

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM ZONAS CLIMÁTICAS DE MINAS GERAIS

Suellen Caroline Silva Costa – suellencosta@gmail.com

Amanda Mello Faria Veloso Abreu – amandamabreu@yahoo.com.br

Marcelo Machado Viana – marcelomachadov@pucminas.br

Pedro Paiva Brito – pbrito@pucminas.br

Marcelus Vasconcelos de Assis – marcelus@pucminas.br

Cristiana Brasil Maia – cristiana@pucminas.br

Antonia Sonia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/Grupo de Estudos em Energia, Instituto Politécnico da PUC Minas

Lawrence Lee Kazmerski – solarpvkaz@gmail.com

Universidade do Colorado Boulder (EUA)/National Renewable Energy Laboratory (NREL)

Resumo. O aumento da participação de sistemas fotovoltaicos na matriz elétrica brasileira vem induzindo o avanço de pesquisas, visando o aprimoramento da tecnologia solar e medidas mitigadoras para garantir o desempenho esperado desses sistemas. Os fatores meteorológicos são os que mais influenciam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, a condição meteorológica do local de instalação afeta consideravelmente o acúmulo de sujidades sobre os módulos fotovoltaicos, fazendo com que parte da radiação incidente não seja transmitida. Esse trabalho tem como objetivo a identificação composicional e estrutural de sujidades depositadas sobre módulos fotovoltaicos localizados em diferentes cidades no Estado de Minas Gerais. Inicialmente, foi realizada uma análise microestrutural das partículas que compõem o material depositado. Em seguida, foram identificadas as condições meteorológicas, associando-as com as características da sujidade encontrada no local. Através dos resultados da análise físico-química foi possível observar que as amostras de sujidade coletadas nas cidades da região Norte de Minas Gerais apresentam a mesma composição de minerais, e diferentes em relação a cidade de Sete Lagoas.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Condições Meteorológicas, Caracterização da sujidade.

1. INTRODUÇÃO

A dependência por combustíveis fósseis e a preocupação com os níveis de emissões de poluentes vem incentivando o aumento da instalação de sistemas que utilizam fontes primárias renováveis. Nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos são vistos como promissores por dependerem de uma fonte limpa e abundante em todo o país: a radiação solar. Porém, o aumento da instalação de sistemas fotovoltaicos como fonte complementar às gerações tradicionais (hidrelétricas e termelétricas) implica na necessidade do avanço da pesquisa quanto ao desempenho da tecnologia fotovoltaica. O desempenho de módulos fotovoltaicos, que são os responsáveis por converter a radiação solar em energia elétrica, está associado à expectativa quanto a sua confiabilidade. De acordo com Osterwald e McMahan (2009), um módulo fotovoltaico confiável é aquele que tem alta probabilidade de realizar sua função pretendida adequadamente durante a sua vida útil sobre as condições de operação encontradas em campo. As condições meteorológicas da localidade, além de afetarem diretamente o desempenho do sistema, podem ser propícias para o maior acúmulo de sujidades sobre os módulos fotovoltaicos. Piliouguine et al. (2013) fizeram uma avaliação comparativa da energia produzida por módulos com e sem revestimento anti-sujidade. Os resultados mostraram que no período de verão os módulos sem revestimento apresentaram perdas superiores a 12% e em módulos com o revestimento essa perda foi de aproximadamente 10%.

Appels et al. (2013) avaliaram a consequência da deposição de poeira em módulos fotovoltaicos instalados na Bélgica. Os autores identificaram perdas entre 3 e 4% na potência de saída dos módulos, mesmo havendo chuva durante o período de monitoramento. Em relação às propriedades físicas da poeira encontrada, foi observado que o cimento (10 µm) é o principal causador da redução da transmitância, seguido da argila (68 µm) e areia (250 µm). A precipitação de chuva removeu as partículas maiores, por exemplo pólen (aprox. 60 µm), mas sem o mesmo efeito para partículas menores (2-10 µm).

Boyle et al. (2013) fizeram um estudo para avaliar a influência da massa das partículas acumuladas e perdas de transmissão em placas de vidro, semelhante aos vidros utilizados em módulos fotovoltaicos. Os autores utilizaram placas de vidro temperado (10 cm x 10 cm x 0,48 cm) com ângulos de inclinação de 0°, 40° e 180° instalados em *Commerce City Colorado*, região que tem várias fontes de contaminação notáveis nas proximidades, como por exemplo, várias estradas importantes, extração de areia e cascalho, e uma refinaria de petróleo. A análise dos dados

mostrou que para cada 1 g/m² de poeira que se acumulou sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos resultou em uma redução de 5,8% na transmissão de radiação.

Al-Ammri et al. (2013) avaliaram as perdas de potência de saída dos módulos fotovoltaicos monocristalinos, com potência individual de 80 W, instalados em Bagdá, no Iraque. Os autores coletaram dados dos módulos em diferentes condições durante três meses: módulo sempre limpo, módulo limpo semanalmente, módulo limpo mensalmente, e módulo com deposição contínua de poeira (sem limpeza). Os resultados mostraram que o módulo limpo semanalmente teve perdas de energia de 14,1%, enquanto que o módulo limpo mensalmente e o módulos sem limpeza apresentaram perdas de 47,8% e 58,9%, respectivamente.

De acordo com Sarver, Al-Qaraghuli e Kazmerski (2013), as perdas no desempenho de sistemas fotovoltaicos, considerando o efeito da deposição de poeira sobre os módulos, podem variar de 15 a 30% para as condições de poeira moderadas. Essa perda pode ainda ser mais significativa quando a poeira for cimentada, ou seja, combinação de umidade com poeira, dificultando a remoção.

A poeira que é depositada sobre o gerador fotovoltaico pode apresentar diferentes aspectos, variando em relação à localidade. No caso de centros urbanos, é notável a composição de carbono, devido às emissões dos veículos automotivos, apresentando uma textura semelhante a uma graxa, aderindo sobre a superfície do módulo. Nesses casos, mesmo com medidas de manutenção para a limpeza dos módulos, há dificuldade na remoção desse tipo de sujidades. Além disso, mesmo em casos em que o sistema é instalado em regiões remotas, afastadas de centros urbanos, a instalação pode ser em um local de difícil acesso, impedindo a limpeza com periodicidade.

Tendo em vista a importância em considerar os efeitos da deposição de sujidades no desempenho dos módulos fotovoltaicos, esse trabalho tem como objetivo apresentar a caracterização físico-química das sujidades coletadas em módulos instalados no Estado de Minas Gerais, nas cidades de Diamantina, Montes Claros e Sete Lagoas. A localização das cidades são indicadas na Fig. 1. Também é apresentado, o estudo referente à associação da composição das sujidades com as condições meteorológicas das cidades, visando identificar as causas para a formação da sujidade e propor medidas mitigadoras para melhorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos instalados nessas localidades.

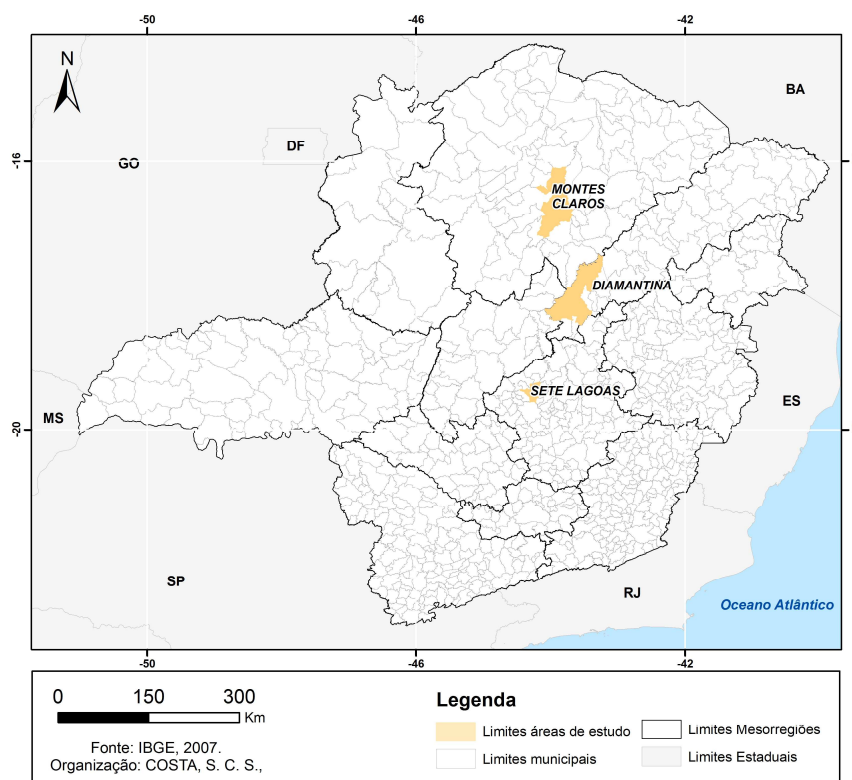


Figura 1 – Localização das cidades em Minas Gerais

2. METODOLOGIA

A caracterização físico-química das diferentes amostras de sujidade provenientes de módulos fotovoltaicos distintos instalados há mais de 10 anos foi realizada. Amostras de sujidade foram coletadas a partir de módulos fotovoltaicos instalados em três cidades de Minas Gerais recebendo a denominação:

- Sujidade 1: extraída do módulo instalado em Montes Claros
- Sujidade 2: extraída do módulo instalado em Sete Lagoas
- Sujidade 3: extraída do módulo instalado em Diamantina

As amostras foram coletadas raspando delicadamente a superfície de vidro de cada um dos módulos fotovoltaicos com uma pá plástica. As amostras de material particulado foram armazenadas em recipientes plásticos lacrados até o momento de serem submetidas às técnicas de caracterização.

Para avaliação composicional e morfológica foram utilizadas técnicas como Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O microscópio utilizado foi o de modelo Quanta 200 - FEG – FEI, com tensão de aceleração de 200 V a 30 kV, corrente do feixe >100 nA, resolução 1,6 nm a 30 kV em alto vácuo e resolução 3,5 nm a 3 kV em baixo vácuo, aumento de 12x a 1.000.000x e detector de elétrons secundários e retroespalhados. Para avaliação cristalográfica e composicional utilizou-se um difratômetro de Raios X Rigaku modelo Geigerflex - 3034, radiação filtrada do Cu K α ($\lambda= 1,54056 \text{ \AA}$), tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, constante de tempo igual a 0,5 s e velocidade de varredura de 2° min^{-1} . Fichas cristalográficas denominadas *powder diffraction file (pdf)* foram utilizadas na identificação dos minerais encontrados nas amostras.

Para caracterização climática das localidades foram utilizados dados meteorológicos de uma série histórica de 25 anos, disponibilizada pelo Instituto de Meteorologia – INMET (2015), com o intuito de identificar as médias anuais das variáveis climáticas como temperatura ambiente e índice de precipitação, entre outros. Esses dados foram tratados possibilitando a classificação das zonas climáticas para cada localidade. Com base nesses dados e na localização geográfica dessas cidades foram identificadas as influências para a deposição de sujidades sobre os módulos fotovoltaicos e as recomendações para mitigar o impacto da poeira.

3. RESULTADOS

A seguir é apresentada a caracterização das zonas climáticas para as cidades de Diamantina, Montes Claros e Sete Lagoas, considerando uma série de dados históricos das variáveis climáticas para cada localidade. Nessa seção também são indicados os resultados da análise físico-química para as poeiras encontradas sobre os módulos nessas cidades.

3.1 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas influenciam diretamente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, além de poder contribuir para o aumento da deposição de sujidades sobre os módulos FV. O índice pluviométrico elevado contribui para a limpeza dos módulos, eliminando parcialmente ou totalmente as sujidades depositadas. A condição da eliminação parcial ou total de sujidades depositadas sobre os módulos ocorre devido às características físico-químicas das partículas de poeira, sendo que algumas possuem maior facilidade de serem eliminadas que outras. Para a condição da eliminação parcial, é recomendada a limpeza mensal para a eliminação total das sujidades. A limpeza dos módulos deve ser realizada apenas utilizando água desmineralizada e materiais não abrasivos, visando não danificar a superfície do módulo.

O elevado índice da umidade relativa do ar, também pode causar impactos significativos no desempenho dos módulos fotovoltaicos, por induzir a formação do orvalho sobre os dispositivos, tendo como consequência o maior acúmulo de sujidades. Para localidades com elevada umidade relativa do ar são sugeridas limpezas mensais, podendo variar afreqüência devido ao acúmulo de sujidades.

Outro fator importante que influencia a deposição de sujidades sobre os módulos fotovoltaicos é a latitude geográfica, já que se sugere que a inclinação dos módulos solares deve ser igual à latitude da localidade. Baixas latitudes requerem menor ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, visando o ganho máximo solar, porém a menor inclinação propicia maior acúmulo de sujidades. Assim, antes de se definir alguma medida, deve-se comparar o impacto no desempenho do sistema para a situação de menor ângulo de inclinação (maior deposição de sujidades), e maior inclinação dos módulos fotovoltaicos (influencia na incidência da radiação solar).

De acordo com Sá Junior (2009), um dos sistemas de classificação climática mais abrangente é o Köppen-Geiger, que foi elaborado em 1900 por Wladimir Köppen, e modificado nos anos seguintes com a colaboração do meteorologista e climatologista alemão Rudolf Geiger, visando aperfeiçoar o modelo para caracterização das zonas climáticas. Segundo essa classificação, as cidades de Diamantina e Sete Lagoas estão inseridas na zona climática mesotérmica, classificada como Cwa por Köppen-Geiger, em que o inverno é seco e o verão é moderado a quente. A cidade de Montes Claros, clima classe Aw, está sob a influência do clima tropical (megatérmico), com estação seca no inverno. Na Tab. 1 são indicadas as características climáticas de cada localidade.

Tabela 1 – Localização geográfica e características climáticas para as cidades

Cidade	Localização		Altitude (m)	Temperatura ambiente (°C)	Precipitação (mm)
	Latitude	Longitude			
Diamantina	18,25° S	43,60° W	1.293	16-23	1.285
Montes Claros	16,73° S	43,86° W	668,7	22-29	965
Sete Lagoas	19,47° S	44,25° W	761,3	18-24	1.286

Fonte: INMET (2015)

A Fig. 2 apresenta as temperaturas médias anuais entre os anos de 1990 a 2014 para as cidades de Diamantina, Montes Claros e Sete Lagoas, obtidas a partir de INMET (2015). A temperatura média observada na série histórica para a cidade de Diamantina foi de 19,24 °C. Já para as cidades de Montes Claros e Sete Lagoas, as médias da temperatura ambiente foram 24,02 °C e 22,18 °C, respectivamente.

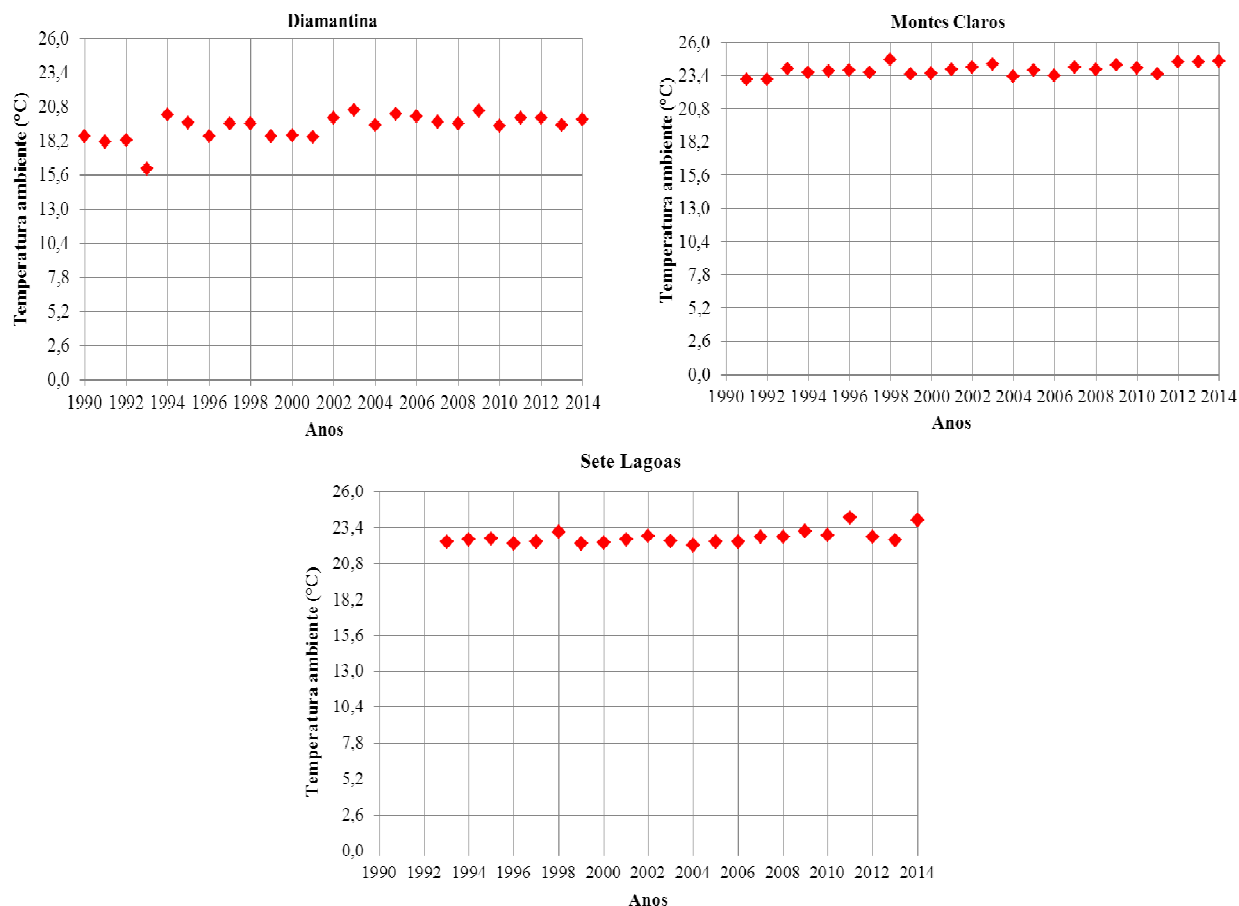


Figura 2 – Temperatura média anual para as cidades de Diamantina, Montes Claros e Sete Lagoas
Fonte: INMET (2015)

A cidade de Diamantina é a que possui menor temperatura ambiente média anual, devido à sua altitude. Apesar de estar localizada próxima ao Vale do Jequitinhonha, região caracterizada por longos períodos de seca e baixa umidade, a cidade de Diamantina apresenta elevado índice pluviométrico e de umidade relativa do ar.

A cidade de Montes Claros é a que apresenta maiores índices de temperatura ambiente média anual, como consequência da baixa altitude e de sua localização na zona climática tropical, possuindo clima quente e seco, com período de chuvas concentradas entre os meses de outubro e março. A cidade de Sete Lagoas, apesar de possuir baixa altitude, semelhante à de Montes Claros, está inserida na zona climática mesotérmica, com verões quentes e chuvosos e invernos secos. É importante ressaltar que os índices meteorológicos indicados nesse trabalho variam de ano para ano, e que em relação à temperatura ambiente, é possível notar um aumento desse índice nos últimos anos em comparação com os dados iniciais da série avaliada.

3.2 Análise físico-química da sujidade

A Fig. 3 mostra os difratogramas das amostras de sujidades coletadas. Picos característicos de fases cristalinas foram indexados para minerais como quartzo (*pdf number* 1-649), hematita (*pdf number* 1-1053) e caulinita (*pdf number* 1-527) encontrados em todas as amostras. Para as amostras de sujidade 1 e 2, extraídas de cidades do norte de Minas Gerais, foram identificados os minerais calcita (*pdf number* 1-837) e gipsita (*pdf number* 1-578). Na amostra de sujidade 3 o mineral dióxido de titânio (*pdf number* 1-1292) em sua fase cristalográfica rutilo foi identificado. É notável a predominância de partículas de calcita e quartzo na amostras de sujidades 1 e 2. Elminir et al. (2006) realizaram extensivas caracterizações das partículas de sujidade, depositadas em módulos fotovoltaicos instalados na região de Helwan, no Egito, identificando que a maior parte da sujidade dessa região é composta principalmente por quartzo e calcita, contendo ainda pequena quantidade de dolomita e minerais de argila. Morris (1980) também analisou amostras de sujidade originárias de Daggett na Califórnia por Difratometria de Raios X identificando em suas amostras quartzo, feldspato, calcita, micas, gipsita e caulinita.

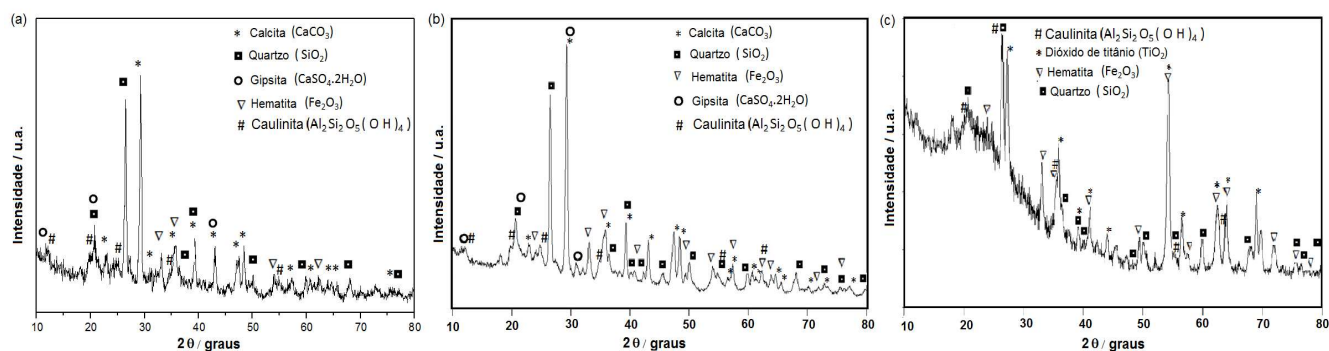


Figura 3 - Difratomogramas de Raios X das amostras de (a) sujidade 1, (b) sujidade 2 e (c) sujidade 3

A Fig. 4 apresenta micrografias para a amostra de sujidade 1 e os respectivos espectros EDS identificando os principais elementos que compõem essa amostra.

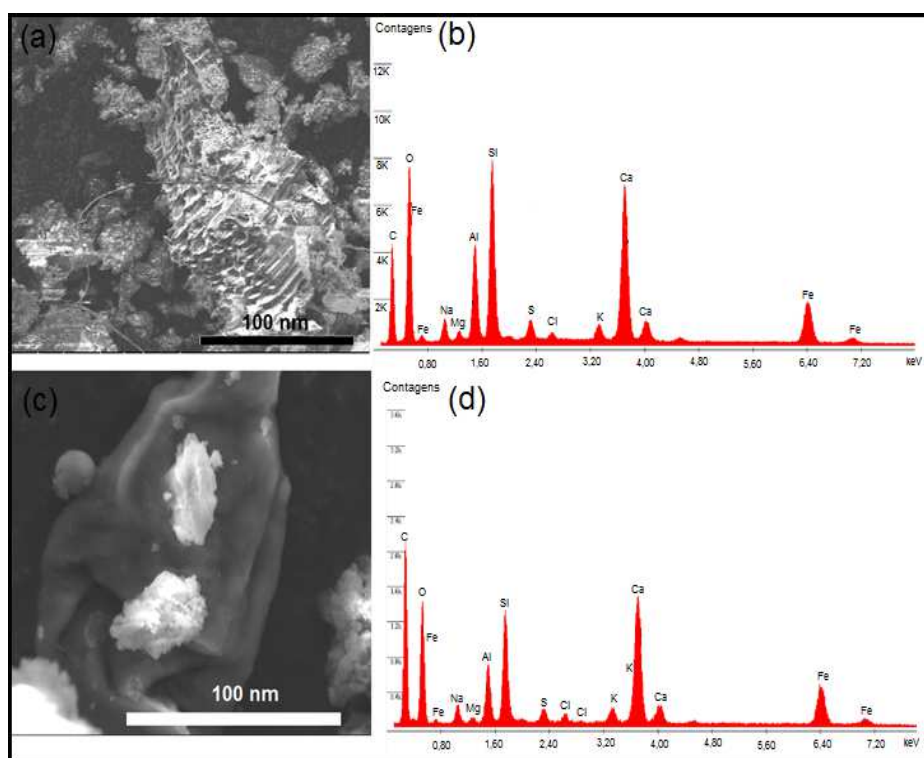


Figura 4 - (a) e (c) Imagens de microscopia eletrônica de varredura e (b) e (d) espectros EDS para a amostra de sujidade 1

Pode ser observado na Fig. 4 que as partículas são heterogêneas em forma e sua distribuição de tamanho é ampla, com partículas tendo dimensões de 0,5 μm a 100 μm . A maior parte das partículas tem dimensões na ordem de 10 μm . Elementos como carbono, oxigênio, ferro, alumínio, silício, enxofre e cálcio são predominantemente encontrados, o que corrobora os resultados de difratometria de Raios X. O elemento enxofre é geralmente identificado associado a esses tipos de sujidade e é proveniente da queima de combustíveis fósseis.

A amostra de sujidade 2, Fig. 5, apresenta partículas com morfologias variadas e apresenta composição química semelhante à amostra de sujidade 1. Partículas esféricas de hematita com dimensões próximas a 4 μm são comuns nessa amostra, como mostrado na Figura 5c. Elminir et al. (2006) também avaliaram por EDS as sujidades encontradas na região do Egito, confirmando a presença de silicatos e feldspatos. Este estudo também relata a caracterização física e química de poeiras depositadas em outras localidades como Líbia, Arábia Saudita, Ornan e Bahrein, onde os elementos sódio e cloro aparecem em elevadas quantidades devido à proximidade do mar Mediterrâneo e do Golfo Pérsico.

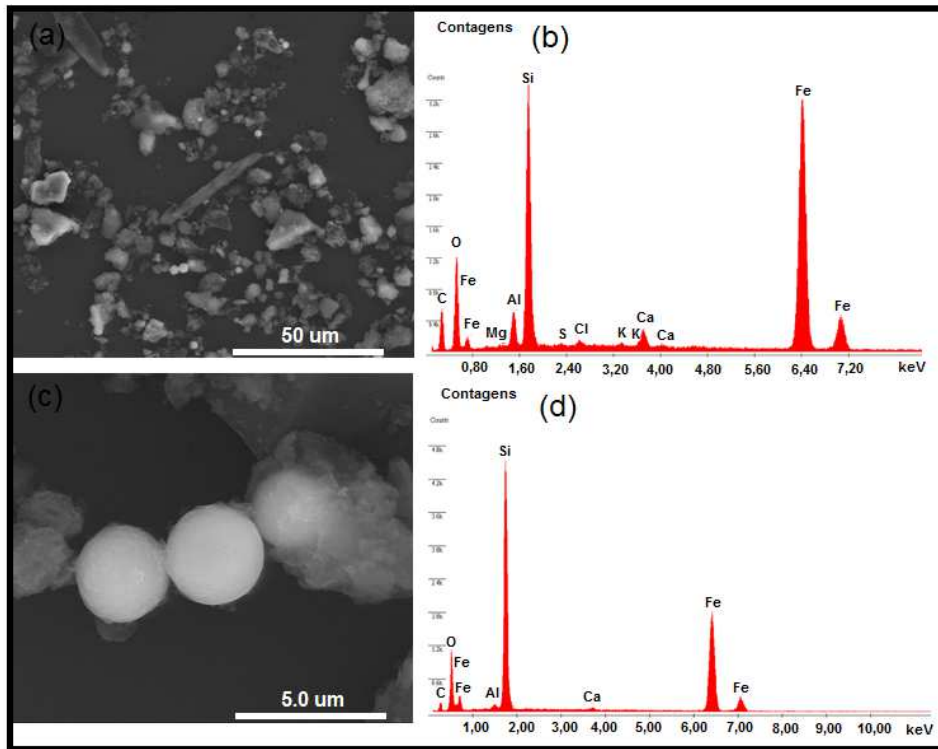


Figura 5 - (a) e (c) Imagens de microscopia eletrônica de varredura e (b) e (d) espectros EDS para a amostra de sujidade 2.

A Fig. 6 apresenta imagens obtidas por elétrons retroespalhados para a amostra de sujidade 3, em que é possível visualizar a presença das partículas com maior brilho constituídas por hematita (Figura 6c).

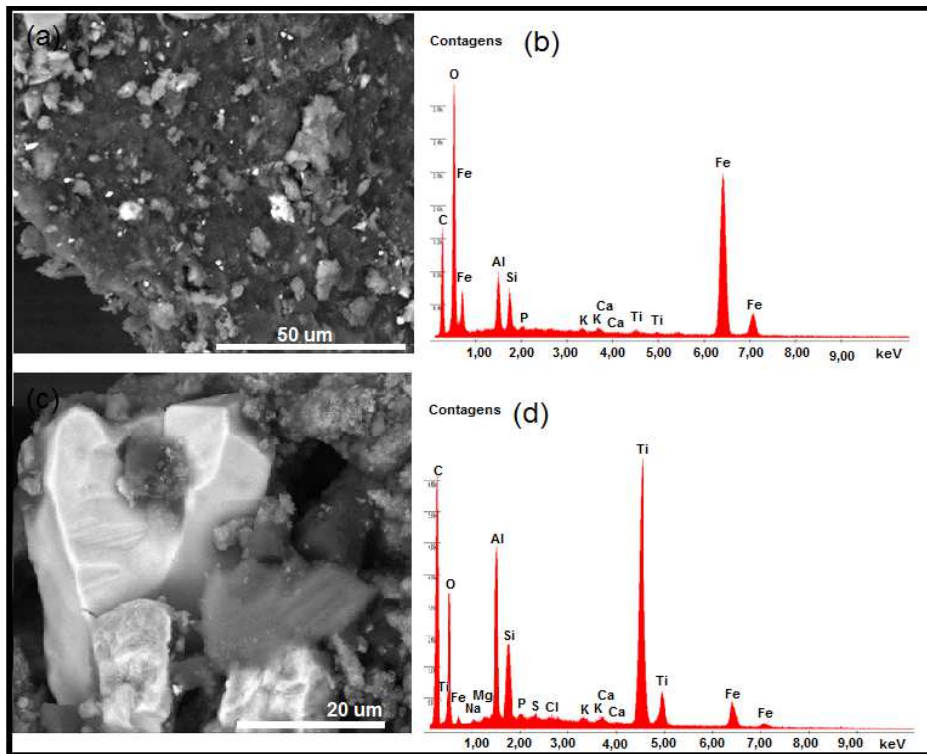


Figura 6 - (a) e (c) Imagens de microscopia eletrônica de varredura e (b) e (d) espectros EDS para a amostra de sujidade 3.

A presença do elemento titânio é evidente nos espectros de EDS mostrados. Para esta amostra, apresentada na Fig. 6, é comum a presença de um material mais aglomerado que contém partículas com elevada heterogeneidade em morfologia. Sayigh et al. (1985) também estudaram sujidades encontradas em módulos fotovoltaicos no Kuwait por microscopia eletrônica de varredura e visualizaram grãos com morfologias variadas.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou a definição das zonas climáticas das localidades em que foram coletadas as amostras de sujidades encontradas sobre módulos fotovoltaicos, resultando na indicação dos índices médios anuais das variáveis climáticas através do levantamento de uma série histórica. Com base nesse estudo, foram indicadas as influências da localização geográfica e das características das zonas climáticas na deposição de sujidades, além de recomendações que possam minimizar o impacto desse fator sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos. Para o elevado índice de umidade relativa do ar foi recomendada a limpeza mensal dos módulos, já que essa variável climática induz a formação de orvalho sobre os módulos, acarretando em um maior acúmulo de sujidades. Já o elevado índice de precipitação pode contribuir para a limpeza parcial ou total da sujidade.

Em relação à caracterização morfológica, estrutural e composicional das sujidades presentes nos módulos fotovoltaicos instalados no estado de Minas Gerais, foi possível indentificar por difratometria de Raios X os minerais que constituem as sujidades características de cada região selecionada. Para a região do Norte de Minas foram identificados os mesmos minerais enquanto para a cidade de Sete Lagoas, pertencente à região metropolitana de Belo Horizonte, foi identificada o mineral rutilo, não presente nas amostras de sujidade das cidades do Norte de Minas. As próximas etapas deste trabalho envolvem a identificação de características da localidade em que os módulos fotovoltaicos estavam instalados, como presença de indústrias, vegetação e poluição do ar, para correlação composicional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Al-Ammri, A. S.; Ghazi, A.; Mustafa, F. Dust effects on the performance of PV street light in Baghdad city. Proc. Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013 International, 18–22, 2013.
- Appels, R.; Lefevre, B.; Herteleer, B.; Goverde, H.; Beerten, A.; Paesen, R.; Medts, K.; Driesen, J.; Poortmans, J. Effect of soiling on photovoltaic modules. Solar Energy, v. 96, p. 283 – 291, 2013.
- Boyle, L., H. Flinchpaugh, and M. Hannigan. “Impact of natural soiling on the transmission of PV cover plates.” Proc. 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (IEEE, NY; 2013) pp. 3276–78.
- Elminir, H.K.; Ghitas, A.E.; Hamid, R.H.; El-Hussainy, F.; Beheary, M.M.; Abdel-Moneim, K.M. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. Energy Conservation and Management 2006;47:3192–203.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) – Dados históricos. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acessado em: 10 out. 2015.
- Mani, M.; Pillai, R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, p. 3124 – 3131, 2010.
- Morris VL. Cleaning agents and techniques for concentrating solar collectors. Solar Energy Materials, v. 3, p. 35–55, 1980.
- Osterwald, C. e McMahon, T. History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 17, p. 11– 33, 2009.
- Piliouline, M.; Cañete, C.; Moreno, R.; Carretero, J.; Hirose, J.; Ogawa, S.; Sidrach-De-Cardona, M. Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates. Applied Energy, v. 112, p. 626 – 634, 2013.
- Sá Júnior, A. Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais. 2009. 113 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras – Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola.
- 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.
- Sayigh AAM, Al-Jandal S, Ahmed H. Dust effect on solar flat surfaces devices in Kuwait. In: Proceedings of the international symposium on thermal application of solar energy. Hakone, Japan ; p. 95–100, 1985.

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DIRT PLACED ON MODULES PHOTOVOLTAIC INSTALLED ON CLIMATE ZONES OF MINAS GERAIS

Abstract. *The participation increase of photovoltaic systems in the Brazilian electrical matrix comes inducing the advancement of research, aiming the improvement of solar technology and mitigation actions to ensure the expected performance of these systems. The meteorological factors are those that most influence the performance of photovoltaic*

systems. Furthermore, the weather condition of the installation site affects considerably the accumulation of dirt on the solar modules, so that part of the incident radiation is not transmitted. This paper aims the compositional and structural identification of dirt deposited on photovoltaic modules located in different cities in the state of Minas Gerais. Initially, it was made a microstructure analysis of particles comprising the deposited material. Then the weather conditions were identified by associating them with the characteristics of dirt of the features found on site. Through the results of physical-chemical analysis it was observed that the dust samples collected in the cities of the northern region of Minas Gerais have the same composition of minerals, and different over the city of Sete Lagoas.

Key words: *Photovoltaic Systems, Meteorological Conditions, Characterization of Dirt.*