

SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM GOIÂNIA: MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Pedro Victor Valadares Romanholo – romanholo.pedro@gmail.com

Bernardo Pinheiro de Alvarenga – bernardo_alvarenga@ufg.br

Enes Gonçalves Marra – enes@ufg.br

Sérgio Pires Pimentel – sergio_pimentel@ufg.br

Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Resumo. *A tecnologia de fabricação de módulos fotovoltaicos avançou intensamente nas últimas décadas, oferecendo ao mundo equipamentos mais eficientes e menos onerosos. Devido a suas características intrínsecas de funcionamento, os módulos são instalados o mais livre possível de obstruções físicas, principalmente daquelas que causem sombreamento. Entretanto, ao serem instalados ao ar livre, estes equipamentos são submetidos às ações climáticas e das substâncias que compõem a atmosfera em que estão inseridos. Desta maneira, partículas suspensas no ar se depositam sobre a superfície dos módulos, comprometendo a operação destes. A extensão do impacto causado pela deposição de partículas dependerá principalmente da morfologia e da composição química destas. A partir disto, realizou-se uma investigação das características físico-químicas da sujidade depositada sobre os módulos do sistema de geração solar fotovoltaica instalado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás. Com este objetivo, foram coletadas amostras da sujidade depositada, a qual teve sua morfologia analisada via técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e sua composição química via técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Os resultados obtidos mostram uma grande variação no tamanho e morfologia das partículas, sendo observado um intervalo de valores entre, aproximadamente, 10 e 100 μm para o diâmetro das partículas. A caracterização química apresenta indícios da presença de compostos orgânicos e minerais, resíduos de poluição urbana e dejetos de pássaros.*

Palavras-chave: Energia Solar, Sujidade, Módulos Fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

O processo fotovoltaico de conversão de energia é uma tecnologia proeminente no aproveitamento da abundância do recurso solar. Para que esta riqueza natural seja adequadamente desfrutada, tem-se que os sistemas fotovoltaicos, responsáveis pela captação e conversão de energia, são usualmente instalados em zonas onde há uma alta intensidade de radiação solar. A partir da revisão realizada por Sarver et al. (2013), observa-se que, normalmente, as regiões escolhidas para grandes empreendimentos desta natureza apresentam clima seco e intensa atividade dos ventos. Assim, torna-se imprescindível conhecer as características climáticas da região selecionada, principalmente acerca do comportamento da ação dos ventos e da precipitação. É por meio destes fenômenos naturais que ocorre a poluição, bem como a limpeza, da superfície dos módulos.

Um fenômeno a que todo módulo fotovoltaico está submetido é o da deposição de matéria particulada em sua superfície, i.e., acúmulo de sujidade. Como mostrado por Ghazi et al. (2014), esta sujidade pode ser composta por uma miríade de substâncias, sendo a mais comum delas a poeira (por poeira entende-se qualquer agregado de partículas com menos de 500 μm de diâmetro). A identidade da poeira também é diversa, podendo conter pólen, material têxtil e frequentemente minerais orgânicos, como areia e argila. Segundo Sarver et al. (2013), a origem da sujidade pode ser traçada a partir da dinâmica dos ventos, que podem transportar partículas depositadas no solo, resíduos produzidos por automóveis e a própria poluição urbana e industrial. Naturalmente, as características da sujidade e a forma como esta se deposita variam sensivelmente tanto com as condições climáticas quanto geográficas.

A caracterização da sujidade presente na superfície de módulos fotovoltaicos é baseada em uma investigação da morfologia das partículas, de sua composição química e de suas propriedades físicas. Uma análise completa deve considerar as interações da sujidade com o material no qual se deposita e com as condições ambientais em que se insere. Esforços tem sido empregados para a melhor compreensão da relação entre a sujidade e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, já que em situações extremas o sistema pode cessar seu funcionamento ou mesmo sofrer danos que comprometam significativamente sua operação (estas situações extremas podem ser observadas em ambientes desérticos caso não haja limpeza regular dos módulos), como mostrado pelo estudo desenvolvido por Makrides et al. (2012) e Ghazi et al. (2014). A Fig. 1 mostra o efeito de um acúmulo severo de sujidade na superfície de módulos fotovoltaicos instalados no Egito.

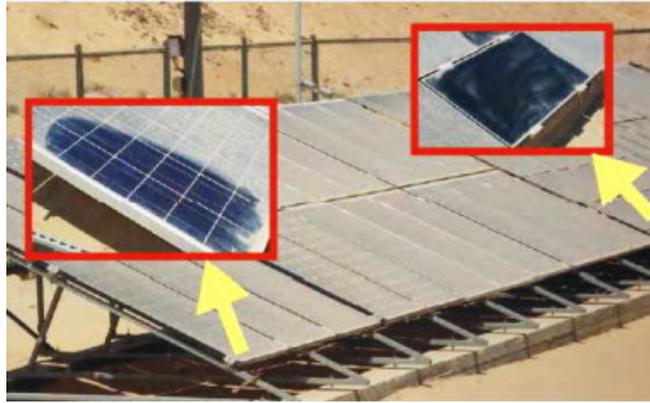


Figura 1: Instalação de módulos fotovoltaicos no Egito.

Fonte: Ghazi et al. (2014)

Com o objetivo de se executar um estudo de caso conciso acerca dos efeitos da sujidade depositada sobre a superfície de módulos fotovoltaicos, foi realizada uma caracterização físico-química das substâncias depositadas sobre os dispositivos instalados na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Esta caracterização foi realizada por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

2. SISTEMA ESTUDADO

O sistema fotovoltaico analisado se encontra instalado no telhado de um centro de aulas da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), localizada na cidade de Goiânia.

Goiânia está situada na latitude $16,68^{\circ}$ sul e longitude $49,24^{\circ}$ oeste. A temperatura média compensada anual é de $23,2^{\circ}\text{C}$ e o índice pluviométrico anual é igual a 1.570 mm. Existem duas estações bem definidas, uma seca (maio a setembro) e uma chuvosa (outubro a abril) (INMET). O sistema de geração solar fotovoltaica da EMC é composto por 145 módulos de silício policristalino da marca SUN EARTH. Cada módulo possui potência igual a 235 Wp, sendo que o sistema completo possui potência instalada igual a 34 kWp. São utilizados oito inversores da marca Eltek (seis com potência igual a 4,4 kW e dois com 2,9 kW). O arranjo físico dos módulos pode ser observado por meio da Fig. 2.

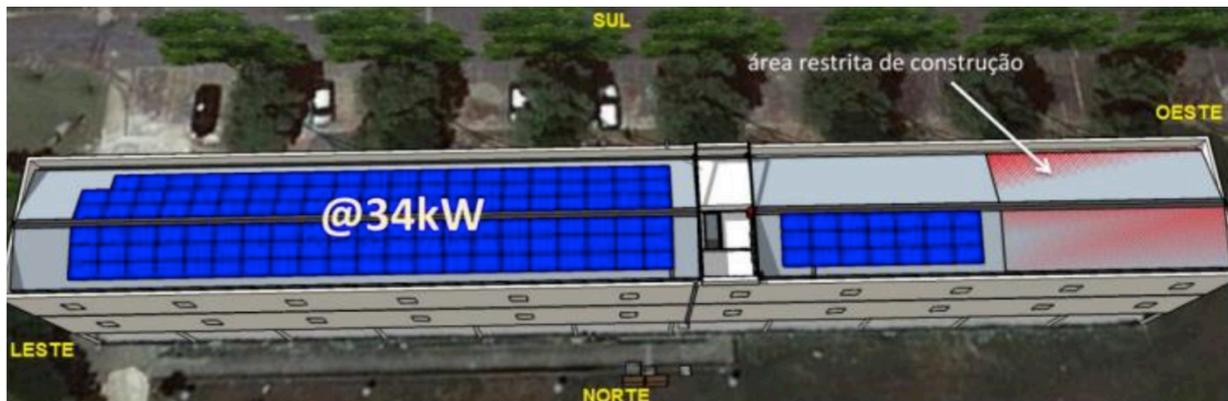


Figura 2: Configuração dos módulos da EMC.

Na mesma área onde estão instalados os módulos, encontra-se uma central meteorológica capaz de mensurar e armazenar os valores para a velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, índice pluviométrico, irradiância solar e pressão atmosférica.

A Fig. 3 mostra uma imagem capturada de uma parte do sistema de geração fotovoltaica. Na figura, nota-se a presença de algumas marcações na superfície dos módulos (indicadas pelas setas em vermelho). Estas marcações são utilizadas no acompanhamento da deposição de sujidade nos módulos, objetivando analisar a velocidade na qual o processo ocorre. Salienta-se que os módulos nunca foram limpos desde a data de sua instalação, há cerca de um ano.



Figura 3: Sujidade depositada sobre os módulos.

3. METODOLOGIA

Com a finalidade de se investigar as características físico-química da sujidade depositada sobre os módulos, foi realizada a coleta de amostras do material. A metodologia utilizada foi via raspagem com bastonetes de algodão. Foram coletadas 5 amostras no total, sendo três destas coletadas diretamente dos módulos do sistema de geração e as outras duas obtidas a partir do módulo conectado à central meteorológica. A escolha da zona de coleta foi feita qualitativamente, detendo-se a quatro tipos de sujidade observadas: manchas de coloração esbranquiçada, manchas de coloração escura, regiões onde a sujidade se mostrou visualmente uniforme e região onde a sujidade apresentou grande volume. Com exceção da amostra volumosa, todas as outras três regiões possuíam sujidade distribuída em forma de película, i.e., sem relevo. A Tab. 1 mostra a classificação utilizada para cada tipo de amostra.

Tabela 1: Classificação das amostras coletadas.

Amostra	Características
1	Regiões esbranquiçadas nos módulos
2	Manchas escuras nos módulos
3	Sujidade uniformemente distribuída sobre os módulos
4	Sujidade volumosa no módulo da central meteorológica
5	Material sedimentado sobre o módulo da central meteorológica

Após a coleta, as amostras foram isoladas em embalagens plásticas e encaminhadas para análise junto ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), localizado na UFG. Para a investigação, as amostras foram fixadas em fita adesiva de carbono sobre porta amostras de alumínio e recobertas com carbono, como material condutor. As análises morfológicas foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Jeol, modelo JSM-IT300, em baixo vácuo no modo detecção de elétrons retroespalhados (BED-C). A inspeção composicional foi realizada pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), com um detector de raios- X Oxford Instruments X-MaxN.

4. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E QUÍMICA

Os resultados das análises morfológicas via microscopia são apresentados em micrográficos, sendo que a análise da composição química é mostrada via espectro EDS.

As Fig. 4 e 5 mostram os resultados obtidos para a amostra 1.

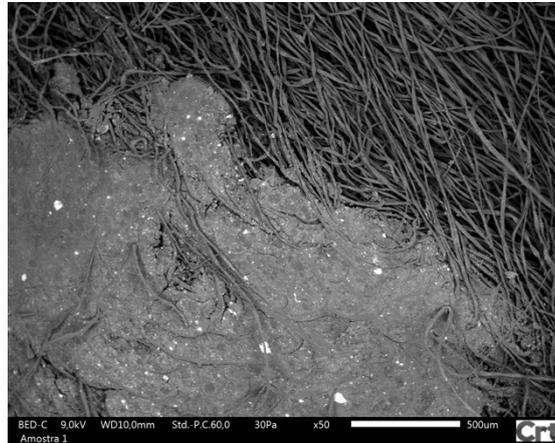


Figura 4: Micrográfico da amostra 1.

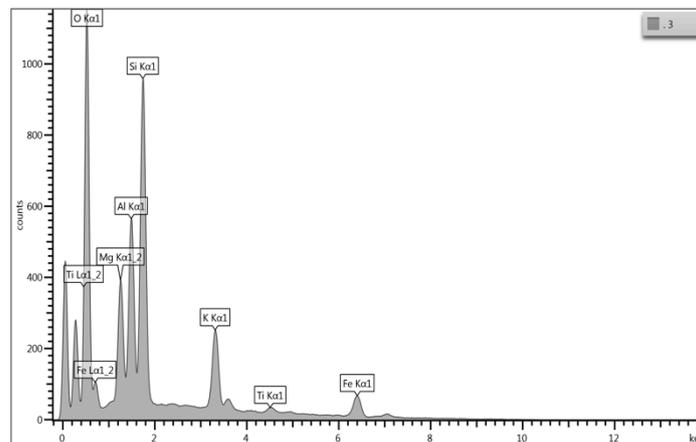


Figura 5: Espectro EDS da amostra 1.

Observa-se que a sujidade representada pela amostra 1 se apresenta aglomerada, dificultando a estimativa do tamanho das partículas que a compõem. Uma possível explicação para a aglomeração apresentada é dada por Cabanillas e Munguía (2011), onde os pesquisadores mostram que materiais orgânicos de origem urbana e da agricultura agem como substâncias "colantes", mantendo as partículas da sujidade unidas. Por meio do espectro EDS é possível analisar a composição química da amostra. A alta concentração de silício, alumínio e magnésio traz indícios da presença de minerais como quartzo e caulinita. O estudo desenvolvido por Costa et al. (2016) traz resultados semelhantes aos observados para o sistema aqui estudado. As Fig. 6 e 7 trazem os micrográficos e o espectro EDS da amostra 2.

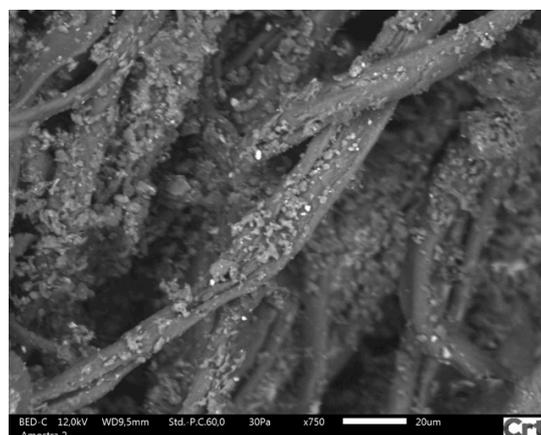


Figura 6: Micrográfico da amostra 2.

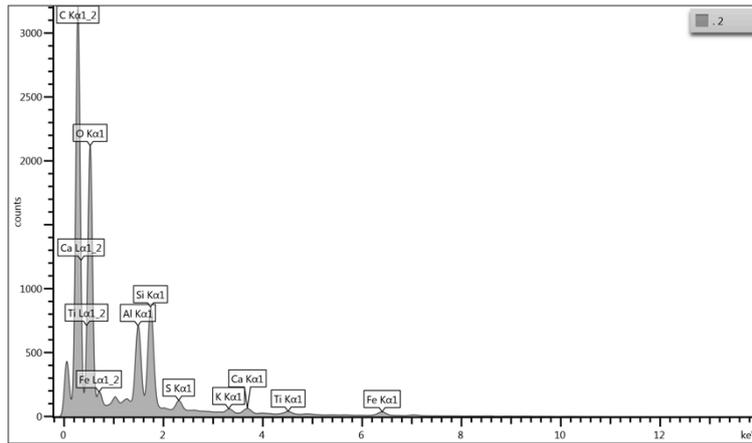


Figura 7: Espectro EDS da amostra 2.

Diferentemente da amostra 1, a sujidade representada pela amostra 2 se mostra distribuída, de modo que é possível observar que o tamanho médio das partículas é menor que 10 μm . Partículas muito pequenas apresentam grande dificuldade em sua remoção. Como mostrado por Cuddihy (1980, 1983, 1984), para partículas menores que 10 μm , as forças de atração destas aumentam com a diminuição de seus tamanhos, fazendo com que ventos de até 150 m/s sejam ineficazes em sua remoção. Appels et al. (2013) mostrou que partículas com diâmetro menor que 10 μm não foram removidas na presença de chuva. O espectro EDS mostra uma composição semelhante à da amostra 1. A alta concentração de carbono observada indica a presença de compostos orgânicos.

As Fig. 8 e 9 mostram os resultados da análise realizada na amostra 3.

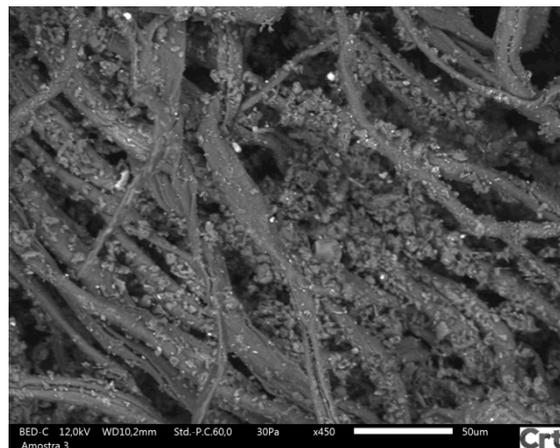


Figura 8: Micrográfico da amostra 3.

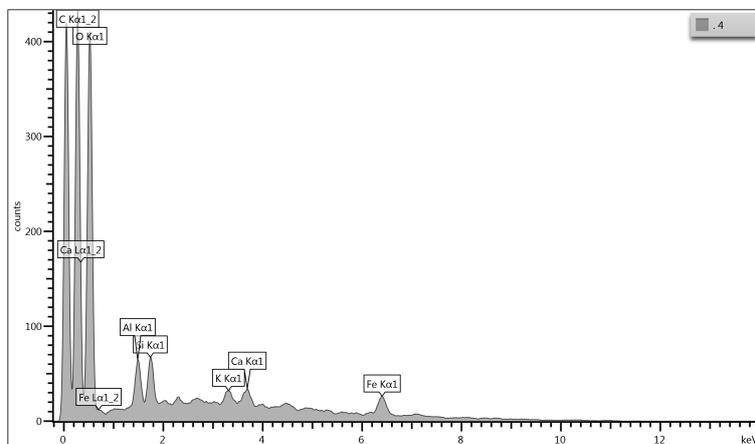


Figura 9: Espectro EDS da amostra 3.

A amostra 3 se assemelha muito à amostra 2, tanto morfológicamente quanto em sua composição química. As altas concentrações de cálcio, carbono e oxigênio encontradas são indícios da presença de carbonatos. Os resultados da amostra 4 são mostrados via Fig. 10 e 11.



Figura 10: Micrográfico da amostra 4.

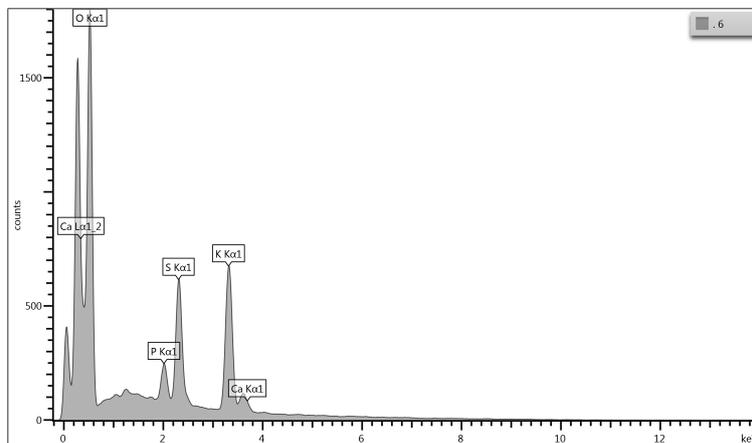


Figura 11: Espectro EDS da amostra 4.

O espectro EDS da amostra 4 apresenta alta concentração de enxofre e oxigênio, indícios da presença de ânions sulfato e/ou óxido de enxofre, produzidos a partir da queima de combustíveis fósseis. Dincer (2000) mostra que o enxofre liberado na queima deste tipo de combustível pode se depositar a seco nos módulos, na forma de dióxido de enxofre, ou por via úmida, onde o dióxido de enxofre se oxida formando ácido sulfúrico e, em seguida, se dissocia e é depositado sobre a superfície como o íon sulfato.

As Fig. 12 e 13 trazem os resultados obtidos para a amostra 5.

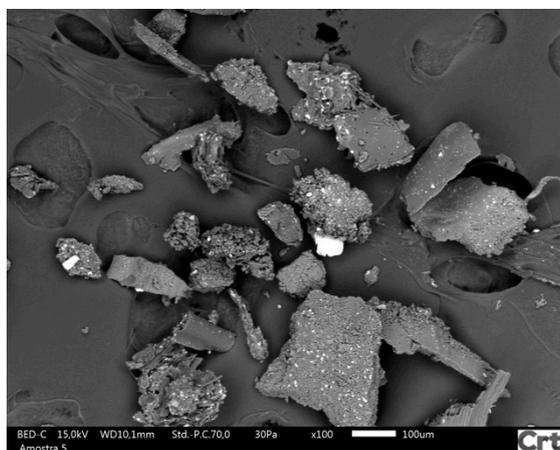


Figura 12: Micrográfico da amostra 5

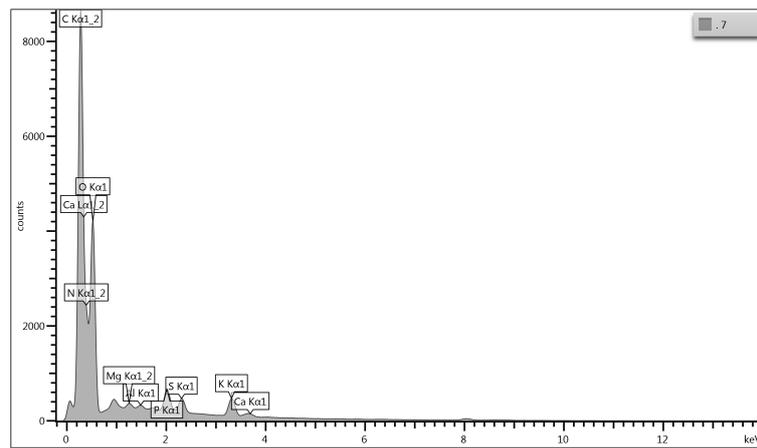


Figura 13: Espectro EDS da amostra 5.

Diferentemente das outras quatro amostras, a coleta da amostra 5 não foi feita a partir de bastonete de algodão, mas sim retirando-se uma alíquota do material sedimentado sobre o módulo. Como pode ser observado a partir da Fig. 12, esta amostra apresenta grãos muito maiores que os observados nas Fig. 4, 6, 8 e 10. Inicialmente, suspeitou-se que a sujidade representada por esta amostra seria originária de dejetos de pássaros. Esta suspeita vai ao encontro do espectro EDS, o qual apresenta altas concentrações de carbono, oxigênio, cálcio e nitrogênio. Ainda, o resultado pode ser comparado aos obtidos pelo estudo apresentado por Huang et al. (2011), onde os autores realizam uma investigação detalhada sobre as características físico-químicas de dejetos de pássaros em estruturas de rodovias.

Hammond et al. (1997) mostra em seu estudo que o impacto de dejetos de pássaros sobre módulos fotovoltaicos é muito maior que o causado pela deposição de poeira e sujeira comum. Maghami et al. (2016) mostra que a deposição destes dejetos sobre os módulos pode provocar danos severos ao dispositivo, visto que a presença deste tipo de sujidade acarreta facilmente o aparecimento de *hot spots*, diminuindo a geração do sistema e podendo até mesmo causar danos irreversíveis.

5. CONCLUSÕES

Foram coletadas diversas amostras da sujidade depositada sobre a superfície de módulos fotovoltaicos. Por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura e da espectroscopia de energia dispersiva, foi possível obter informações acerca da composição química e da morfologia da sujidade coletada. As amostras 2 e 3 apresentaram partículas na ordem de 10 μm , o que dificulta a eliminação destas por meio de chuvas e ventos. No entanto, foi observado na amostra 5 partículas bem maiores, na ordem de 100 μm . Em todas as amostras foi observada a presença de silício, indicando possível participação de areia ou de outra estrutura do dióxido de silício. Além disso, existe a possível presença de compostos orgânicos. As próximas etapas deste estudo serão voltadas para a investigação dos efeitos da sujidade no desempenho do sistema de geração solar fotovoltaica. Para isto, objetiva-se analisar a eficiência de conversão solar fotovoltaica frente ao acúmulo de sujidade na superfície dos módulos ao longo do tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado para Pedro V. V. Romanholo e ao CRTI pelas análises físico-químicas realizadas. Este trabalho foi desenvolvido via Projeto de P&D ANEEL número PD-3033-002/2014 financiado pelas Empresas: Espora Energética S/A; Transenergia Renovável S/ A (TER), Transenergia São Paulo S/A (TSP) e Caldas Novas Transmissão (CNT).

REFERÊNCIAS

- Appels, R. et al. Effect of soiling on photovoltaic modules. *Solar Energy*. Volume 96, p. 283-291, 2013.
- Cabanillas, R. E.; Munguía, H. Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Volume 3, 2011.
- Costa, S.; Abreu, A. et al. Caracterização físico-química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos instalados em zonas climáticas de Minas Gerais. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, 2016.
- Cuddihy, E. F. Theoretical considerations of soil retention. *Solar Energy Materials*. Volume 3, p. 21-33. 1980.
- Cuddihy, E. F. Surface soiling: theoretical mechanisms and evaluation of low-soiling coatings. In: *Proceedings of the flat-plate solar array project research forum on quantifying degradation*. P. 379-396. 1983.
- Cuddihy, E. F.; Willis, P. B. Antisoiling technology: theories of surface soiling and performance of antisoiling surface coatings. *Jet propulsion laboratory report*. 1984.

- Dincer, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Issue 4, p.157- 175, 1999.
- Ghazi, S.; Sayigh, A.; Ip., K. Dust effect on flat surfaces - A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Issue 33, p.742- 751, 2014.
- Hammond R.; Srinivasan D.; Harris A.; Whitfield K.; Wohlgemuth, J. Effects of soiling on PV module performance and radiometer performance. In: *Proceedings of the 26th IEEE PVSC*, Anaheim. New York. P. 1121–1124. 1997.
- Huang, C. P.; Lavenburg, G. Impacts of Bird Droppings and Deicing Salts on Highway Structures: Monitoring, Diagnosis, Prevention. *Civil and Environmental Engineering*, University of Delaware. Dezembro, 2011.
- Maghami, M.R. et al. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Issue 59, p.1307- 1316, 2016.
- Makrides, G.; Zinsser, B.; Norton, M. Performance of photovoltaics under actual operating conditions. In: Makrides, G.; Zinsser, B.; Norton, M. *Third Generation Photovoltaics*. Março, 2012.
- Sarver, T. et al. 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*. Issue 22, p.698-733, 2013.

SOILING ON PHOTOVOLTAIC MODULES INSTALLED IN GOIANIA: MORPHOLOGY AND CHEMICAL COMPOSITION

Abstract. *The fabrication technology of photovoltaic modules has greatly advanced in the last decades, offering the world cheaper and more efficient devices. Due to its intrinsic operational characteristics, these devices have to be installed in such places that there are no physical obstructions, especially those which might lead to module's surface shadowing. However, being exposed to open air environment, these devices also become exposed to climatic factors and to the existing substances in the atmosphere. Hence, suspended particles in the air start to deposit onto module's surface, compromising the operation of devices. The impact, caused by particles deposition, on photovoltaic systems depends primarily on particles morphology and chemical composition. Therefore, a physical chemical investigation was conducted on soil deposited on the surface of modules of the solar photovoltaic generation system at the Electrical, Mechanical and Computing Engineering School of Federal University of Goiás. Collected material's morphology was analyzed by means of scanning electron microscopy (SEM) and its chemical composition was examined by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Results showed nonuniform particle morphology and size ranging from 10 to 100 μm . Chemical characterization indicated the presence of minerals and organic compounds, urban pollution residues and bird dropping.*

Keywords: *Solar Energy, Dusting, Photovoltaic Modules.*