	954,67	7,78	5854,00		
24/09/2021	Pós Limpeza	949,09	9,58	6950,70	954,19	9,58	7028,10		
	Δ isc (%)		18,06			18,79		18,42	
	Δ Pmp(%)			15,38			16,71		16,04

O estudo apurou uma perda de potência de 16,04% entre as referências sujas e limpas, valor que se extrapolado à potência instalada da usina FV do campus (388,8 kWp), corresponde à uma perda representativa de carga da ordem de 62 kWp, o equivalente a um arranjo completo instalado nas águas sul dos telhados das torres do Bloco A da universidade.

6. CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado foi possível obter uma caracterização da sujeira predominantemente depositada sobre os módulos, instalados em ambiente urbano, do Sistema FV estudado. As propriedades físicas apontaram a presença de partículas muito finas, mais prejudiciais ao sombreamento da superfície e as químicas, sua composição elementar básica. Por meio de inspeção visual e registro fotográfico, inferiu-se a forma da distribuição da sujeira sobre a superfície dos módulos, que se mostrou uniformemente distribuída, com leve maior concentração nas células próximas à borda inferior. Por fim, utilizando-se de um equipamento traçador de curvas IxV, as curvas características e os parâmetros elétricos de duas strings foram obtidos, nas condições: suja (com um ano e dez meses de sujeira naturalmente acumulada) e limpa, após a realização de manutenção de limpeza. A comparação dos parâmetros medidos apurou uma perda de desempenho de 16,04% associada à sujidade.

Em trabalho futuro, será realizado um monitoramento periódico do sistema FV, a fim de determinar uma taxa de perda de desempenho de geração, devido a sujidade, por período de tempo, que poderá ser referência para outros empreendimentos FV na mesma região ou em regiões com características semelhantes, bem como serão determinados os custos para manutenção de limpeza. Com base nestes, será estabelecida uma rotina de limpeza para a usina que vise o melhor custo-benefício do produto final, a eletricidade gerada.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores professor Ricardo Benedito e Professora Patrícia Leite, por todo apoio prestado até esta etapa da minha pesquisa. Este projeto também é um produto do Projeto de PEE e P&D de nº 390-1083-2020, firmado entre a UFABC e a Enel Distribuição São Paulo, que possibilitou a instalação das usinas FV na universidade.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); Chamada nº. 001/2016 Projeto prioritário de eficiência energética e estratégico de P&D: “Eficiência energética e minigeração em instituições públicas de educação superior”. Brasília, 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica/-/asset_publisher/94kK2bHDLpmo/content/chamadas-de-projetos-prioritarios/656831?inheritRedirect=false>. Acesso em: 25 mar. 2021.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa n. 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. D.O. de 02.12.2015, seção 1, p. 45, v. 152, n. 230, retificado no D.O. de 18.12.2015, 26.02.2016.

- El-Shobokshy, M. S.; Hussein, F. M. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy*, v. 51, n. 6, p. 505–511, 1993.
- Gostein, M.; Duster, T.; Thuman, C. Accurately measuring PV soiling losses with soiling station employing module power measurements. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015, , n. November, p. 3–7, 2015.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), ATLAS Brasileiro de Energia Solar: 2. ed. São Paulo, 2017.
- Maliska, A. M. Relatório técnico: Microscopia Eletrônica de Varredura e microanálise. Universidade Federal de Santa Catarina- Departamento de Engenharia Mecânica- Laboratório de Materiais- Laboratório de caracterização micro-estrutural e análise de imagens: www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf. 1998. 98 p. Acesso em: 07 ago. 2021.
- Mani, M.; Pillai, R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 9, p. 3124–3131, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>>.
- Ministério de Minas e Energia (MME); Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- Rosasco, F. V.; Mariani, R. L.; Martins, M. P. P.; Pereira, Ê. B. Caracterização morfológica de partículas na atmosfera de São José dos Campos-SP, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV). *Geochimica Brasiliensis*, v. 25, n. 1, p. 25–33, 2011.
- Sarver, T.; Al-Qaraghuli, A.; Kazmerski, L. 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*, v. 22, p. 698–733, 2013. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>>.
- Sayyah, A.; Horenstein, M. N.; Mazumder, M. K. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, v. 107, p. 576–604, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>>.
- Sinha, P.; Hayes, W.; Littmann, B.; Ngan, L.; Znaidi, R. Environmental variables affecting solar photovoltaic energy generation in Morocco. *Proceedings of 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2014*, , n. March, p. 230–234, 2014.

STUDY OF PERFORMANCE LOSS CAUSED BY SOILING DEPOSITED IN PHOTOVOLTAIC MODULES AT UFABC PLANT- CAMPUS SANTO ANDRÉ - SP.

Abstract. *The accumulation of dust and other environmental contaminants in the photovoltaic modules, classified as "soiling", results in a decrease at the solar irradiance that reaches the module's semiconductor junctions and, therefore, reduces the generation of electrical energy. In this context, it is relevant to study this factor impact on the performance of photovoltaic systems installed in different regions, so that you can determine the need for periodic cleaning maintenance through a schedule that takes into account the cost and benefit of this action on the final product, which is electrical energy. Therefore, this research work aimed to analyze the effects of the accumulation of dirt on the surface of the modules on the performance of PV systems, in a project located in Santo André, São Paulo, determining the loss of performance in the generation of electricity caused by dust accumulated over a year and ten months of natural exposure, using IxV curves measured in a field work, in a method of comparing dirty and clean references. The result achieved indicated a loss in power of 16.04% soiling associated.*

Key words: *Soiling, dust on PV modules, solar PV energy.*