



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

ENERGIA:

UM OLHAR SOBRE SEUS DIFERENTES TIPOS

VOLUME III

Frederico Celestino Barbosa

Energia: um olhar sobre seus diferentes tipos

3ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

3ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Energia: um olhar sobre seus diferentes tipos

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2022

34 f.: il

DOI: 10.37423/2022.edcl603

ISBN: 978-65-5367-216-1

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. engenharia-mecânica 2. engenharia-térmica 3. engenharia-elétrica 4. engenharia-química 5.
engenharia-atômica I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 333.7

<https://doi.org/10.37423/2022.edcl603>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

Dr. João Luís Ribeiro Ulhôa

Dra. Eyde Cristianne Saraiva-Bonatto

MSc. Frederico Celestino Barbosa

MSc. Carlos Eduardo de Oliveira Gontijo

MSc. Plínio Ferreira Pires

Editora Conhecimento Livre

Piracanjuba-GO

2022

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	5
"ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA LOCALIDADE NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE HELIOTERMICA BRASILEIRA"	
Alexsander Pires Rezende Andrea Lúcia Teixeira Charbel DOI 10.37423/221006699	
CAPÍTULO 2	17
AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM ZONAS CLIMÁTICAS DO PARANÁ, BRASIL	
Renan de Oliveira Alves Takeuchi Nicole Polityto Cremasco Jorge Assade Leludak Jair Urbanetz Junior DOI 10.37423/221006706	

Capítulo 1



10.37423/221006699

"ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA LOCALIDADE NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE HELIOTERMICA BRASILEIRA"

Alexsander Pires Rezende

Universidade Federal de São João del-Rei

Andrea Lúcia Teixeira Charbel

Universidade Federal de São João del-Rei



Resumo: *A geração heliotérmica converte a radiação solar em energia térmica, que é transformada em eletricidade através de ciclos termodinâmicos, como o ciclo Rankine de geração de potência a vapor, utilizado por grande parte das usinas termelétricas. A concentração de raios solares é gerada a partir de diversos métodos de captação, o mais proeminente mundialmente por calha parabólica. O desenvolvimento desse sistema nas últimas décadas permite vislumbrar uma matriz elétrica mundial e nacional com maior participação de fontes renováveis. No entanto, o avanço desta tecnologia encontra barreiras para se equiparar à geração termelétrica a carvão e por biomassa, são elas, como altos custos de investimento e tecnológico. Esta tecnologia permite o uso de tanques térmicos de armazenamento de energia (TES) para que energia seja despachável nos períodos noturnos e de baixa irradiação direta normal (DNI). No Brasil, devido à vasta área territorial com potencial solar tal tecnologia encontra possibilidade de implantação e pode ser uma alternativa para a maior utilização de fontes renováveis na geração elétrica. Neste trabalho considera-se a geração heliotermica com sistema de armazenamento de 12 horas, visando uma produção de energia durante 24 horas, com parâmetros técnicos otimizados a partir de uma usina termelétrica já existente. O objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial de integração da tecnologia heliotérmica a partir de dados técnicos de uma UTE real, a UTE Serra Grande de 17,2 MW de potência, utilizando como parâmetros a geração elétrica anual e fator de capacidade em quatro localidades brasileiras com alto índice de DNI, variando o múltiplo solar. Finalmente, após a simulação nota-se que todas as usinas operariam dentro do fator de capacidade competitivo em relação a uma termelétrica convencional, além de produzir mais eletricidade que no caso da UTE real, variando entre 3% a 15,43%.*

Palavras-chave: *Energia Solar Heliotermica, Localidade, Fator de Capacidade.*

Área temática: *Conversão Térmica com Concentradores*

Subárea temática: *Equipamentos e sistemas de conversão heliotérmica para eletricidade*

1. INTRODUÇÃO

É de extrema importância incentivar o desenvolvimento dos mais variados métodos de geração de eletricidade e fontes de energias renováveis têm fundamental papel no enfrentamento da crise energética e mudanças climáticas (Furtado et al., 2010). A tecnologia solar heliotermica tem baixa emissão de carbono, ou nenhuma, que é o caso da produção noturna utilizando a energia térmica armazenada durante o dia (IEA, 2014).

Na busca de diminuição de impactos ao meio ambiente, a energia heliotérmica vem crescendo em todo o mundo, com capacidade instalada de 5,5 GW até 2018 (Ren21, 2019). Projeções futuras num cenário moderado apontam para geração mundial de até 800 GW no ano de 2050 (Somers, 2016).

A usina heliotérmica tem principal utilização para gerar eletricidade em média e grande escala, podendo suprir a demanda em cidades, indústrias e distribuir ao sistema elétrico nacional. Apesar da expansão desta tecnologia através de políticas de incentivo à energia renovável em alguns países, a sua competitividade em relação a outras fontes é esperada apenas após 2030 (Arvizu, et al., 2011; Penafiel, 2011).

Na geração heliotérmica ou CSP (“Concentrated Solar Power”), raios solares são concentrados e convertidos em energia térmica na forma de calor para a geração de vapor, como etapa de um ciclo termodinâmico de geração de potência como, por exemplo, o ciclo Rankine (Penafiel, 2011). Assim, relativamente ao desenvolvimento da tecnologia heliotérmica, os esforços se voltam para o aperfeiçoamento dos processos principais que o integram: captação da energia solar; armazenamento e transferência de energia para geração de vapor e geração de eletricidade (Cavalcanti, 1999). Quanto à captação de energia solar, são quatro as tecnologias existentes: torre central, calha parabólica, disco parabólico e espelhos planos Fresnel. As tecnologias diferem entre si quanto ao foco, que pode ser em ponto ou em linha, e quanto ao modo de rastreamento solar, uni ou bidimensional (Somers, 2016).

De acordo com o “National Renewable Energy Laboratory” (NREL, 2018), há 53 projetos de usinas elétricas com tecnologia heliotermica em desenvolvimento no mundo. No Brasil, a produção de energia a partir da fonte solar em grande escala encontra dificuldades devido aos custos elevados desta tecnologia, à falta de uma indústria focada neste setor e de uma política robusta de financiamento em energias renováveis (Soria, 2015).

O Brasil segue a tendência mundial e tem a maioria dos seus projetos com o método de captação por calha parabólica. A tecnologia de torre central encontra-se em estágio de amadurecimento e

atualmente estão sendo desenvolvidos e implementados alguns projetos. A Tab.1 lista os municípios brasileiros e os respectivos projetos em tecnologia de concentração solar, CSP.

Tabela 1 - Usinas heliotermicas brasileiras

Região	Tecnologia	Potência de Projeto (kW)	Estágio
Belo Horizonte (MG)	Calha Parabólica	50	Concluído
Petrolina (PE)	Calha Parabólica	1 000	Em Desenvolvimento
Pirassununga (SP)	Torre central	100	Em Desenvolvimento
Caiçara do Rio do Vento (RN)	Torre central	100	Em Desenvolvimento
Itajubá (MG)	Disco Parabólico	2	Concluído
Itajubá (MG)	Calha Parabólica	5	Concluído
Vale do Açu (RN)	Torre central	3 000	Em Desenvolvimento

Silva, 2016; Oliveira Filho, 2014; Solinova, 2018; Projeto energia heliotermica, 2018).

Um dos parâmetros utilizados na otimização e projeto de usinas heliotérmicas é o fator de capacidade, proporção entre a produção efetiva da usina em um período e a produção total máxima neste mesmo período. Plantas heliotérmicas sem armazenamento apresentam fatores de capacidade nas faixas de 20% a 35% e, já com armazenamento de energia resultam 35% a 80%, respectivamente (IEA, 2014).

Tendo em vista os altos custos de instalação, que são devidos em grande medida ao bloco de potência necessário, considerou-se, aqui, a integração da tecnologia solar a usinas termelétricas já existentes no Brasil. Nestas usinas, o bloco de potência já está instalado e toda a logística do combustível atualmente utilizado serviria para alimentar não a caldeira principal geradora de vapor (que seria substituída pela captação solar) mas para, no caso do armazenamento térmico, manter a temperatura do fluido de trabalho nos períodos sem brilho solar. Nesse contexto, foi escolhida uma usina padrão de 17,2 MW e analisou-se através da simulação no SAM (System Adviser Model), a influência da localidade sobre a produção anual de energia e o fator de capacidade, variando-se o múltiplo solar. Os parâmetros econômicos e técnicos resultantes serão analisados, visando atestar a viabilidade e as possíveis vantagens de implementação destas tecnologias, comparativamente às plantas que não são integradas a termelétricas.

2. METODOLOGIA

A metodologia neste trabalho consiste no uso do “software” SAM na simulação de uma usina heliotermica, de calha parabólica, com único parâmetro variável sendo a localidade. Os cenários

envolvem a escolha de quatro localidades onde já existem usinas termelétricas em operação no Brasil. Com a finalidade de comparar o efeito da localidade, em todos os cenários serão utilizados os mesmos parâmetros do bloco de potência (potência atual gerada, pressões e temperaturas dos processos). Além da localidade são necessários, então, os dados de operação do bloco de potência.

2.1– ESCOLHA DAS LOCALIDADES

A partir do conhecimento da localização das termelétricas brasileiras, buscou-se por aquelas com índice de radiação solar direta normal (DNI) superior a $4,65 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ de modo a garantir a viabilidade de geração heliotérmica segundo Ummel (2010).

Dentre os 3.152 empreendimentos geradores de energia termelétrica a partir de um ciclo rankine, apenas 155 possuem o DNI mínimo necessário para a concentração solar, 151 delas utilizando biomassa como combustível e apenas quatro utilizando carvão mineral. As UTEs que utilizam este combustível fóssil, são responsáveis por 27,7% da potência gerada no Brasil (Aneel, 2018).

O segundo critério para a definição das localidades foi a disponibilidade dos dados operacionais do bloco de potência, necessários como dados de entrada no software SAM.

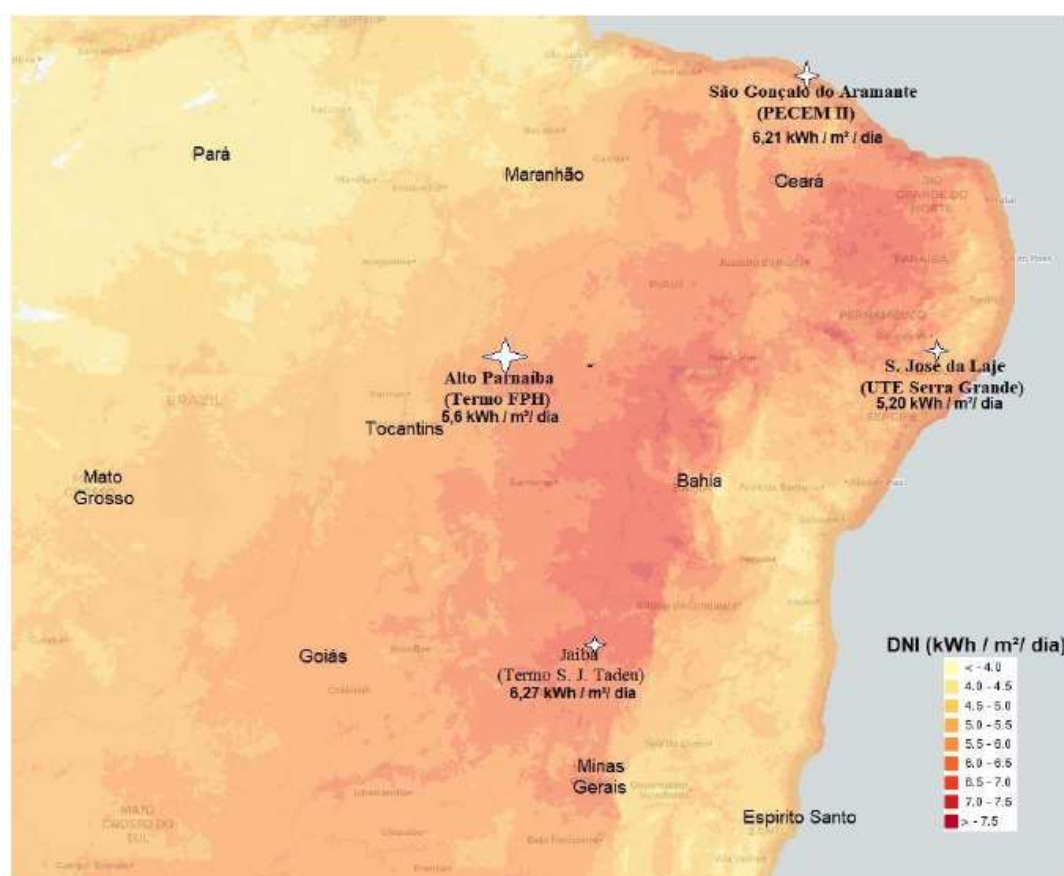


Figura 1 – Localização das regiões simuladas a partir do DNI brasileiro

A Fig. 1 indica, no Mapa do Brasil, as localidades selecionadas e os valores da irradiação direta. São elas: São José da Laje (UTE Serra Grande), Alto Parnaíba (Termo FPH), Jaíba (Termo São Judas Tadeu) e São Gonçalo do Amarante (Pecém II), localizadas nos Estados de Alagoas, Maranhão, Minas Gerais e Ceará.

O SAM, através da sua ferramenta “DView” permite visualizar os dados climatológicos em diferentes formatos gráficos e estatísticos, assim como administrá-los no Excel (NREL, 2019). A Tab. 2 sumariza tais dados médios dos parâmetros climatológicos para cada localidade.

Tabela 2 Parâmetros de localidade referente a energia heliotermica

Informações de Localidade	Serra Grande	Termo FPH	S.J Tadeu	Pecem II
Cidade	S. José da Laje	Alto Parnaíba	Jaíba	São Gonçalo do Amarante
Estado	Alagoas	Maranhão	Minas Gerais	Ceará
Fuso horário	GMT-3			
Elevação (m)	551	472 m	501 m	27 m
Latitude	8,90° Sul	9,01° Sul	15,19° Sul	3,59 ° Sul
Longitude	36,09° Oeste	46,22° Oeste	43,9° Oeste	38,86 ° Oeste
Dados Climatológicos Anuais				
Irradiação normal direta (kWh/m ² ano)	1.901	2.044	2.289	2.208
Irradiação global horizontal (kWh/m ² ano)	2.076	2.113	2.201	2.226
Temperatura de bulbo seco (°C)	24,2	25,3	25,3	26,5
Velocidade média do vento (m/s)	3,4	2 m/s	2,1 m/s	5,3 m/s
Temperatura média ambiente (°C)	22,3	25	22 °C	28
Ponto de Orvalho (°C)	16	17,9	15,23	22,6
Temperatura de bulbo úmido (°C)	22,8	23,13	21,9	25,3

Fonte: (NREL,2019).

2.2 DADOS TÉCNICOS OPERACIONAIS

Foi utilizada como padrão a Usina selecionada, com geração de 17,2 MW, para a qual são conhecidos, da literatura, os dados do bloco de potência. Os parâmetros técnicos operacionais dos coletores, receptores, fluido de transferência de calor, ângulos de captação, relativos à integração solar, foram definidos a partir de otimização do fator de capacidade utilizando o SAM. A Tab.3 relaciona tais valores para a tecnologia de calha parabólica.

Tabela 3 - Parâmetros técnicos referente a planta heliotermica simulada

Características Técnicas	Calha Parabólica
Planta	
DNI de projeto - Varia em cada região	545,36 W/m ² (S. José da Laje) / 573,35 W/m ² (Alto Parnaíba) 659,93 W/m ² (Jaíba) / 781 W/m ² (São Gonçalo do Amarante)
Espaçamento de cada fileira	15 m
Tipo do Fluido térmico para troca de calor	Hitec solar salt
Temperatura Fria (Entrada do Campo Solar)	290°C
Temperatura Quente (Saída do Campo Solar)	360°C
Vazão mássica mínima	1 kg/s
Vazão mássica máxima	12 kg/s
Velocidade mínima do HTF	2 m/s
Velocidade máxima do HTF	3 m/s
Armazenamento Térmico	
Armazenamento	12 horas
Temperaturas do Tanque	Igual T _q e T _f do campo solar
Altura do Tanque	20 m
Diâmetro do Tanque	6,35 m
Coeficiente de perdas térmicas do tanque	0,4 W/m ² K
Campo Solar	
Número de Coletores por fileira (loop)	8
Inclinação	7° (S. José da Laje) / 11° (Alto Parnaíba) 1° (Jaíba) / 4° (São Gonçalo do Amarante)
Azimute	-3° (S. José da Laje) / -4° (Alto Parnaíba) 7° (Jaíba) / -3° (São Gonçalo do Amarante)
Tipo do coletor	Solargenix SGX-1
Tipo do receptor	Royal Tech CSP RTUVR
Perda de calor no receptor	175 W/m
Bloco de Potência	
Potência Líquida (de projeto)	17,2 MW
Fator de conversão entre potência bruta e líquida	0,9
Potência Bruta	18,9 MW
Perdas parasíticas	4% (padrão SAM)
Pressão de operação	50 bar
Eficiência para conversão no ciclo termodinâmico	40%
Reposição de água no ciclo termodinâmico	0,02 (padrão SAM)
Eficiência na caldeira auxiliar	65% (padrão SAM)
Objetivo da caldeira auxiliar	Manter o Sal Fundido acima de sua temperatura de Congelamento
Temperatura para caldeira auxiliar	365 °C
Capacidade máxima para turbina	1,1
Tipo de Condensador	Evaporativo
Temperatura ambiente da região	25 °C
Pressão Mínima	1,25 inHg
Diferença na temperatura da água	10 °C

Fontes: Elaboração própria a partir de (Penafiel, 2011; Somers, 2016; Oliveira Filho, 2014; Matilha, 2011) elaboração via otimizações no SAM.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada cenário foram mantidas as configurações do bloco de potência, variando apenas a localidade e DNI de projeto já que é um parâmetro obtido através de dados de localidade. As simulações foram realizadas no laptop Lenovo modelo Legion I-7(4,1 GHz) e 16 Gigabits de memória RAM, a duração foi entre 15 min a 3 horas para cada simulação com variação do MS de 0,8 a 3, com variação de 0,01.

Com o aumento do múltiplo solar há um acréscimo da energia disponível a ser aproveitado pelo sistema através do armazenamento da energia. As análises buscam, primeiramente, os valores ótimos do múltiplo solar, melhor produção de eletricidade anual e fator de capacidade (FC).

3.1 ANÁLISE DO FATOR DE CAPACIDADE

O efeito do múltiplo solar (MS) sobre o fator de capacidade variando as localizações são ilustrados na Fig. 2 onde são indicados, também, os valores máximo e mínimo de FC para UTE convencionais de ciclo rankine, segundo TOLMASQUIM (2016). Os quatro cenários apresentam valores crescentes e dentro da faixa de FC de UTEs.

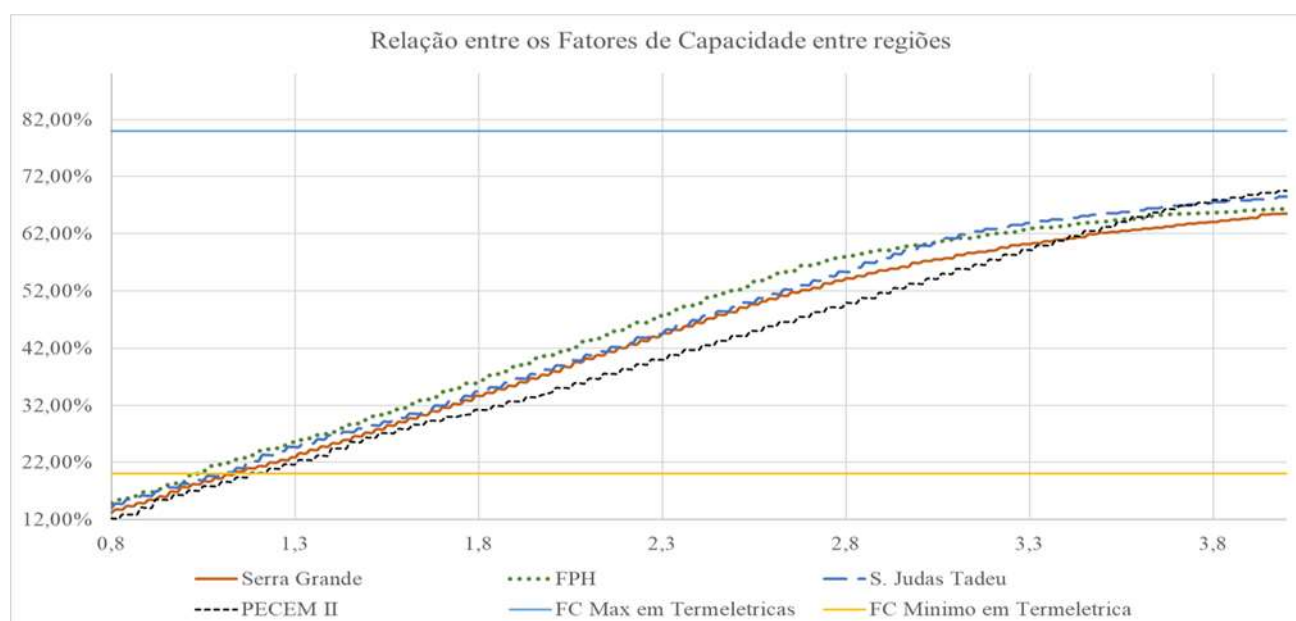


Figura 2 – Relação do Fator de Capacidade a partir da variação de Múltiplo Solar através dos quatro cenários

A maior variação entre os valores, observadas com MS igual a 2,7, na Usina de Pecém II (São José do Amarante) apresentou FC 15,43%, neste mesmo intervalo o menor resultado é encontrado na região de Serra Grande.

Assim, como era esperado, a diferença do local e, conseqüentemente, do índice de radiação direta, afeta diretamente o fator de capacidade da planta, nesses casos apontando diferenças de 3% a 15,43%.

3.2 ANÁLISE DA GERAÇÃO ANUAL DE ELETRICIDADE

Segundo Jorgenson. et al,. (2013), Penafiel (2011), Oliveira Filho (2014) e IRENA (2012) o valores do múltiplo solar (MS) variam entre 1 e 1,5 para as tecnologias simplificadas de calha parabólica, porém com TES pode variar entra 1,5 e 2,5. Acima destes valores de M.S os custos de manutenção e instalação encarece de forma pontual, não viabilizando a criação de tais usinas, como todos os cenários oferecem valores crescentes, serão considerado os valores de geração elétrica no limite do múltiplo solar, ou seja, quando o múltiplo solar é igual a 2,5.

Nos cenários a planta solar mostra diferença de 10,1% entra a que gera mais e menos eletricidade, porém em todos os cenários há uma produção maior que a usina real comparada. Isoo se dá ao fato da UTE queimar o bagaço de cana apenas na época de safra, gerando eletricidade apenas de outubro a janeiro (ONS, 2019). Deve-se ressaltar, ainda, que a usina pode estar utilizando parte da energia para sua operação principal, que no caso é a geração de etanol (cogeração).

Foi adicionado o valor teórico de geração elétrica, estimado a partir do trabalho de Soares (2009), que considera a disponibilidade de eletricidade a partir da potência de 17,2MW pela 8760 horas no ano (como não há necessidade de paradas por safra neste processo de cogeração, pois é queima de lenha), além de descontar o valor total em 10% por questões de paradas planejas e não planejas. Quando comparados com os resultados simulados das plantas heliotérmicas, dispostos na Fig. 3, apresentam valores maiores 88,33 % que o cenário de Serra Grande, 72,39% que a termo PFH, 83,07% que a termo S.J. Tadeu e 100,03% que Pecem II.

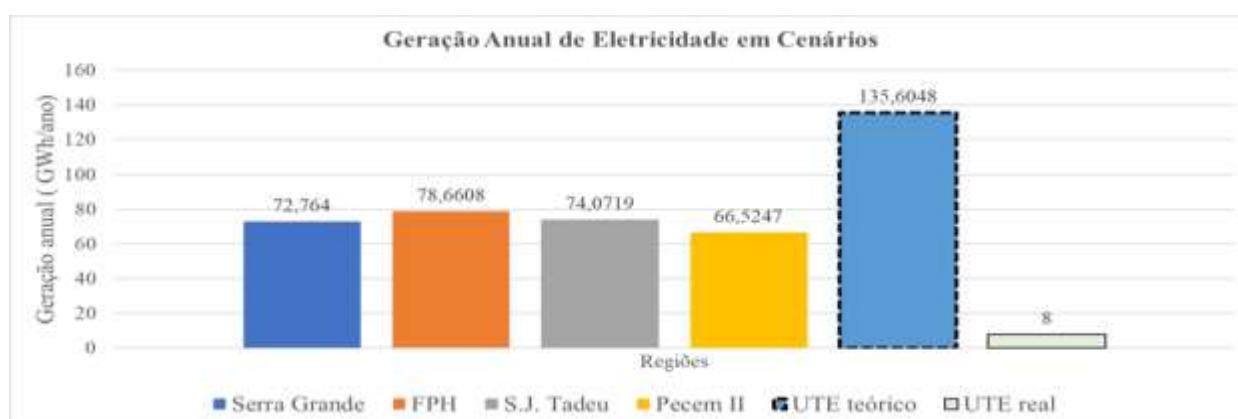


Figura 3 – Geração anual de eletricidade entre cenários

A vantagem de uma planta heliotermica em comparação com sistemas que dependem de safra para produzir eletricidade, seria a geração intermitente durante o ano todo, com parte da energia elétrica voltando-se para a produção primaria da empresa e parte sendo transmitida e distribuída. Porém, neste caso, comparado com uma produção termelétrica com apenas 10% de paradas pode ser considerada inferior.

4. CONCLUSÃO

A integração de uma usina heliotérmica em localidades onde haja termelétrica deve considerar a interação da irradiação direta normal durante o ano. Para uma usina de 17,2 MW de potência, com os dados da Tab.3 e considerando o fator de capacidade, este variou de 3% a 15,43% dependendo do múltiplo solar. Assim, quanto maior a necessidade de armazenamento térmico, maior a influência da localidade relativamente ao fator de capacidade. Quanto à produção de energia, quando se considera a integração com termelétricas existentes que utilizam como biomassa de cana de açúcar como combustível, situação predominante no Brasil, deve ser ponderado que a tecnologia heliotermica oferece a possibilidade de geração de energia não só nos períodos de safra, o que pode ser determinante na produção anual de energia. A análise de fatores econômicos, como o custo nivelado de energia deve também ser realizada, principalmente tendo em mente que as condições de financiamento variam em cada região do país.

AGRADECIMENTOS

À UFSJ pela estrutura oferecida e ao NREL pelo apoio técnico nas simulações utilizando o SAM.

REFERÊNCIAS

Arvizu, D.; Balaya, P.; Cabeza, L. et al. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation SRREN. , Chapter 3. Direct Solar Energy. Cambridge and New York: IPCC. 2011

Blasques, L. C. M., Vale, S. B., Pinho, J. T., 2007. Sistema Solar Fotovoltaico para Geração de Eletricidade na Estação Científica Ferreira Penna do Museu Paraense Emílio Goeldi, Caxiuanã – Pará, I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.

Cavalcanti E. S. B. Geração Heliotérmica: uma nova Opção de Energia Limpa para o Brasil. In: CBE (Ed.). VIII Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro: [s.n.], 1999.

Furtado, M. C. Avaliação das oportunidades de comercialização de novas fontes de energia renováveis no Brasil. 2010. 125 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

IEA. World Energy Outlook. International Energy Agency [S.l.: s.n.], 2014.

Jorgenson, J. et al. Estimating the Performance and Economic Value of Multiple Concentrating Solar Power Technologies in a Production Cost Model. [S.l.], 2013. Disponível em:

<<https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/58645.pdf>>. Acesso em: 04/01/2019.

Lora, E. E. S.; Nascimento, M. A. R. Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 1296 p.

Mantilla, V. A. P. Avaliação Técnica-Econômica das Tecnologias de Geração Heliotérmica para o caso Brasileiro, Considerando Sistemas de Armazenamento Térmico e Hibridização. 183 p. Dissertação (Engenharia Energia) — Universidade Federal de Itajubá. 2017.

NREL. SolarPaces. Colorado: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/by-country>>. Acesso em: 04/01/2019.

Oliveira filho, C. M. de. Metodologia para Estudo de Implantação de uma Usina Heliotérmica de Receptor Central no Brasil. 100 p. Monografia (Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014 Projeto energia heliotérmica. Energia Heliotérmica. Brasília: [s.n.], 2018. Disponível em:

<www.energiaheliotermica.gov.br/>. Acesso em: 04/01/2019.

Oliveira Filho, C. M. de. Metodologia para Estudo de Implantação de uma Usina Heliotérmica de Receptor Central no Brasil. 100 p. Monografia (Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014 Oliveski, R. C., 2000. Análise Numérica e Experimental dos Campos de Temperatura e Velocidade em Armazenadores Térmicos, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.

ONS. Geração de Energia. 2019. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Brasil. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acesso em: 24/07/2019.

Penafiel, R. A. S. Cenários de Geração de Eletricidade a Partir de Geradores Heliotérmicos no Brasil: a Influência do Armazenamento de Calor e da Hibridização. 2011. 202 p. Dissertação (Ciências em Planejamento Energético)- UFRJ.

Projeto energia heliotermica. Energia Heliotérmica: Como Funciona. Brasília: [s.n.], 2019. Disponível em: < <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona> >. Acesso em: 04/01/2019.

Ren21. Renewables 2019 Global Status Report (GSR 2019). Disponível em: < <https://www.ren21.net> > REN 21, 2019. Silva, D. G. da. Revestimento Antirreflexivo em Vidros Voltado para Sistemas Heliotérmicos.2016. 127 p.Dissertação (Engenharia de Materiais) — CEFET- MG.

Soares, F.H. Operação de usinas térmicas por disponibilidade: uma avaliação dos impactos setoriais sob a ótica técnica, econômica e financeira. USP. São Paulo. 2009.

Solinova. Project SMILE. Pirassununga:[s.n.], 2018.Disponívelem:<<http://www.solinova.com.br/projeto-smile>>. Acesso em: 04/01/2019.

Somers, J. Assessing the Potential for CSP Integration with Australia's Coal-Fired Power Plants. 2016. 84 p. Monografia (Mechanical Engineering) — THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND.

Soria, R. et al. Hybrid concentrated solar power(CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. Energy Policy, Elsevier B.V., v. 86, p. 57 – 72, 2015.

Ummel, K. Concentrating Solar Power in China and India: A Spatial Analysis of Technical Potential and the Cost of Deployment. School of Earth, Atmospheric, and Environmental Sciences University of Manchester, Massachusetts, Setembro 2010.

Capítulo 2



10.37423/221006706

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

Renan de Oliveira Alves Takeuchi

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Nicole Polityto Cremasco

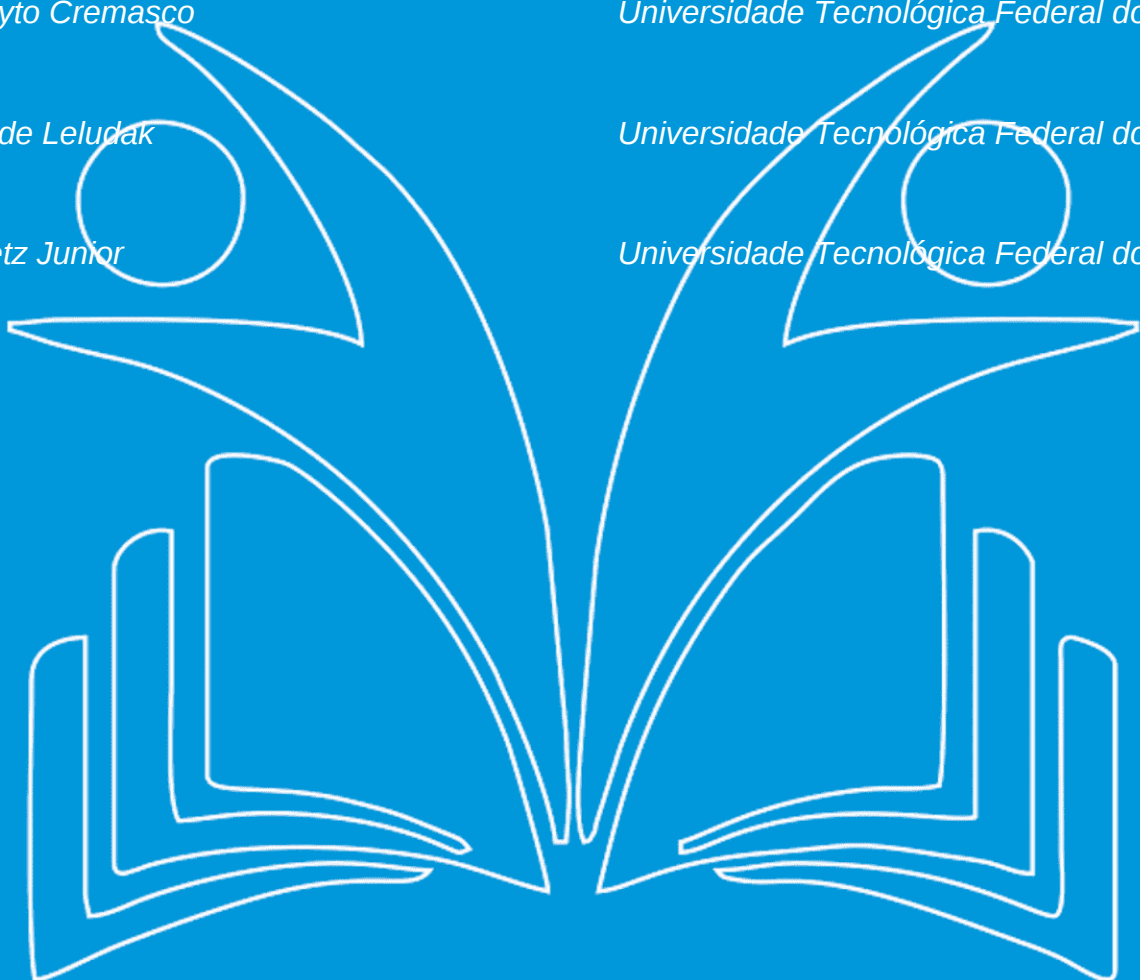
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jorge Assade Leludak

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jair Urbanetz Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná



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 sujidade nos sistemas fotovoltaicos (Ferrada et al., 2019). No caso de zonas urbanas, espera-se que a sujidade 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 sujidade 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 sujidade 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 sujidade em vários locais de interesse para a geração de energia fotovoltaica, o problema de sujidade 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 0º. 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 sujidade 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 1 apresenta o mapa do estado do Paraná, indicando a irradiância solar no plano inclinado e as classes climáticas.

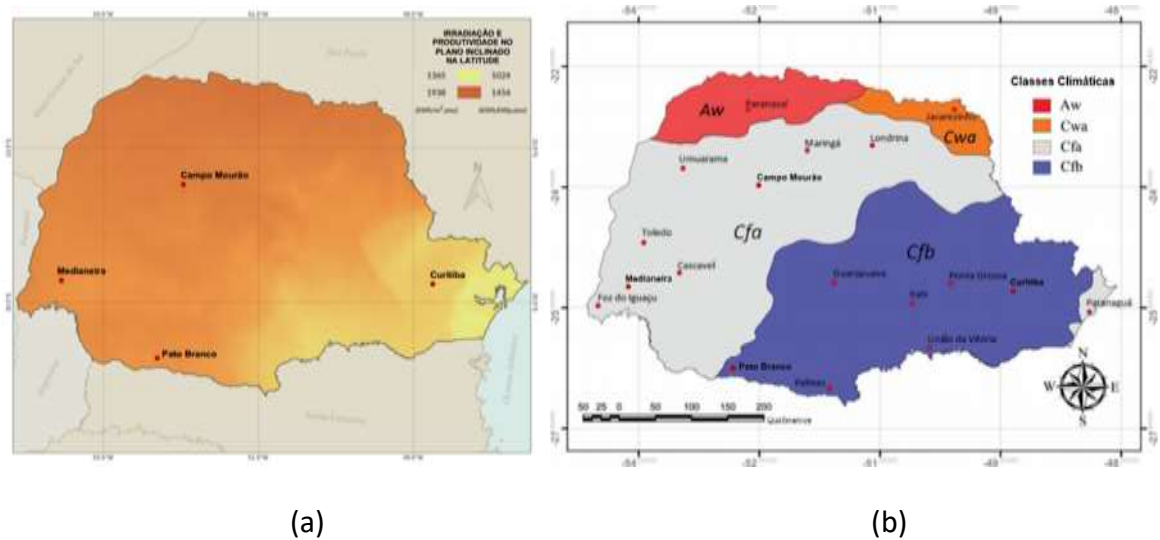


Figura 1 - Mapas do estado do Paraná (a) Irradiação no plano inclinado na latitude (Tiepolo *et al.*, 2017) e (b) Zonas climáticas de acordo com o sistema Köppen-Trewartha (1954) (Aparecido *et al.*, 2016).

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.

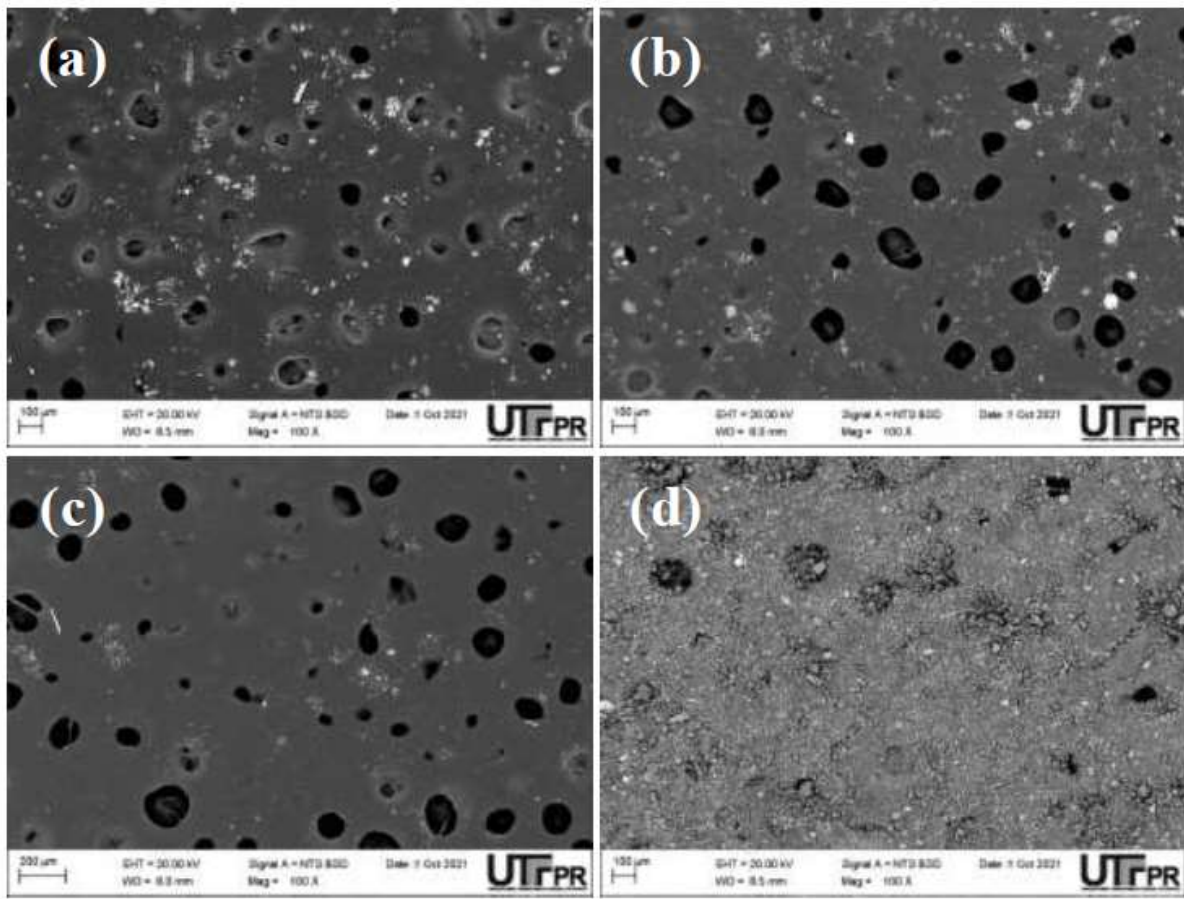


Figura 5 - Imagens de microscópio eletrônico de varredura dos materiais particulado coletados dos módulos nos locais MD (a), PB (b), CM (c) e CT (d).

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 figur 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 desprendimento 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.

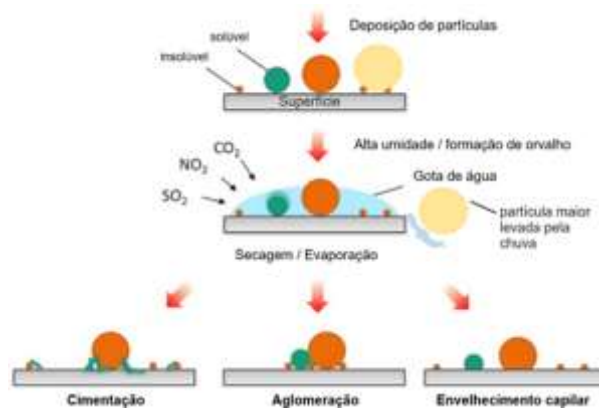


Figura 6 - Modelo para mecanismos de sujidade que aumentam a adesão das partículas: cimentação, aglomeração e envelhecimento capilar. Adaptado de Ilse et al., 2018.

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.

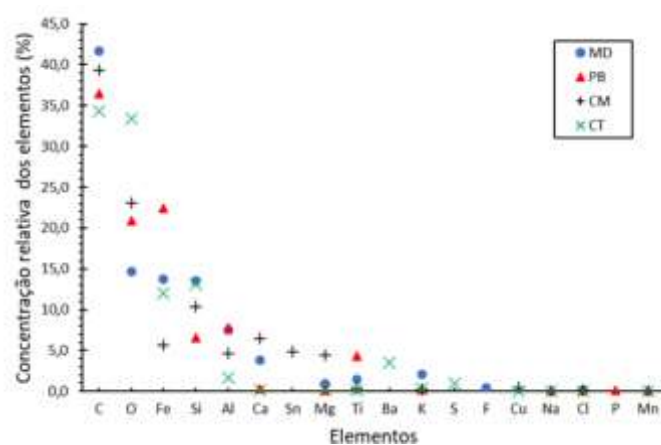


Figura 7 - Análise elementar de amostras MD (círculos azuis), PB (triângulos vermelhos), CM (cruzes pretas) e CT (“X” verdes) obtidos do espectro EDS.

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 rodoviário, 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., KHOURY, 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 Zeitschrif.* 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.