



A Importância da Energia Solar para o Desenvolvimento Sustentável

**Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)**

Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)

A Importância da Energia Solar para o Desenvolvimento Sustentável

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Lorena Prestes
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.ª Dr.ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
134	<p>A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-616-4 DOI 10.22533/at.ed.003190309</p> <p>1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia solar. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Oliveira, Jaqueline Rezende.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.47</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÕES	
Frank Wesley Rodrigues Kaique Rhuan de Azevedo Albuquerque Joel Adelaide Medeiros Jonathan Jefferson Pereira Moura Diego Henrique da Silva Cavalcanti Rafael Pereira de Medeiros Hugo Rojas Espinoza	
DOI 10.22533/at.ed.0031903091	
CAPÍTULO 2	10
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO CENTRO DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL DA ARCELOR MITTAL TUBARÃO	
Bruna Machado Christ Stefanie Lievore Cruz Warley Teixeira Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.0031903092	
CAPÍTULO 3	22
ANÁLISE DE MERCADO DE TECNOLOGIA SOLAR FOTOTÉRMICA E PROPOSTA DE MODELO DE NEGÓCIO	
Ricardo Alberto Rodríguez-Carvajal Rafael García Gutierrez Paula C. Isiordia-Lachica Martín Picón Nuñez Jesús Hernández Ruíz German Eduardo Devora-Isiordia	
DOI 10.22533/at.ed.0031903093	
CAPÍTULO 4	36
ANÁLISES DE EFEITOS EXTERNOS SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TAIS COMO ASSOCIAÇÃO E SOMBREAMENTO POR MEIO DO ATP	
Leonardo Rosenthal Caetano Silva Jaqueline Oliveira Rezende Geraldo Caixeta Guimarães Raul Vitor Arantes Monteiro	
DOI 10.22533/at.ed.0031903094	
CAPÍTULO 5	50
ANÁLISE 2E DE UM SISTEMA SOLAR PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO ÓPTICA ANIDÓLICA	
Eduardo González-Mora Eduardo Armando Rincón-Mejía	
DOI 10.22533/at.ed.0031903095	
CAPÍTULO 6	64
DISEÑO DE SISTEMAS HIBRIDOS FV-H ₂	
Fernando Gutiérrez-Martín	
DOI 10.22533/at.ed.0031903096	

CAPÍTULO 7	74
FUNDAMENTOS E MEIOS DE UNIDADE FOTOVOLTAICA ARREFECIDA CONTENDO ASPECTOS TÉCNICOS E GEOGRÁFICOS	
<ul style="list-style-type: none"> André Luiz Veiga Gimenes Pascoal Henrique da Costa Rigolin Angélica Luana Linhares Vinícius Oliveira da Silva Stefania Gomes Relva Miguel Edgar Morales Udaeta 	
DOI 10.22533/at.ed.0031903097	
CAPÍTULO 8	91
ACEPÇÃO E VALIDAÇÃO PROCEDIMENTAL DE SISTEMA ARREFECEDOR MODULAR PARA USINA FOTOVOLTAICA	
<ul style="list-style-type: none"> André Luiz Veiga Gimenes Pascoal Henrique da Costa Rigolin Angélica Luana Linhares Vinícius Oliveira da Silva Diego Biaseto Bernhard Miguel Edgar Morales Udaeta 	
DOI 10.22533/at.ed.0031903098	
CAPÍTULO 9	105
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM ZONAS CLIMÁTICAS DE MINAS GERAIS	
<ul style="list-style-type: none"> Suellen Caroline Silva Costa Amanda Mello Faria Veloso Abreu Marcelo Machado Viana Pedro Paiva Brito Cristiana Brasil Maia Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz Lawrence Lee Kazmerski 	
DOI 10.22533/at.ed.0031903099	
CAPÍTULO 10	119
SIMVR-SOLAR: FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE REALIDADE VIRTUAL PARA PROJETO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	
<ul style="list-style-type: none"> Cleber Onofre Inácio Hugo Tavares Vieira Gouveia Ismael Humberto Ferreira dos Santos Luiz Fernando Almeida Fontenele Paulo Henrique Fernandes Ferreira Rodrigo Guido Araújo 	
DOI 10.22533/at.ed.00319030910	
CAPÍTULO 11	133
GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE IRRADIAÇÃO DIÁRIA PARA AS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS BRASILEIRAS	
<ul style="list-style-type: none"> Cleber Onofre Inácio Hugo Tavares Vieira Gouveia Luiz Fernando Almeida Fontenele Paulo Henrique Fernandes Ferreira 	
DOI 10.22533/at.ed.00319030911	

CAPÍTULO 12 147

GERENCIAMENTO DE REDES DE ENERGIA INTELIGENTES (REI) EMPREGANDO ANÁLISE POR MODELO PREDITIVO ATRAVÉS DE REDES MODULARES EXPANSÍVEIS DE INSTRUMENTAÇÃO

Elói Fonseca

José Francisco Resende da Silva

Victor Hugo Paezane dos Anjos

Diego Henrique do Amaral

Gabriel de Souza Cordeiro

Naiara de Souza Lima

Bruna Malaguti

Felipe Emanuel Sales

DOI 10.22533/at.ed.00319030912

SOBRE A ORGANIZADORA 154

ÍNDICE REMISSIVO 155

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

Suellen Caroline Silva Costa

Amanda Mello Faria Veloso Abreu

Marcelo Machado Viana

Pedro Paiva Brito

Cristiana Brasil Maia

Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas)/Pós-Graduação Engenharia Mecânica/Grupo de Estudos em Energia (GREEN-IPUC)

Belo Horizonte – Minas Gerais

Lawrence Lee Kazmerski

Colorado University (Boulder)/National Renewable Energy Laboratory (NREL)
Golden – Estados Unidos

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.

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 soiling on the solar modules, so that part of the incident radiation is not transmitted. This paper aims the compositional

and structural identification of soiling 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 soiling 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.

KEYWORDS: Photovoltaic Systems, Meteorological Conditions, Characterization of Soiling.

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 McMahon (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. Existem fatores que afetam o desempenho de módulos fotovoltaicos interferindo na confiabilidade da produção e reduzindo a sua vida útil; entre os principais estão a elevação da temperatura de operação e a deposição de sujidades. O grande impasse é que esses fatores são mais agravantes em regiões em que a instalação dessa tecnologia é vantajosa, por apresentarem elevada incidência de irradiância solar; porém possuem, normalmente, altas temperaturas e longos períodos secos, o que contribui para o acúmulo de sujidades e o surgimento de pontos quentes no módulo fotovoltaico. Segundo Piliouline e outros (2013), a deposição de sujidade sobre os módulos fotovoltaicos diminui a transmitância e produz perdas de energia média anual de até 3,3%, dependendo da composição físico-química da sujidade, percentual esse significativo para a tecnologia solar fotovoltaica.

Appels e outros (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 ($10 \mu\text{m}$) é o principal causador da redução da transmitância, seguido da argila ($68 \mu\text{m}$) e areia ($250 \mu\text{m}$). A precipitação de chuva removeu as

partículas maiores, por exemplo, pólen (aprox. $60 \mu\text{m}$), mas sem o mesmo efeito para partículas menores ($2\text{-}10 \mu\text{m}$).

Al-Sabounchi, Yalyali e Al-Thani (2013) avaliaram o desempenho de um sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica com uma capacidade instalada de 36 kWp, instalado em Abu Dhabi, nos Emirados Árabes. Nesse estudo, os autores avaliaram a produção de energia e o comportamento da tensão e da corrente dos módulos em relação à temperatura ambiente, à irradiância solar e à deposição de sujidades características da região. Os autores observaram que a taxa de aumento da temperatura da célula é maior do que a taxa de aumento da temperatura ambiente, e que a razão da produção (potência máxima fotovoltaica pela irradiância solar) pode reduzir em cerca de 20% quando a temperatura de operação varia de $39 \text{ }^\circ\text{C}$ para $78 \text{ }^\circ\text{C}$. No que diz respeito à deposição de poeira, a maior redução na produção de energia foi registrada ao longo de julho, estação de verão, atingindo em torno de 27%, devido à sua elevada média diária total de partículas de poeira em suspensão no ar (TSP), atingindo $860 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Já os meses de março e maio, compreendido no período da primavera, apresentaram $507 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de TSP, respectivamente.

Boyle e outros (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 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 0,48 \text{ cm}$) 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 de tráfego intenso, extração de areia e cascalho, e uma refinaria de petróleo. A análise dos dados mostrou que para cada $1 \text{ g}/\text{m}^2$ de poeira que se acumulou sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos resultou em uma redução de 5,8% na transmissão de radiação.

Al-Ammri e outros (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.

Naeem e Tamizhmani (2015) avaliaram as perdas por sujidade em módulos instalados com inclinação de 20° , considerando a influência das condições meteorológicas ao longo de períodos secos e úmidos na região do Arizona, nos Estados Unidos. Para isso, foram realizadas medições da corrente de curto-circuito de 24 módulos fotovoltaicos em intervalos de um minuto, juntamente com a medição da temperatura de operação do módulo, e dados meteorológicos. Os autores observaram que a chuva mais intensa pode funcionar como agente de limpeza em módulos sujos, enquanto a chuva leve pode atuar como agente de limpeza ou contribuir para o

aumento da adesão de sujidades sobre a superfície do módulo fotovoltaico, devido à possibilidade de sedimentação da poeira. Além disso, as tempestades de poeira, acompanhadas por chuva leve no Arizona, contribuíram para um aumento de perdas de 0,62%, sendo considerado um fator não agravante. Os resultados mostraram uma relação entre a taxa de sujidade e as variáveis meteorológicas, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Para elevados índices de umidade relativa do ar, a taxa de sujidade aumenta, enquanto, para altas velocidades do vento, a taxa de sujidade apresenta efeito inverso.

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. Costa (2011) identificou uma perda em torno de 30% em um sistema fotovoltaico instalado em Belo Horizonte, próximo a uma via de intenso tráfego de veículos, devido à deposição de sujidade de elevada aderência, dificultando a limpeza dos módulos fotovoltaicos. 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.

Kazmerski e outros (2016) avaliaram interações fundamentais entre partículas de poeira/sujidade com várias superfícies de módulos fotovoltaicos, investigando a composição química, morfologia e adesão. A análise da adesão da partícula à superfície foi realizada utilizando a técnica de Microscopia de Força Atômica (AFM). Os autores mediram a força de adesão da partícula através da curvatura do cantilever (alavanca que fica presa à sonda) à medida que a partícula era puxada pela sonda. A análise composicional e morfológica das partículas foi realizada utilizando técnicas como Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados da composição foram obtidos para amostras coletadas no Brasil, provenientes de uma área rural e de uma área urbana próxima à rodovia com tráfego intenso. A análise química e morfológica mostrou componentes de combustível (diesel) na amostra coletada na área urbana. Já a amostra para a área rural indicou a presença, em grande parte, de componentes de silicatos secundários, produtos agrícolas e minerais específicos da localidade. Em relação à adesão, os resultados mostraram que a partícula com conteúdo significativo de superfície orgânica possui maior força de adesão em relação à partícula típica com baixo ou nenhum conteúdo orgânico sob condições secas. Além disso, partículas com conteúdo orgânico e secas,

após serem expostas às condições de umidade elevada, apresentaram maior força de adesão, devido ao processo de cementação. Os testes realizados, utilizando superfícies super-hidrofóbica e super-hidrofílica, mostraram redução significativa na força de adesão seja para partícula sem ou com conteúdo orgânico e para partícula cementada. A Fig. 1 mostra um gerador fotovoltaico instalado em Belo Horizonte, próximo a uma via de elevado tráfego. Uma amostra de sujeira desse gerador foi estudada por Lemos (2016) que identificou a existência de matéria orgânica em sua composição, com elevado percentual de carbono, e presença de biofilme formada por microrganismos de difícil remoção por limpeza natural como chuvas e ventos.



Figura 1 – Localização das cidades em Minas Gerais.

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 é indicada na Fig. 2. 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 sujeira e propor medidas mitigadoras para melhorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos instalados nessas localidades.

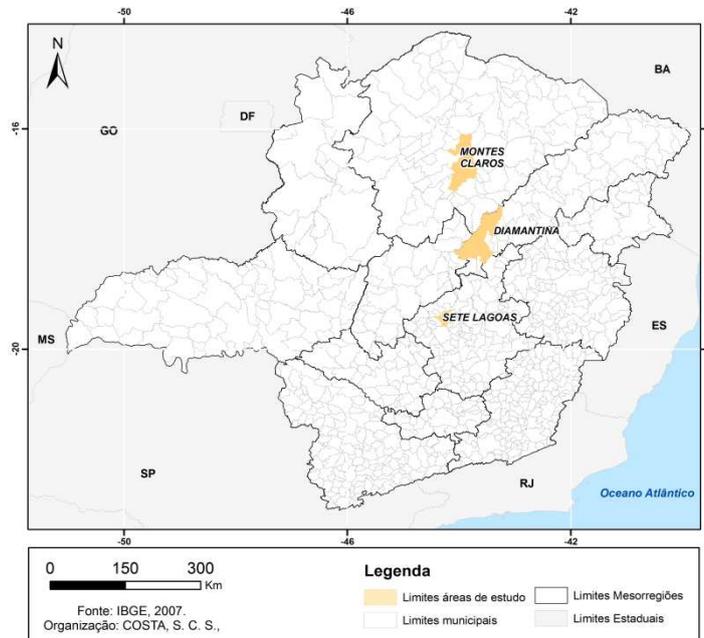


Figura 2 – Localização das cidades em Minas Gerais.

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 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 fotovoltaicos instalados 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 fotovoltaicos. 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 acúmulo de sujidades com maior força de adesão (cimentação da sujidade). Kazmerski e outros (2015, 2016) indicaram o processo de cimentação de partículas de sujidades sobre a superfície de módulos fotovoltaicos instalados na Arábia Saudita e no Brasil, sob condições de umidade e força de adesão significativamente elevada, devido às concentrações de material orgânico/mineral que ligam quimicamente a partícula à superfície sob a influência de água/umidade. Para localidades com elevada umidade relativa do ar são sugeridas limpezas mensais, podendo variar a frequência devido ao acúmulo de sujidades.

Além disso, a precipitação e a elevada umidade relativa do ar podem contribuir para formação de gotas d'água sobre a superfície do módulo fotovoltaico fazendo com

que parte da irradiância incidente sobre o dispositivo seja refletida. A Fig. 3 mostra a presença de gotas d'água sobre um módulo fotovoltaico de telureto de cádmio, instalado em Belo Horizonte, formada devido a elevada umidade relativa do ar no período noturno.



Figura 3 – Módulo de telureto de cádmio com gotas d'água formada pela elevada umidade relativa.

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. Cano e outros (2014) identificaram que quanto menor a inclinação do minimódulo, ou seja, mais próxima da posição horizontal, as perdas por sujidade aumentam, chegando a uma média de 2,02% de perdas com ângulo de inclinação de 0° , enquanto que, para inclinação de 40° , esta perda reduz para 0,69%. 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.

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

Tabela 1 – Localização geográfica e características climáticas para as cidades

Fonte: INMET (2015)

A Fig. 4 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.

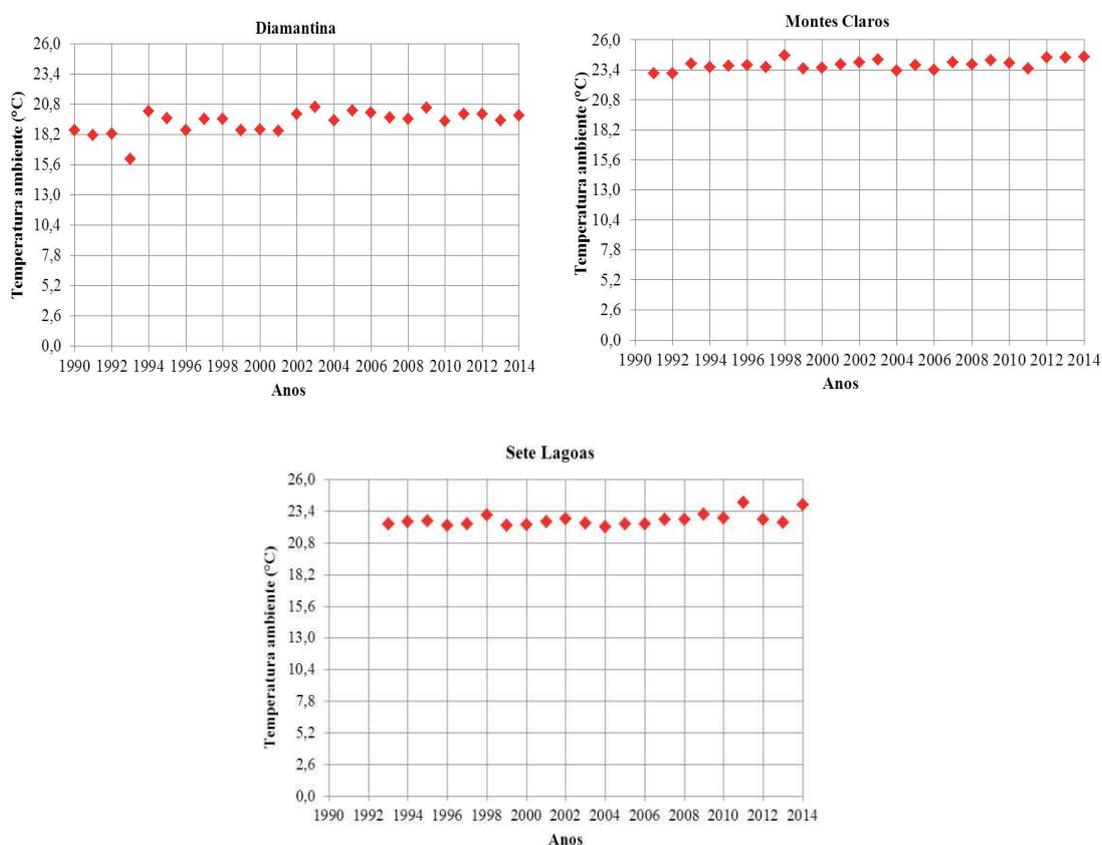


Figura 4 – Temperatura média anual para as cidades de Diamantina, Montes Claros e Sete Lagoas

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 elevados índices 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. 5 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 e outros (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 Difractometria de Raios X identificando em suas amostras quartzo, feldspato, calcita, micas, gipsita e caulinita.

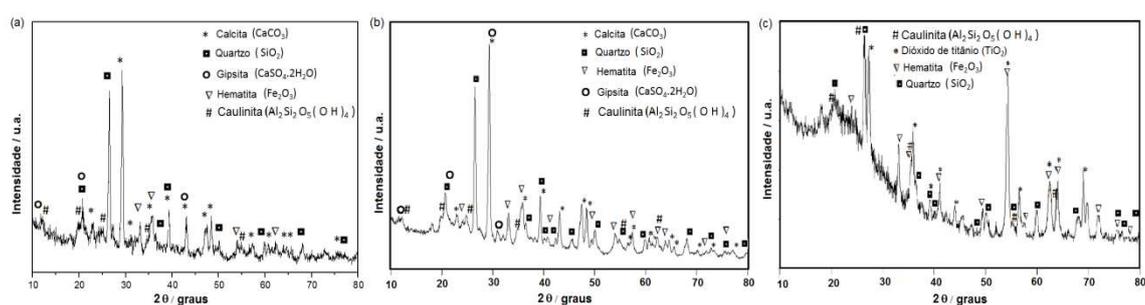


Figura 5 - Difratomogramas de Raios X das amostras de (a) sujidade 1, (b) sujidade 2 e (c) sujidade 3.

A Fig. 6 apresenta micrografias para a amostra de sujidade 1 e os respectivos espectros EDS identificando os principais elementos que compõem essa amostra.

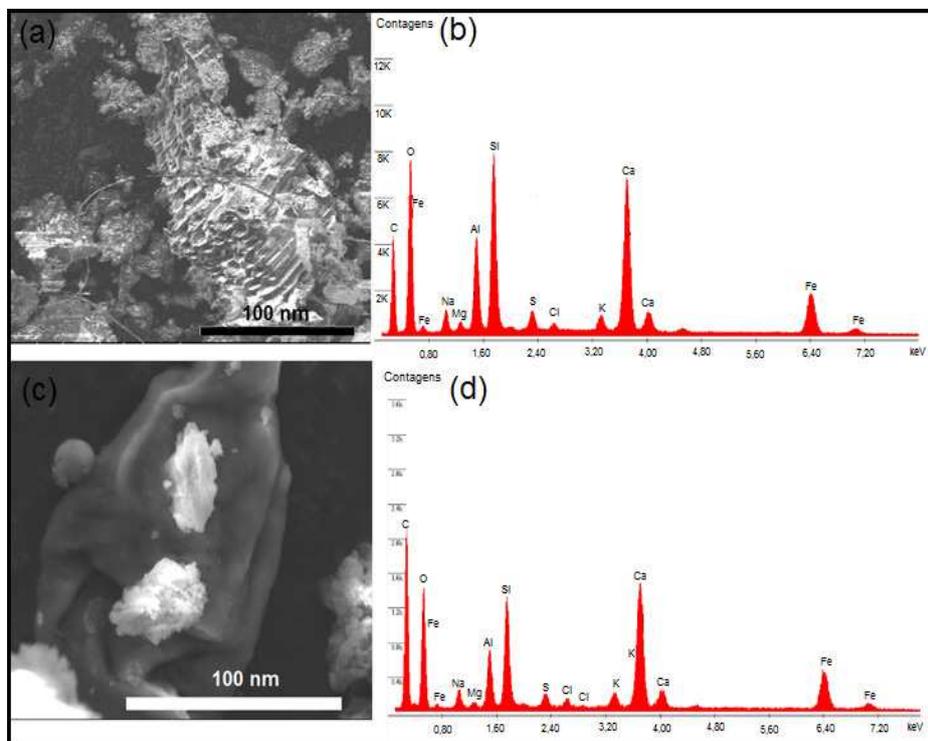


Figura 6 - (a) e (c) Imagens de microscopia eletrônica de varredura e (b) e (d) espectros EDS para a amostra de sujidade 1.

Pode ser observado na Fig. 6 que as partículas são heterogêneas em forma e sua distribuição de tamanho é ampla, com partículas tendo dimensões de $0,5 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$. A maior parte das partículas tem dimensões na ordem de $10 \mu\text{m}$. 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. 7, apresenta partículas com morfologias variadas e apresenta composição química semelhante à amostra de sujidade 1. Partículas esféricas de hematita com dimensões próximas a $4 \mu\text{m}$ são comuns nessa amostra, como mostrado na Figura 7c. 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.

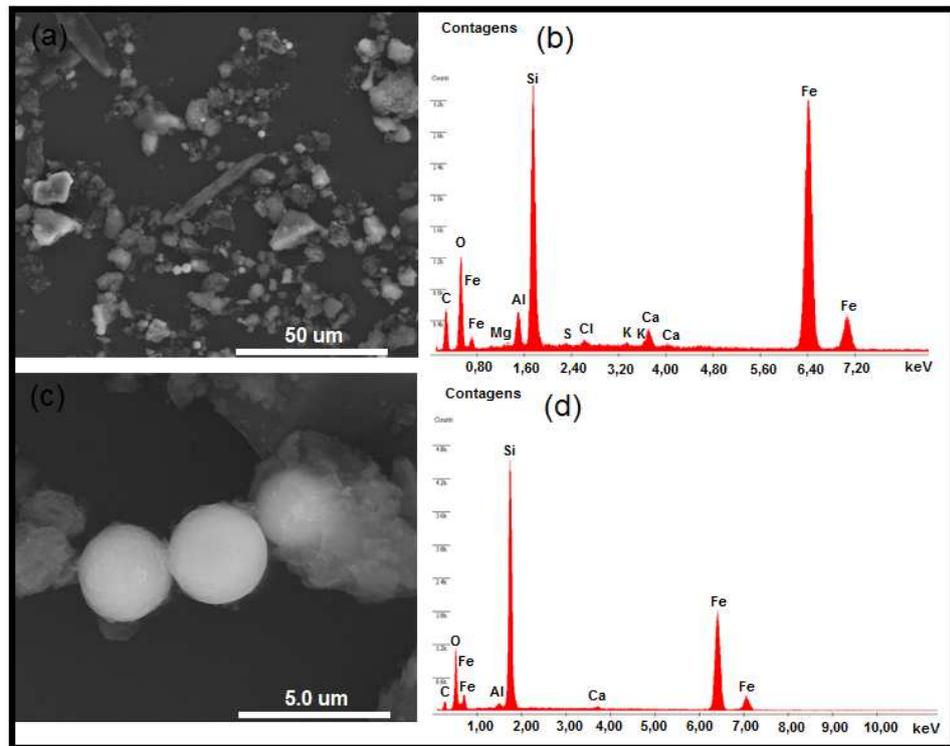


Figura 7 - (a) e (c) Imagens de microscopia eletrônica de varredura e (b) e (d) espectros EDS para a amostra de sujidade 2.

A Fig. 8 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 8c).

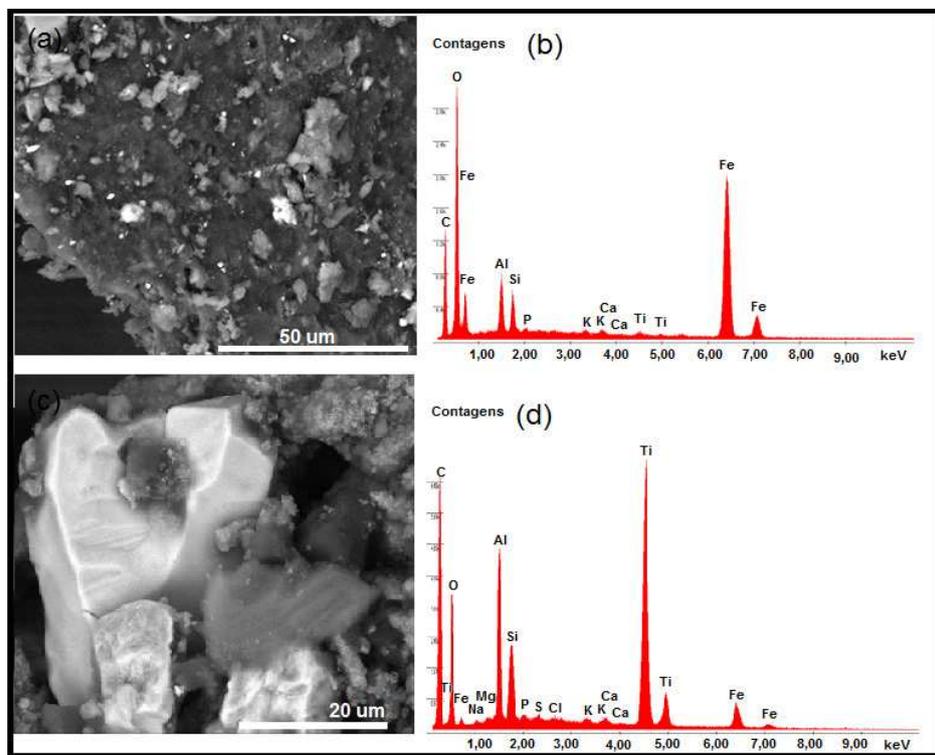


Figura 8 - (a) e (c) Imagens de microscopia eletrônica de varredura e (b) e (d) espectros EDS para a amostra de sujidade 3.

A presença do elemento titânio é evidente nos espectros de EDS mostrados. Para esta amostra, apresentada na Fig. 8, é comum a presença de um material mais aglomerado que contém partículas com elevada heterogeneidade em morfologia. Sayigh e outros (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.

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.
- Al-Sabounchi, A. M.; yalyali, S. A.; Al-Thani, H. A. Design and performance evaluation of a photovoltaic gri-connected system in hot weather conditions. *Renewable Energy*, v. 53, p. 71 – 78, 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.
- Cano, J.; John, J. J.; tatapudi, S.; tamizhmani, G. Effect of tilt angle on soiling of photovoltaic modules. **2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)**, p. 3174 – 3176, 2014.

Costa, S. C. S. **Avaliação do potencial dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica com geradores de diversas tecnologias**. 2011. 82 f. Projeto (Graduação). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Curso Engenharia de Energia, Belo Horizonte, Minas Gerais.

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. 2016.

Kazmerski, L. L.; Diniz, A. S. A. C.; Maia, C. B. M.; Viana, M. M.; Brito, P.; Costa, S. C. S.; Machado Neto, L. V. B.; Cruz, L. O.; Hanriot, S. Fundamental Studies of the Adhesion of Dust to PV Module Surfaces: Chemical and Physical Relationships at the Microscale. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 6, p. 719 – 729, 2016. (Proc. 42nd IEEE Photovoltaic Spec. Conference, New Orleans, USA, 2015).

Kazmerski, L. L.; Diniz, A. S. A. C.; Maia, C. B.; Viana, M. M.; Costa, S. C. S.; Brito, P. P.; Campos, C. D.; Hanriot, S. M.; Cruz, L. R. O. Soiling Particle Interactions on PV Modules: Surface and Inter-Particle Adhesion and Chemistry Effect. **43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**, Oregon, 2016.

Lemos, L. O. **Estudo do efeito do acúmulo de sujeira na eficiência de módulos fotovoltaicos**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Curso Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

Morris VL. Cleaning agents and techniques for concentrating solar collectors. **Solar Energy Materials**, v. 3, p. 35–55, 1980.

Naeem, M.; Tamizhmani, G. Climatological relevance to the soiling loss of photovoltaic modules. **Smart Grid (SASG)**, Saudi Arabia, 2015.

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.

Piliouquine, 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. **Proceedings of the international symposium on thermal application of solar energy**. Hakone, Japan; p. 95–100, 1985.