

AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM ZONAS CLIMÁTICAS DO PARANÁ, BRASIL

Renan de Oliveira Alves Takeuchi – renan.takeuchi@gmail.com

Nicole Polityto Cremasco – nicolepolityto@gmail.com

Jorge Assade Leludak – assade@utfpr.edu.br

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

4.4. Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos

Resumo. O desempenho dos sistemas fotovoltaicos é afetado pelas condições ambientais reais, como a irradiância solar, a temperatura e a sujidade, nesta ordem de relevância. A sujidade descreve a deposição de poeira e outros contaminantes na superfície do módulo fotovoltaico, que atenuam a irradiância solar ao absorver ou refletir a luz solar, causando perdas de rendimento e podendo contribuir para a degradação do módulo fotovoltaico. Este estudo tem como objetivo avaliar a composição físico-química da sujidade depositada naturalmente em módulos FV instalados nas cidades de Medianeira, Pato Branco, Campo Mourão e Curitiba, do estado do Paraná. Análises morfológicas e elementares da sujidade coletada foram realizadas usando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). A morfologia das amostras indica que as partículas de sujidade têm diferentes formas e tamanhos (1 a 58 μm), o que influencia diretamente na adesão da superfície do módulo fotovoltaico. Foram observados mecanismos de sujidade que ampliam a adesão à superfície como a cimentação e a aglomeração de partículas devido a interação com água. Na análise elementar, o oxigênio é o elemento dominante da composição das amostras, seguido pelo ferro, silício, alumínio, cálcio, estanho, magnésio, titânio, bário, potássio, enxofre, flúor, cobre, sódio, cloro, fósforo e manganês. Portanto, o entendimento das características físico-química da sujidade é importante para compreender a fonte da aderência e buscar os métodos apropriados de limpeza, assim como o desenvolvimento de revestimentos autolimpantes, podendo auxiliar na identificação da sua procedência e indicar o movimento das partículas em um campo elétrico, que pode estar associado a degradação do módulo.

Palavras-chave: Sujidade, Módulo Fotovoltaico, Composição físico-química.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas tem apresentado crescente evolução em todo o mundo, por conta da busca de diversificação na matriz energética e da diminuição da dependência de combustíveis fósseis. Seguindo a tendência causada pelas altas adições anuais dos últimos anos, a energia fotovoltaica passou a ser a segunda tecnologia de energia renovável mais implantada no mundo em termos de capacidade instalada, tendo valores mais baixos apenas que a energia hidráulica. O último Relatório Global do Status das Energias Renováveis apresentou números globais preliminares de 2020, indicando que a capacidade global solar fotovoltaica ultrapassou a capacidade global de energia eólica, com aproximadamente 760 GW e 743 GW, respectivamente (REN21, 2021). Nesse cenário, é desejável que a geração de energia elétrica seja confiável, independente da fonte, apresentando uma elevada probabilidade de desempenhar adequadamente a devida conversão durante sua vida útil sob as condições de operação em campo.

Entretanto, agentes externos podem influenciar no desempenho dos sistemas, tais quais as condições climáticas. A escassez hídrica impacta a geração de energia nas hidrelétricas, a variabilidade na velocidade e direção do vento interfere na geração de energia eólica, já a combinação entre as variáveis meteorológicas e o material particulado pode contribuir no aumento das perdas de desempenho e na degradação de módulos fotovoltaicos (Braga *et al.*, 2020). Segundo Michelle *et al.* (2019), a irradiação solar, a temperatura e a sujidade são os parâmetros ambientais que mais afetam o desempenho do módulo fotovoltaico, nesta ordem de relevância.

Muitos fatores podem contribuir na deposição de sujidade, o que torna a avaliação dos impactos um problema complexo. De acordo com Ilse *et al.* (2018), a sujidade tem relação com alguns fatores ambientais como a velocidade e orientação do vento, umidade relativa do ar, poluição do ar e a temperatura ambiente. Além disso, algumas características construtivas do sistema como as características da superfície FV e ângulo de inclinação dos módulos podem influenciar na deposição de sujidade na superfície dos módulos. Recentemente, Mehmood *et al.* (2017) indicaram três razões para investigar a poeira depositada em módulos fotovoltaicos, ou seja, (a) otimização do custo de limpeza, (b) desenvolvimento de revestimento com propriedades autolimpante e (c) desenvolvimento da previsão de redução no desempenho.

Além disso, de acordo com Saidan *et al.* (2016), as consequências causadas pela sujidade em módulos fotovoltaicos não dependem apenas da quantidade acumulada, mas também da sua composição físico-química. Portanto, propriedades

químicas, como salinidade, condutividade, carga e pH, características físicas, como cor, textura, tamanho e forma, que variam conforme as condições geográficas e do grau de urbanização, também podem ser relevantes para a influência da sujeira nos sistemas fotovoltaicos (Ferrada *et al.*, 2019). No caso de zonas urbanas, espera-se que a sujeira seja oriunda de poluentes provindos da emissão de veículos e resíduos industriais, enquanto nas zonas rurais é esperada a existência de areia, matéria vegetal, assim com fertilizantes (Sarver *et al.*, 2013). Porém, a maioria dos trabalhos que tratam da sujeira a relacionam com as consequências como a queda de desempenho (Hammoud *et al.*, 2019), a obstrução da incidência de irradiância solar (Boyle *et al.*, 2013), surgimento de pontos quentes que aceleram o processo de degradação (Braga *et al.*, 2018), enquanto poucos analisam a morfologia.

Neste contexto, o conhecimento a respeito das características físico-química das partículas é útil para a avaliação da força de adesão das partículas e pode ajudar a selecionar o método de limpeza apropriado, assim como no desenvolvimento de revestimentos autolimpantes (Hachicha *et al.*; Ferrada *et al.*, 2019), previsão de redução no desempenho (Conceição *et al.*, 2018) e para determinar o movimento das partículas em um campo elétrico, que pode estar associado a degradação do módulo (Javed *et al.*, 2017).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a composição físico-química da sujeira depositada em módulos FV instalados em quatro cidades do estado do Paraná. Essas cidades estão localizadas em diferentes zonas climáticas, que apresentam diferentes condições ambientais, como clima oceânico temperado e clima subtropical úmido. Medições de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) das partículas coletadas da superfície do módulo fotovoltaico em cada local são relatadas neste estudo. Espera-se que através do estudo sistemático do acúmulo de sujeira em vários locais de interesse para a geração de energia fotovoltaica, o problema de sujeira fotovoltaica possa ser melhor compreendido e tratado.

2. METODOLOGIA

2.1 Plantas Fotovoltaicas

Em 2019, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) câmpus Curitiba por meio de um projeto P&D Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Companhia de Paranaense de Energia - Distribuição (COPEL-DIS), implantou em regiões estratégicas no estado do Paraná a rede de Estações de Pesquisa em Energia Solar (EPESOL-UTFPR). As EPESOL são plantas conectadas a rede elétrica da UTFPR, composta por seis plantas de avaliação, cada uma contendo 4 (quatro) tecnologias fotovoltaicas distintas, instaladas nas condições ideais, com inclinação igual à latitude e com orientação voltada ao norte, ou seja, com desvio azimutal de 0°. Além dos módulos de avaliação, as EPESOL possuem ao menos uma estação solarimétrica capaz de medir e armazenar ao menos os dados de radiação global horizontal e plano inclinado, velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar e temperatura ambiente. Os sistemas fotovoltaicos estudados neste trabalho são similares, e estão localizados no sul do Brasil nas cidades de Medianeira (MD), Pato Branco (PB), Campo Mourão (CM) e Curitiba (CT). As tecnologias fotovoltaicas instaladas nas EPESOL são monocristalinas com arquitetura PERC (m-Si), policristalina (p-Si), telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). A Figura 1 mostrada a visão aérea da EPESOL-CT.



Figura 1 – Visão aérea da EPESOL-CT.

Os locais de instalação das EPESOL foram definidos baseados em critérios técnicos, como a incidência da irradiância solar, distribuição espacial e benefícios gerados. Sabendo que o desempenho dos sistemas fotovoltaicos é influenciado diretamente pela irradiância solar e pelas condições meteorológicas, ter conhecimento dessas grandezas deve ser uma premissa de projeto. Além disso, as condições climáticas podem contribuir para a deposição de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos, assim como o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Como as condições meteorológicas são o estado instantâneo da atmosfera, é possível ter conhecimento das características climáticas de uma região previamente através das classificações climáticas, que são um conjunto das condições atmosféricas médias que caracterizam uma região ao longo de um período, normalmente de dez a trinta anos

(Aparecido *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2018). Segundo Aparecido *et al.* (2016), o sistema de classificação climática de Köppen (1900) é o mais utilizado no mundo, sendo aprimorado pelo meteorologista e climatologista alemão Rudolf Geiger (1954) e atualizado como Köppen-Trewartha (Trewartha, 1954). O estado do Paraná é representado nesse sistema por quatro classes climáticas (Cfa-Clima subtropical úmido, Cfb-Clima oceânico, Aw-Clima tropical de savana e Cwa-clima subtropical úmido de inverno seco) de acordo com a temperatura do ar e precipitação. A Figura 2 apresenta o mapa do estado do Paraná, indicando a irradiância solar no plano inclinado e as classes climáticas.

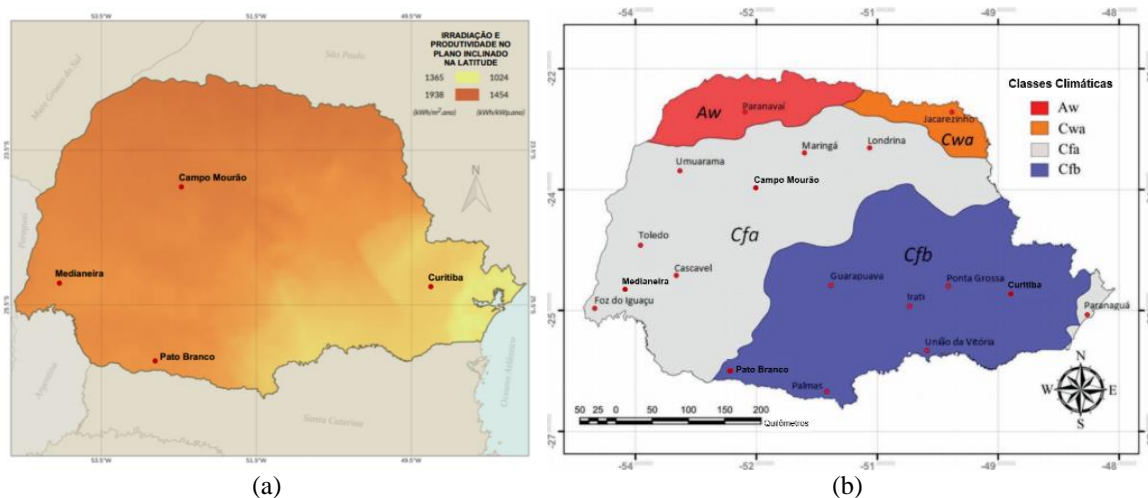


Figura 2 - Mapas do estado do Paraná (a) Irradiação no plano inclinado na latitude (Tiepolo *et al.*, 2017) e (b) Zonas climáticas de acordo com o sistema Köppen-Trewartha (1954) (Aparecido *et al.*, 2016).

2.2 Ensaios realizados

Para a avaliação da morfologia e composição química da sujidade depositada naturalmente sobre os módulos fotovoltaicos foi realizada uma análise qualitativa do material particulado coletado. Com o intuito de evitar a contaminação das amostras, como acontece ao utilizar bastonetes de algodão, foram utilizados *stubs*. Os porta amostras do microscópio eletrônico de varredura (*stubs*) são peças de alumínio, que recebem na sua superfície uma fita dupla-face de carbono condutora de eletricidade a qual fixa o material particulado à sua superfície através do contato com a superfície dos módulos fotovoltaicos. A fim de evitar a contaminação, após a coleta as amostras foram isoladas em embalagens plásticas lacradas e encaminhadas para a central para microscopia (RPT07C) da Fiocruz – Paraná, para a metalização de amostra.

Quando a amostra não é condutiva é necessário fazer um recobrimento metálico com ouro ou carbono para tornar a superfície condutiva, pois o acúmulo de cargas elétricas na superfície da amostra dificulta ou inviabiliza a aquisição de imagens de elétrons secundários no microscópio eletrônico de varredura (Freire *et al.*, 2015). Na Figura 3 é possível observar os *stubs* com uma coloração dourada após a metalização com ouro, realizada em um metalizador da marca Leica modelo EM ACE200. Posteriormente, as amostras foram levadas ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR câmpus Curitiba para realizar as observações físicas por meio do microscópio eletrônico de varredura, e da composição química das amostras por meio da técnica de espectroscopia de energia dispersiva.



Figura 3 - *Stubs* após metalização.

A microscopia e espectroscopia foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss, modelo EVO MA 15, ilustrado na Figura 4. Este equipamento opera com feixe de elétrons focalizado, que varre a superfície da amostra, interagindo com a amostra e gerando diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e a composição química das amostras. Em seu interior são encontrados detectores de elétrons secundários em alto vácuo e em pressão variável, e de elétrons retroespalhados, o que possibilita a formação da imagem ampliada, também conhecido como micrográfico. Além disso, o equipamento também possui o detector EDS X-Max de 20 mm², para a microanálise química. Por meio desta composição o equipamento possibilita a medição nos três eixos (X, Y e Z), de amostras de até 250 mm de diâmetro e massa de até 500 g (UTFPR, 2020).



Figura 4 - Microscópio eletrônico de varredura da Zeiss, modelo EVO MA 15 (UTFPR, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados da avaliação físico-química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos instalados em zonas climáticas do Paraná, Brasil.

3.1 Análises morfológicas

Os resultados das análises morfológicas via microscopia são mostrados em micrográficos na Figura 5, onde a interação entre os elétrons e as amostras resulta em regiões mais claras dos micrográficos, que indicam a presença de partículas eletricamente carregadas, enquanto as regiões escuras indicam a presença da fita de carbono, ou seja, a ausência da presença de partículas. Em primeira análise, foi constatado um volume maior de material particulado na amostra CT (Figura 5d). Tal fato era esperado, pois a planta está localizada em uma região urbanizada e próximo ao distrito industrial de Curitiba, diferentemente das demais locais estudados. Já na amostra CM (Figura 5c), foi constatado o menor volume de material particulado, provavelmente causado pela limpeza natural através da precipitação acumulada de 44 mm ocorrida nos 15 dias que antecederam a data da coleta.

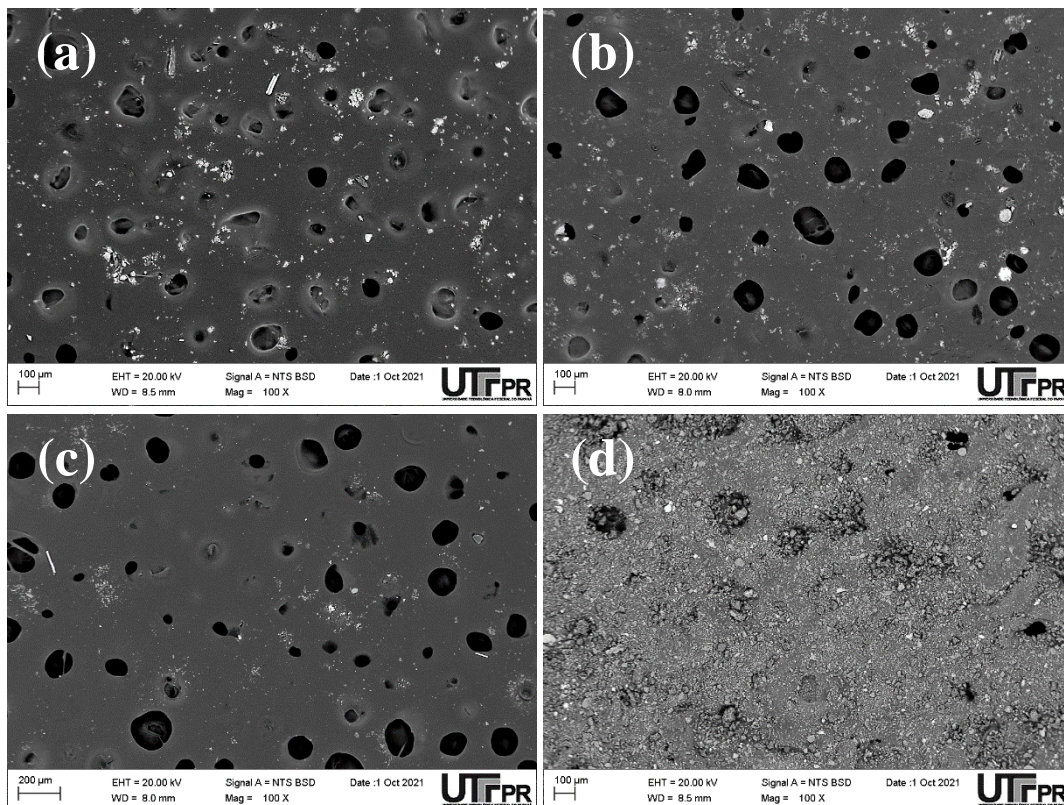


Figura 5 - Imagens de microscópio eletrônico de varredura dos materiais particulado coletados dos módulos nos locais MD (a), PB (b), CM (c) e CT (d).

Observa-se que a morfologia das partículas foi diversificada, apresentando alta variabilidade no tamanho e forma, a maioria não é esférica nem lisa, o que influencia diretamente na adesão da superfície do módulo FV. Nas amostras de MD, PB, CM e CT foram identificadas partículas com diâmetros entre 1 e 44 μm , 1 e 49 μm , 1 e 17 μm , 1 e 58 μm , conforme mostrado na Figura 5(a), (b), (c) e (d), respectivamente. A maioria das partículas menores tendem a estar próximas, formando aglomerados de difícil remoção. Nestes aglomerados partículas maiores (com o tamanho de 10 a 32 μm) são cobertas e rodeadas por partículas menores ($<6 \mu\text{m}$) (Figura 5(a), (b), (c)). De acordo com o grau de cobertura da superfície do módulo FV pelas partículas, poderá haver uma influência no efeito de sombreamento do módulo FV, impactando na potência de saída.

Outro impacto causado pela morfologia das partículas é visto nos mecanismos de limpeza natural como o vento e a chuva, que apresentam comportamentos diferentes de acordo com a morfologia das partículas. Geralmente, há um despreendimento de partículas maiores na ocorrência de vento ou chuva, enquanto as partículas menores tendem a ter maior aderência a superfície quando há baixa intensidade de vento ou chuva. Desta forma, é possível confirmar que a ausência de partículas maiores que 17 μm em CM é proveniente da precipitação acumulada de 44 mm registrada dias antes da coleta da amostra. Além disso, em ambas amostras foram encontradas partículas maiores e individuais (com o tamanho de 15 a 49 μm). Estas apresentam formas irregulares e bordas mais ásperas, presumindo-se que estas são partículas com deposição recente, pois de acordo com Hachicha *et al.* (2019) as partículas maiores tendem a ser facilmente removidas pela chuva ou vento.

Javed *et al.* (2017) provaram que as partículas de poeira mudam com o aumento do tempo de exposição ao comparar micrográficos de amostras de poeira acumulada de 24 horas, um mês e seis meses. Sendo observado que as partículas de poeira assumiram formas irregulares e maiores em amostras de menor tempo de exposição, já nas amostras de maior tempo de exposição, as partículas tendem a ser aglomeradas e as amostras de poeira expostas por muito tempo tinham mais partículas de tamanho menor e aglomeradas.

Segundo Yilbas *et al.* (2015), a mudança na forma e no tamanho das partículas pode resultar em uma modificação da composição química das partículas. Essa mudança na morfologia das partículas com o tempo de exposição pode ser vista nas aglomerações presentes na Figura 5. A explicação para essa mudança é a interação das partículas com a água, que promoverá diferentes processos que aumentam permanentemente a adesão das partículas à superfície, como a cimentação, aglomeração de partículas e envelhecimento capilar, conforme modelo mostrado na Figura 6.

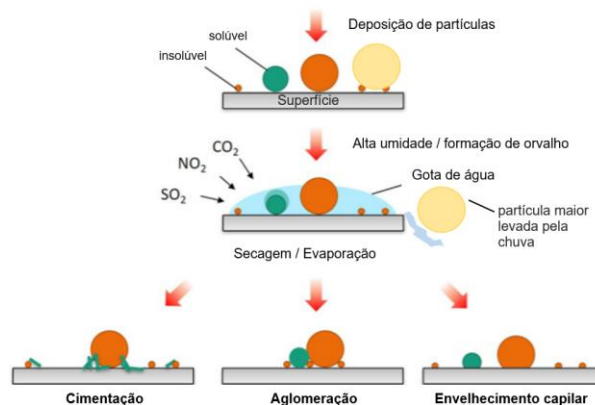


Figura 6 - Modelo para mecanismos de sujidade que aumentam a adesão das partículas: cimentação, aglomeração e envelhecimento capilar. Adaptado de Ilse *et al.*, 2018.

As partículas são compostas por materiais inorgânicos e orgânicos que contêm alguns sais solúveis e insolúveis em água proveniente de chuvas leves, alta umidade ou pelo orvalho matinal. Segundo Ilse *et al.* (2018) e Sarver *et al.* (2013), as partículas solúveis na presença de alta umidade formam gotículas de sal que também retêm quaisquer partículas insolúveis, que evaporam completamente ao longo do dia enquanto a temperatura da superfície dos módulos aumenta, atuando como cimento para ancorar as partículas insolúveis à superfície. O processo de aglomeração de partículas aumenta a adesão das partículas durante os eventos de alta umidade, aglomerando e compactando as partículas presentes na superfície (Ilse *et al.*, 2018). O processo de envelhecimento capilar ocorre quando as gotas de água secam, fazendo com que as forças capilares (pressão superficial) pressionem as partículas contra a superfície, causando uma deformação, de modo a aumentar a área de contato e adesão à superfície (Ilse *et al.*, 2018).

Alguns desses mecanismos de sujidade que ampliam a adesão à superfície foram observados nas amostras, como a cimentação e a aglomeração de partículas devido a interação com água. As fontes destas adesões podem ser similares ao que foi apresentado por Ilse *et al.* (2018), em que uma partícula de calcita (CaCO_3) que foi cimentada principalmente por óxidos de Si, Al, Mg e C na superfície do vidro. E por Kazmerski *et al.* (2016) e Klugmann-Radziemska (2015), em que foi relatado que o material solúvel nas superfícies das partículas (como Na, Cl, K, S, C) reagiu com a umidade/orvalho para ser dissolvido, o que resultou a aglomeração de partículas, pois estes elementos também foram observados na análise elementar.

3.2 Análises de composição química

O conhecimento da composição química da sujidade é importante para compreender a fonte da aderência e buscar os métodos apropriados de limpeza, pode auxiliar a identificação da sua procedência e indicar o movimento das partículas em um campo elétrico (John *et al.*, 2016; Mazumder *et al.*, 2015).

Para estudar a composição química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos de diferentes locais, foi realizada a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) nas amostras coletadas. Os resultados apresentados na Figura 7, correspondem à análise química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos coletados em MD, PB, CM e CT.

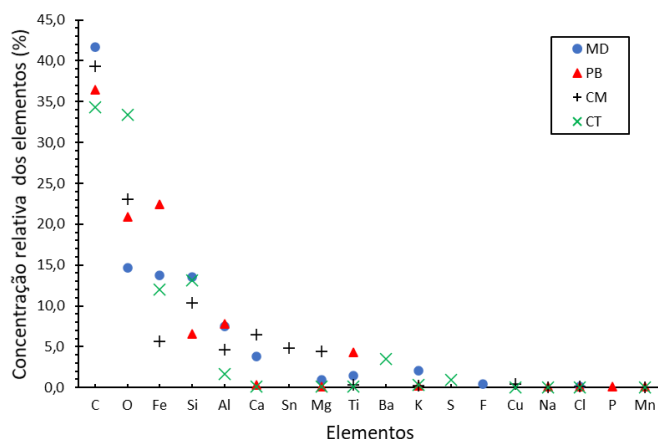


Figura 7 - Análise elementar de amostras MD (círculos azuis), PB (triângulos vermelhos), CM (cruzes pretas) e CT ("X" verdes) obtidos do espectro EDS.

Primeiramente, é importante relatar que o ouro empregado no recobrimento metálico não foi incluído no cálculo da porcentagem de participação da composição das amostras, pois este não faz parte da amostra original. Logo, os resultados mostram que o carbono (C) constituiu o maior conteúdo da composição das amostras, com percentuais de 41,7%, 36,5%, 39,4% e 34,3%, porém a presença de C pode ser menor do que foi indicado nos resultados, devido presença da fita de carbono nos espaços vazios das amostras. Sendo mais adequado afirmar que o oxigênio (O) é o elemento dominante da composição das amostras, seguido pelo ferro (Fe), silício (Si), alumínio (Al), cálcio (Ca), estanho (Sn), magnésio (Mg), titânio (Ti), bário (Ba), potássio (K), enxofre (S), flúor (F), cobre (Cu), sódio (Na), cloro (Cl); fósforo (P) e manganês (Mn).

Elementos como o O, C, Ca, Fe, Al, Si, S, e K são predominantemente encontrados em análises da composição química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos em outros estados no Brasil, em Minas Gerais (Costa *et al.*, 2016), em Goiás (Romanholo *et al.*, 2018) e no Ceará (Araujo *et al.*, 2020). Do mesmo modo, estudos em outros países apontam a presença destes elementos, como no Chile (Ferrada *et al.*, 2019), Emirados Árabes Unidos (Hachicha *et al.*, 2019) e Arábia Saudita (Mehmood *et al.*, 2017).

Alguns destes elementos são típicos da ressuspensão do solo, como o Si, Ti, Al, Fe, Ca e Mn (Freitas filho *et al.*, 2020; Santiago *et al.*, 2015), e foram encontrados em todas as amostras com exceção do Mn que não foi encontrado apenas em MD. A presença de Si, Al, Fe, também pode estar associada a atividade industrial e/ou associado aos transportes rodoferroviário, especificadamente pelo Fe e Al oriundos do desgaste do motor (Morawska e Zhang, 2002). A presença do Ca também pode estar relacionada ao pó de cimento da construção civil e indústria de cimento (Favez *et al.*, 2008).

O K e Cl geralmente são provenientes da queima de biomassa, combustão de carvão e queima de lixo (Zhang *et al.*, 2011; Santiago *et al.*, 2015). Além disso, o Cl está associado a salinidade, os baixos índices de Na e Cl indicam que as regiões estão distantes do litoral.

O Ba tem como principal fonte a emissão industrial, particularmente da combustão de carvão, óleo diesel e incineração de resíduos (CETESB, 2017), o que justifica a presença do Ba apenas na amostra de CT influenciada pelas atividades industriais ao seu redor.

A presença de S apenas na amostra de CT indica que a região possui alta circulação de veículos automotores, pois é característico da queima de combustíveis fósseis (CETESB, 2020). Além disso, segundo Schauer *et al.*, (2006) a presença de Cu pode ter a origem de poeira de estrada, combustão de combustível, óleo lubrificante e poeira de freios. Na amostra de CM também foi identificado a presença de Cu e de acordo com Kabata-Pendias (2011) este elemento também pode ser encontrado em pesticidas, o que corrobora com as atividades observadas ao redor da EPESOL-CM que faz divisa com uma lavoura. Além disso, o Sn foi encontrado apenas na amostra de CM, assim como os maiores índices dos elementos Ca e Mg. Possivelmente estes elementos também são provenientes da lavoura, pois conforme Guimarães Júnior *et al.* (2013) o Ca e Mg são empregados como corretivo da acidez do solo e o Sn é comumente encontrado em fungicidas (Viera e Silva, 1998).

O F foi encontrado apenas na amostra de MD, segundo Trentin (2003) as fontes de fluoreto podem ser da indústria do alumínio, em suas diversas formas, a indústria da produção de HF, a indústria siderúrgica, as indústrias de fertilizantes, os processos industriais de queima de carvão, a indústria de vidro e cerâmica.

De acordo com Klein e Agne (2012) o P tem origem de rochas fosfáticas, que podem ser beneficiadas para a fabricação de adubos fosfáticos para solos deficientes. O P foi encontrado apenas na amostra de PB, podendo ser oriundo das lavouras encontradas na região ou até mesmo da ressuspensão do solo devido aos maiores índices observados de Fe, Al, Ti e Mn das amostras analisadas.

4. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta a análise da sujidade depositada naturalmente em módulos FV instalados nas cidades de Medianeira, Pato Branco, Campo Mourão e Curitiba, do estado do Paraná. A fim de identificar a composição físico-química das amostras, análises morfológicas e elementares da sujidade coletada foram realizadas usando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Com base na morfologia das amostras, as partículas de sujidade observadas foram diversificadas. Apresentando alta variabilidade no tamanho (1 a 58 μm) e forma, a maioria não é esférica nem lisa, o que influencia diretamente na adesão da superfície do módulo FV. As partículas maiores tendem a se desprenderem da superfície na ocorrência de vento ou chuva, enquanto as partículas menores tendem a se aproximarem formando aglomerados de difícil remoção natural. Além disso, algumas características construtivas do sistema como as características da superfície FV e ângulo de inclinação dos módulos podem influenciar na deposição de sujidade na superfície dos módulos.

A combinação da umidade através do orvalho matinal ou de chuvas leves com a sujidade estabelece mecanismos que ampliam a adesão à superfície como a cimentação e a aglomeração de partículas, conforme observado nas amostras. A tendência é que o desempenho do módulo fotovoltaico diminua progressivamente com o acúmulo da sujidade, exigindo uma ação de limpeza vigorosa, mas cuidadosa, para retomar o desempenho inicial.

Os resultados da análise elementar demonstram que as partículas de sujidade consistem em uma distribuição não uniforme de elementos que compõem as amostras. O oxigênio é o elemento dominante da composição das amostras, seguido pelo ferro, silício, alumínio, cálcio, estanho, magnésio, titânio, bário, potássio, enxofre, flúor, cobre, sódio, cloro, fósforo e manganês.

Esta composição de sujidade é provavelmente influenciada por o local de instalação, pelas condições climáticas e as atividades humanas ao seu redor.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UTFPR, ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR-CT pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa, ao Programa de Desenvolvimento Tecnológico em Ferramentas para a Saúde-PDTIS-FIOCRUZ pela utilização da instalação central para microscopia (RPT07C) e a COPEL-Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização deste projeto de P&D da ANEEL "ANEEL PD 2866-0464/2017 - Metodologia Para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas".

REFERÊNCIAS

- Aparecido, L. E. D. O., Rolim, G. D. S., Richetti, J., Souza, P. S. D., Johann, J. A., 2016. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 40, pp. 405-417.
- Araujo, D. N., Freitas Filho, M. F., CARVALHO, P. C., Sasaki, J. M. 2018. Análise química preliminar da sujidade depositada em duas plantas fotovoltaicas instaladas na zona urbana de Fortaleza. VII CBENS–VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Boyle, L., Flinchpaugh, H., Hannigan, M., 2013. Impact of natural soiling on the transmission of PV cover plates. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 3276 – 3278.
- Braga, D. S., Costa, S. C. S., Diniz, A. S. A. C., Santana, V. A. C., Kazmerski, L. L., 2020. Estudo da Relação entre Parâmetros Ambientais e Taxa de Sujidade em Módulos Fotovoltaicos. VIII CBENS–VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Braga, D. S., Diniz, A. S. A. C., Costa, S. C. S., Kazmerski, L. L., Bhaduri, S., Maia, C. B., Camatta, V., Viana, M. M., Barbosa, E. M. C., Brito, P. P., Campos, C. D., Hanriot, S. M., 2018. Uniform and Non-Uniform Soiling of PV Modules: A Comprehensive Study of Performance and Temperature Effects. Proceedings 45th IEEE Photovoltaic Specialists Conference and the WCPEC-7, Hawaii.
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2017. Ficha de Informação Toxicológica – Bário. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Bario.pdf>>. Acessado em: 02 dez. 2021.

- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2020. Ficha de Informação Toxicológica – Dióxido de enxofre. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/Dio%CC%81xido-de-enxofre.pdf>>. Acessado em: 02 dez. 2021.
- Conceição, R., Silva, H. G., Mirão, J., Gostein, M., Fialho, L., Narvarte, L., Collares-Pereira, M., 2018. Saharan dust transport to Europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in Portugal. *Solar Energy*, 160, pp. 94–102.
- Costa, S. C. S., Diniz, A. S. A. C., Santana, V. A. C., Muller, M., Micheli, L., Kazmerski, L. L., 2018. Avaliação da sujidade em módulos fotovoltaicos em Minas Gerais, Brasil. VII CBENS–VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Favez, O., Cachier, H., Sciare, J., Alfaro, S. C., El-Araby, T. M., Harhash, M. A., Abdelwahab, M. M., 2008. Seasonality of major aerosol species and their transformations in Cairo megacity. *Atmospheric Environment*, 42(7), 1503-1516.
- Ferrada, P., Olivares, D., del Campo, V., Marzo, A., Araya, F., Cabrera, E., Fuentealba, E., 2019. Physicochemical characterization of soiling from photovoltaic facilities in arid locations in the Atacama Desert. *Solar Energy*, 187, pp. 47–56.
- Freire, R. S.; Lima, P. H. M.; Miguel, E. C., 2015. Manual de operação MEV Quanta 450 FEG. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 34p.
- Freitas Filho, M. F., Araujo, D. N., de Carvalho, P. C. M., Sasaki, J. M., 2020. Análise da composição físico-química da sujidade de plantas fotovoltaicas: estudo de caso para Fortaleza. *Revista Tecnologia*, 41(2).
- Geiger, R., 1954. Klassifikation der klimate nach W. Köppen. Bartels, J.; Bruggencate, P. Landolt- Börnstein – Zahlenwerte und Funktionen aus physik, chemie, astronomie, Geophysik und Technik. Alte Serie. 3: pp. 603-607.
- Guimarães Júnior, M. P. A., Santos, A. C. D., Araújo, A. D. S., Oliveira, L. B. T. D., Rodrigues, M. O. D., e Martins, A. D., 2013. Relação Ca: Mg do corretivo da acidez do solo e as características agrônômicas de plantas forrageiras. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 14, 460-471.
- Hachicha, A. A., Al-Sawafta, I., Said, Z., 2019. Impact of Dust on the Performance of Solar Photovoltaic (PV) Systems under United Arab Emirates Weather Conditions. *Renewable Energy*, 141, pp. 287-297.
- Hammoud, M., Shokr, B., Assi, A., Hallal, J., Houry, P., 2019. Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal PV-power plant at Zahrani Lebanon. *Solar Energy*, vol. 184, pp. 195-201.
- Ilse, K. K., Figgis, B. W., Naumann, V., Hagendorf, C., Bagdahn, J., 2018. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 98, n. january pp. 239-254.
- Javed, W., Wubulikasimu, Y., Figgis, B., Guo, B., 2017. Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar. *Solar Energy*, 142, pp. 123–135.
- John, J.J., Warade, S., Tamizhmani, G., Kottantharayil, A., 2016. Study of soiling loss on photovoltaic modules with artificially deposited dust of different gravimetric densities and compositions collected from different locations in India. *IEEE Journal Photovolt.* 6 (1), 236–243.
- Kabata-Pendias, A., 2011. Trace elements in soils and plants. CRC Press. Boca Raton.
- 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., 2016. Fundamental studies of the adhesion of dust to PV module chemical and physical relationships at the microscale. *IEEE J. Photovolt.* 6 (3), 719–729.
- Klein, C., e Agne, S. A. A., 2012. Fósforo: de nutriente à poluente. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 8(8), 1713-1721.
- Klugmann-Radziemska, E., 2015. Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland. *Renew. Energy* 78, 418–426.
- Köppen, W., 1900. Versuch einer klassifikation der klimate, vorzugsweise nach ihren beziehungen zur pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift*. 6: pp. 657-679.
- Mazumder, M. K., Horenstein, M. N., Heiling, C., Stark, J. W., Sayyah, A., Yellowhair, J., & Raychowdhury, A., 2015. Environmental degradation of the optical surface of PV modules and solar mirrors by soiling and high RH and mitigation methods for minimizing energy yield losses. *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*.
- Mehmood, U., Al-Sulaiman, F. A., Yilbas, B. S., 2017. Characterization of dust collected from PV modules in the area of Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, and its impact on protective transparent covers for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 141, pp. 203–209.
- Michele, L., Deceglie, M. G., Muller, M., 2019. Predicting photovoltaic soiling losses using environmental parameters: An update. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, n. 3, pp. 210-219.
- Morawska, L., Zhang, J. J., 2002. Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures. *Chemosphere*, 49(9), 1045-1058.
- REN21. Renewables 2021 Global Status Report, 2021. Paris, FR. ISBN 978-3-948393-03-8.
- Romanholo, P. V. V., de Alvarenga, B. P., Marra, E. G., Pimentel, S. P., 2018. Sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos instalados em Goiânia: morfologia e composição química. VII CBENS–VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Saidan, M., Albaali, A. G., Alasis, E., Kaldellis, J. K., 2016. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 92, pp. 499-505.
- Santiago, A., Prado, R. J., Modesto, P., Alonso, R. V., 2015. Caracterização do material particulado suspenso no ar de Cuiabá-MT no período de queimadas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20, 273-283.

- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., Kazmerski, L. L., 2013. 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*, 22, pp. 698–733.
- Schauer, J. J., Lough, G. C., Shafer, M. M., Christensen, W. F., Arndt, M. F., DeMinter, J. T., Park, J. S., 2006. Characterization of metals emitted from motor vehicles. Research report (Health Effects Institute), n.133, 1-76.
- Tiepolo, G. M.; Pereira, E. B.; Urbanetz, J.; Pereira, S. V.; Gonçalves, A. R.; Lima, F. J. L.; Costa, R. S.; Alves, A. R., 2017. Atlas de energia solar do Estado do Paraná. Curitiba, Ed. UTFPR.
- Trentin, P. D. S., 2003. Proposta de um método de amostragem de baixo custo para a determinação de fluoreto inorgânico atmosférico. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 131 p.
- Trewartha, G. T., 1954. *An Introduction to Climate*. New York: McGraw-Hill. 402p.
- UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020. Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) – Equipamentos - Microscópio Eletrônico de Varredura (Zeiss, modelo EVO MA 15). Disponível em: <<https://portal.utfpr.edu.br/pesquisa-e-pos-graduacao/laboratorios-multiusuarios/laboratorios/centro-multiusuario-de-caracterizacao-de-materiais-cmcm/equipamentos>>. Acessado em: 01 out. 2021.
- Vieira, r. f., Silva, A. D., 1998. Aplicação de defensivos via água de irrigação por aspersão. Feijão-aspectos gerais e cultura no Estado de Minas. Viçosa: UFV, 267-323.
- Yilbas, B. S., Ali, H., Khaled, M. M., Al-Aqeeli, N., Abu-Dheir, N., Varanasi, K. K., 2015. Influence of dust and mud on the optical, chemical, and mechanical properties of a PV protective glass. *Scientific Reports*, 5(1), pp. 1–12.
- Zhang, T., Cao, J., Tie, X., Shen, Z., Liu, S. X., Ding, H., ... Li, W. T., 2011. Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in Xi'an, China: Seasonal variations and sources. *Atmospheric Research*, v. 102, n. 1, p. 110–119.

PHYSICAL-CHEMICAL EVALUATION OF THE SOILING DEPOSITED ABOUT PHOTOVOLTAIC MODULES INSTALLED IN THE ZONES CLIMATE IN PARANÁ, BRAZIL

Abstract: *The performance of photovoltaic systems is affected by real environmental conditions, such as solar irradiance, temperature and soiling, in this order of relevance. Soiling describes the deposition of dust and other contaminants on the surface of the photovoltaic module, which attenuate solar irradiance by absorbing or reflecting sunlight, causing yield losses and possibly contributing to the degradation of the photovoltaic module. This study aims to evaluate the physicochemical composition of soiling naturally deposited in photovoltaic modules installed in the cities of Medianeira, Pato Branco, Campo Mourão and Curitiba, in the state of Paraná. Morphological and elemental analysis of the collected dirt were performed using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The morphology of the samples indicates that the dirt particles have different shapes and sizes (1 to 58 µm), which directly influence the adhesion of the surface of the photovoltaic module. Mechanisms of soiling that increase adhesion to the surface, such as cementation and agglomeration of particles due to interaction with water, have been observed. In elemental analysis, oxygen is the dominant element in the sample composition, followed by iron, silicon, aluminum, calcium, tin, magnesium, titanium, barium, potassium, sulfur, fluorine, copper, sodium, chlorine, phosphorus and manganese. Therefore, understanding the physicochemical characteristics of dirt is important to understand the source of adhesion and to seek appropriate cleaning methods, as well as in the development of self-cleaning coatings, can help identify its origin and indicate the movement of particles in an electric field, which may be associated with module degradation.*

Key words: *Soiling, Photovoltaic Module, Physicochemical Composition.*