

# REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE SUJIDADE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: EFEITOS E CARACTERÍSTICAS

José Janiere Silva de Souza<sup>1,2</sup> – janiere.silva@ifce.edu.br

<sup>1</sup>Instituto Federal do Ceará, Campus Cedro

Paulo C. M. Carvalho<sup>2</sup> – carvalho@dee.ufc.br

Giovanni Cordeiro Barroso<sup>3</sup> – gcb@fisica.ufc.br

<sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica.

<sup>3</sup>Universidade Federal do Ceará, Departamento de Física.

**Resumo.** Considerando o crescente interesse pelo uso de sistemas fotovoltaicos (FV) para a produção de energia elétrica e tendo em vista que a sujidade impacta o seu desempenho, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão de literatura sobre as características e efeitos da sujidade em sistemas FV. Para tal, adota-se procedimento metodológico para uma revisão sistemática da literatura (RSL) a fim de otimizar o processo de busca, seleção e extração das informações. Assim, por meio da execução do protocolo de busca e utilização da ferramenta StArt foram identificados e analisados 21 estudos primários que apresentam resultados de investigações ao ar livre sobre as características e efeitos da sujidade naturalmente depositada em módulos FV de diversas tecnologias instalados em diferentes localidades do mundo. Através da análise bibliométrica foi identificada a distribuição anual das publicações, as localidades de realização dos estudos, os meios de divulgação científica que publicaram os estudos primários (EPs) e os principais pesquisadores envolvidos na temática. Por meio da análise dos EPs, foi observado que a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) costuma ser o parâmetro mais afetado pela presença de sujidade, assim como há diferentes respostas dependendo da tecnologia FV utilizada. Ademais, foi verificado que elementos como Si, Ca, Al, O, Fe, Ca e Na aparecem na composição com maior frequência e que os principais compostos minerais detectados são quartzo, calcita e dolomita.

**Palavras-chave:** Revisão Sistemática da Literatura, Sistemas Fotovoltaicos; Sujidade.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos (FV) vem despertando o interesse mundial (COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2018). Contudo, o desempenho da geração FV pode ser fortemente impactado pela sujidade (NEPAL *et al.*, 2018), entendida como a deposição de partículas de poeira (inorgânica) e outros contaminantes (orgânicos) na superfície de módulos FV provocando absorção e reflexão da irradiância solar (AFRIDI *et al.*, 2017). Seus efeitos de perdas estão relacionados às características climáticas locais (frequência e intensidade de chuvas, umidade relativa, velocidade e direção do vento, características do solo próximo à planta FV etc.) e aspectos referentes ao módulo FV (revestimento, moldura, vidro etc.) (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Os parâmetros climáticos podem apresentar efeitos mais acentuados devido às variações sazonais (estações do ano); portanto, sistemas FV que utilizem a mesma tecnologia podem apresentar comportamentos distintos considerando as condições climáticas a que são submetidos (JASZCZUR *et al.*, 2019). Em vista disso, vários estudos vêm sendo propostos pela comunidade científica tendo como objetivo analisar os impactos sobre a geração FV, as características físico-químicas, a utilização de técnicas para mitigar as perdas e o desenvolvimento de modelos matemáticos de predição.

Guo *et al.* (2015) realizam estudo para correlacionar a influência da concentração de poeira menor que 10  $\mu\text{m}$  (PM10) e condições ambientais (velocidade do vento e umidade) sobre o desempenho de um sistema FV em Doha, Qatar. Como resultado, a concentração de poeira apresentou forte influência sobre a alteração diária do índice de limpeza, assim como as condições meteorológicas analisadas. Em Menoufi *et al.* (2017), ao expor dois módulos p-Si (policristalino) de 10 Wp a uma inclinação de 0° instalados em Beni-Suef (Egito), sendo um com limpeza manual diária e o outro sem limpeza, o tamanho das partículas encontradas na sujidade (densidade de 0,2545 g/cm<sup>3</sup>) variou entre 3,5 e 30  $\mu\text{m}$ . Desse modo, foi aferida uma redução de 39% no valor da tensão, 45% da corrente e 65% da potência de saída no módulo sujo em relação ao limpo. Jaszczur *et al.* (2019) analisam a redução do desempenho de geração de um sistema FV em função da massa de poeira e a influência do aumento na temperatura de módulos p-Si instalados na Cracóvia, Polônia. Segundo os autores, o desempenho dos módulos apresenta perda de 2,1% para massa de poeira depositada de 480 mg. Este fato é relevante, uma vez que, essa perda de desempenho considera a operação do sistema entre os intervalos de limpeza (1 semana).

No caso do Brasil, Barbosa, Faria e Gontijo (2018) observam um aumento de até 10,26% na produção de eletricidade após limpeza manual em uma das *strings* que compõe o sistema do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM) em Patos de Minas, Minas Gerais. Estudos conduzidos por Silva *et al.* (2019) relatam o incremento de 26,6 kWp na potência de módulos limpos em relação a módulos sujos instalados na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais. Ademais, observaram que o aumento da temperatura na superfície do módulo sujo pode chegar até 10 °C em relação ao módulo limpo. Estudos conduzidos por Araújo, Carvalho e Dupont (2019) em uma

planta FV instalada no campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC) (Fortaleza) observam perdas de até 16,52% em eficiência e até 11,71% em geração de eletricidade considerando período de 17 dias sem ocorrência de precipitações. De modo complementar Freitas Filho *et al.* (2019) realizam análise físico-química da sujidade nesse mesmo sistema e verificam que o tamanho das partículas encontradas varia entre 14 e 112,1  $\mu\text{m}$ , com predominância de partículas de 10  $\mu\text{m}$  até 40  $\mu\text{m}$ . Quanto à natureza química, os seguintes elementos foram detectados: Alumínio (Al), Silício (Si), Ferro (Fe) e Cálcio (Ca).

Em geral o Si é o elemento encontrado em maior concentração na poeira aerotransportada. Contudo, a composição pode ser influenciada por características específicas do local. Além disso, as partículas orgânicas transportadas pelo ar podem interferir no comportamento da poeira (PICOTTI *et al.*, 2018). Ademais, a natureza da sujidade é diferente para cada localidade. Diante desse contexto o presente artigo tem como objetivo apresentar os resultados de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) acerca de estudos de investigação experimental que relatam as características físico-químicas da sujidade depositada em sistemas FV e o impacto no desempenho de geração.

## 2. METODOLOGIA

A multidisciplinaridade dos campos de desenvolvimento e a quantidade de informações publicadas torna cada vez mais difícil a análise de todas as publicações científicas de uma determinada área. Assim, a RSL é uma metodologia que auxilia no direcionamento da busca por informações, visto que estabelece previamente parâmetros de busca, critérios de inclusão/exclusão e a forma como as informações serão tratadas (RIBEIRO *et al.*, 2018). A execução da RSL no presente artigo deu-se com intermédio da ferramenta StArt (*State of the Art through Systematic Review*) (HERNANDES *et al.*, 2012) e foi dividida em seis etapas, conforme apresentado na Fig. 1.

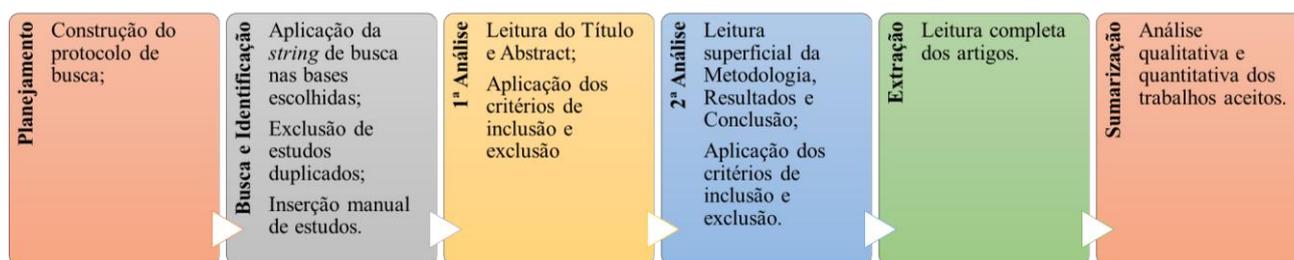


Figura 1 – Etapas de execução da RSL.

Para a busca dos trabalhos, foram selecionados os repositórios *Engineering Village*, *IEEE Xplore*, *Scopus* e *Web of Science* em função da funcionalidade de exportação dos resultados das buscas no formato .bib e por serem acessíveis através do Portal Periódico da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Os estudos analisados limitaram-se a artigos publicados em periódicos e congressos no período entre 2016 e 2021 desde que escritos em inglês, português ou espanhol. Para a busca foram selecionadas palavras chaves e seus sinônimos e abreviações, conforme mostrado na Tabela 1, para a construção das *strings* de busca, construídas com intermédio dos operadores booleanos AND, OR e NOT. Finalizada a etapa de planejamento, as *strings* foram inseridas nos repositórios para coletar os EPs (Estudos Primários). Destaca-se que nessa etapa foram realizadas buscas nos arquivos das edições do Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS) e Revista Tecnologia UNIFOR a fim de identificar estudos com potencial para serem inseridos de forma manual. O processo de busca foi realizado em julho de 2021 e resultou na identificação de 3.018 EPs.

Tabela 1 - Palavras-chaves utilizadas nas buscas.

Palavras-Chaves	Sinônimos
<i>Photovoltaic</i>	<i>Solar Energy</i>
<i>Soiling</i>	<i>Dust</i> <i>Dirt</i>
<i>Effect</i>	<i>Impact</i> <i>Influence</i>
<i>Characteristic</i>	<i>Property</i>
<i>Analyse</i>	<i>Investigation</i> <i>Study</i> <i>Assessment</i> <i>Evaluation</i> <i>Research</i>

Através do StArt foram identificados 1.432 estudos duplicados e admitidos 1.586 para etapa seguinte. Durante a 1ª seleção foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão com base na leitura do título e resumo dos artigos,

resultando em 418 aceitos e 1.168 rejeitados. Na 2ª seleção, 151 estudos foram aceitos e 268 rejeitados. Contudo, por questões de síntese nesse artigo são apresentados apenas os EPs que tratam de trabalhos experimentais sob condições externas que descrevem as características físico-químicas da sujidade e os efeitos do seu acúmulo natural no desempenho de geração de sistemas FV, totalizando 21 EPs.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na literatura são encontrados trabalhos que relacionam os impactos da sujidade no desempenho da geração FV através da deposição artificial de sujeira (ALNASSER *et al.*, 2020). Todavia, em virtude da complexidade das relações com as características climáticas/meteorológicas tais experimentos não conseguem determinar completamente os impactos quando da exposição desses sistemas a ambientes externos, uma vez que, as características físicas e deposição da sujeira variam de um local para outro (KAZEM; CHAICHAN, 2016). Nesse sentido, diversos autores realizaram investigações experimentais em diversas partes do mundo a fim de verificar as características e influência da sujidade no desempenho de sistemas FV. Assim, nessa seção são apresentadas as descrições dos trabalhos selecionados, bem como é realizada a análise bibliométrica e discussões dos resultados.

#### 3.1 Descrição dos trabalhos selecionados

Em Javed *et al.* (2016) uma análise experimental com 3 conjuntos de módulos FV do tipo p-Si expostos em Doha (Qatar) durante 12 meses sob diferentes intervalos de limpeza (semanal, bimestral e semestral) mostra variação do índice de limpeza entre -0,52%/dia para limpeza semestral e -0,55%/dia para a bimestral; uma tempestade de areia pode provocar redução de 45%/dia do índice de limpeza. Quanto à natureza física, cerca de 90% das partículas são menores que 36  $\mu\text{m}$ , com média ponderada por volume e tamanho mediano de 18 e 14  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Os principais componentes detectados foram Ca, Si, Fe, Magnésio (Mg) e Al. A composição mineral é formada principalmente por calcita, dolomita e quartzo.

Posteriormente, ao investigar o comportamento sazonal da sujidade durante 2 anos em módulos p-Si limpos (limpeza diária) e sujos (limpeza a cada 2 meses) instalados em Doha (Qatar), Javed *et al.* (2021) identificaram Ca (70%), Si (11%), Fe (5%), Mg (4,8%), Al (4%), Potássio (K) (0,7%) e Sódio (Na) (0,5%). A composição mineralógica apresentou calcita (45%), dolomita (25%), quartzo (12%) e gesso (6%). O tamanho médio e mediano mensal das partículas variou na faixa de 17–23 e 12–18  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Após um dia de exposição, uma redução de 0,75% da potência foi registrada (deposição de 0,2  $\text{g}/\text{m}^2$ ), chegando até 55% para deposição de 15  $\text{g}/\text{m}^2$  após 6 meses. Para dados de deposição mensal, foram verificadas perdas entre 6% (deposição de 2  $\text{g}/\text{m}^2$ ) e 23% (deposição de 7  $\text{g}/\text{m}^2$ ), dependendo das condições ambientais e das propriedades do pó.

Através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Aïssa *et al.* (2016) observaram uma distribuição gaussiana em torno de 2  $\mu\text{m}$  para as partículas coletadas na superfície de módulos FV instalados em Doha (Qatar). Morfologicamente, o formato esférico foi predominante. Quanto à composição elementar, Carbono (C) (24,14%), Oxigênio (O) (61,46%), Mg (1,92%), Al (1,04%), Si (4,25%), Ca (6,5%) e Fe (0,45%) são os principais elementos. Contudo, os autores ponderam que o conteúdo atômico quantitativo de O e C deve ser analisado com cautela, uma vez que, a Espectroscopia Dispersiva de Energia (EDS) não é uma técnica adequada para sondar tais elementos. Dados da Difração de Raios-X (DRX) detectou os minerais calcita (58%), sillimanita (17%), olivina (9%), akermanita (8%) e quartzo (7%). Quanto ao desempenho elétrico de um módulo p-Si, é relatado um aumento de até 38% na corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) após a limpeza no módulo, sendo observado ainda um aumento de 28% na potência.

Em Ilse *et al.* (2018) é analisado o processo de cimentação e sujidade de módulos m-Si em Doha, Qatar. Todas as amostras mostram picos dominantes para calcita (47-53%) e dolomita (25-29%). A análise do tamanho revelou partículas na faixa de 0,6  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ , com maior proporção por volta de 20  $\mu\text{m}$ ; poucas partículas possuem diâmetros maiores que 50  $\mu\text{m}$  ou menores que 0,6  $\mu\text{m}$ . Quanto à morfologia, verificou-se aumento no formato de agulhas à medida que a exposição aumenta; após 28 dias, quase toda a área da amostra estava coberta por essa formação. A partir de testes de resfriamento e aquecimento, determina-se que o formato de agulhas está relacionado a eventos de orvalho por meio de processos de dissolução-precipitação. Outro achado é a redução da quantidade de sujidade depositada após o aquecimento de uma superfície de vidro. Para o local de estudo, a variação média do índice de limpeza foi de  $0,54 \pm 0,67\%$ /dia durante outubro de 2015, sendo verificado aumento quase linear na mudança no índice de limpeza para exposição mais longas; para 28 dias de exposição as perdas variam, aproximadamente, entre 14 e 16%.

Em Zitouni *et al.* (2019) o efeito da sujidade é investigado durante 6 meses em uma planta FV de 16,56 kWp com módulos m-Si (monocristalinos) instalados em Benguerir, Marrocos. A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) revelou que Si e Ca estão entre os elementos que compõem a sujidade depositada; Al, Fe, Mg, K e Na são detectados em menor proporção. O exame MEV confirma os resultados de FRX, sendo ainda detectados elementos em zonas específicas, como Titânio (T), Enxofre (S), Zinco (Zn), Cloro (Cl) e Na. Quanto ao desempenho elétrico, para um dia não chuvoso a energia produzida pelos módulos limpos a cada 2 semanas foi de 30,57 kWh, enquanto os sujos produziram 25,99 kWh, diferença de 4,56 kW. Já em um dia chuvoso, a produção foi aproximadamente igual, 31,85 kWh (limpo) e 31,82 kWh (sujo). Para um período seco de 43 dias a perda de energia foi de 125 kWh (perda média de 2,7 kWh/dia) e PR (*Performance Ratio* - Relação de Desempenho) variando em média 0,3%/dia podendo atingir

variação de 15,3%/dia. Durante um período chuvoso a perda média foi de 0,007 kWh/dia e o PR varia em média 0,025%/dia e no máximo 1,8%/dia. Durante o período seco a relação de sujidade foi de 0,32%/dia e de 0,02%/dia no período chuvoso.

Em Zitouni *et al.* (2021) a análise elementar da sujidade coletada em módulos m-Si em dois períodos exposição (curto e longo) detectou como principais componentes O, Si, Ca, Al, Fe, Mg, K, e Fósforo (P) e baixos percentuais de Ti, Na, Zn, Cl e Enxofre (S) na amostra de curta exposição. Morfologicamente, a maioria das partículas apresentou formato esférico, sendo relatada mudança da morfologia com o aumento do período de exposição. Ao analisar períodos de seca P1 e P3 e período úmido P2, foi observado que SR (*Soiling Ratio* - Taxa de Sujidade) mudou de 1 para 0,83 (17% de perda) durante P1, retomando a 0,85 (15% de perda) após uma precipitação; em P3 a SR relatada é de 0,72 (28% de perda). Assim, em P1 (perda de 0,43 kWh/dia) e P3 (perda de 0,61kWh/dia) a taxa média de sujidade foi de 0,17%/dia e 0,35%/dia, respectivamente, e aproximadamente nula durante o período P2 (perda de 0,03 kWh/dia). Durante os períodos P1 e P3, a redução média da taxa de desempenho foi de 6,1%/dia e 10%/dia, respectivamente, e 0,5%/dia para P2. Após 1 ano de exposição, foram computados 28% de perdas devido à sujidade, equivale a uma perda total de 82,5 kWh.

A investigação conduzida durante 1 ano por Azouzoute *et al.* (2021) com módulos m-Si instalados em Benguerir (Marrocos) mostra que para o período P1 (chuvas de alta intensidade), os valores de SR ficaram em torno de 1, apresentando redução máxima de 5%. Para o período P2 (chuvas de baixa intensidade), o SR atingiu 0,73 (maior perda por sujidade durante o experimento), sendo ressaltado aumento de 0,74 para 0,84 (variação de 10%) devido a uma precipitação de 0,1 mm/dia. Durante o período P2, a relação de sujidade média foi de 0,14%/dia, enquanto para P1 foi de 0,0079%/dia. Foi registrada uma redução de 24% na potência. Ao fim do experimento os autores contabilizaram perda total de 18,79 kWh/ano, sendo 80% ocorridas durante o período de seca. Nas amostras coletas durante período de seca e chuva, os principais constituintes foram quartzo, dolomita, calcita, hidróxido de silicato de potássio e alumínio. A análise elementar mostrou O como elemento principal, seguido por Ca, C, Si, Fe, Na, Mg e Al. A amostra exposta em um sistema de rastreamento mostrou-se mais suja em comparação com a amostra exposta com inclinação fixa.

Os teste sob condições naturais realizados em locais próximo a minas em Chitradurga (Índia) conduzidos por Tripath, Aruna e Murthy (2017) identificaram que após 5 dias de exposição ocorreu uma redução de 39,58% na  $I_{sc}$  e 43,18% da potência do módulo sujo; a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) reduziu 4,35% e SR passou de 77,55% para 56,8%. No 1º dia a queda de desempenho do módulo sujo foi de 22,45%. A análise morfológica revelou a presença de formatos de placa, haste e estruturas de placas aglomeradas; os principais elementos são O (51,8%), C (25,9%) e Fe (17,51%); os elementos presentes em menor proporção são Si (2,7%) e Al (2,09%).

Durante a exposição de módulos m-Si por 2 meses em Tiruchirappalli (Índia) foi observado que os módulos com revestimento anti-sujidade apresentaram um aumento de cerca de 10,82% na geração instantânea do módulo em relação ao não revestido. Quanto às características da sujidade, exame de EDS revelam presença de O (50% – 55%), Si (22% – 26%) e Al (12% – 13%), sendo detectados ainda traços de Na, Mg e Manganês (Mn) (EHSAN *et al.*, 2021).

Em Majeed *et al.* (2020) são estudados os efeitos da sujidade em módulos p-Si e m-Si instalados em Islamabad (Paquistão); adicionalmente, são realizados estudos de viabilidade e desempenho de um sistema de limpeza automático. As partículas coletadas variaram entre 0,5  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$ ; 87% encontravam-se entre 2  $\mu\text{m}$  e 45  $\mu\text{m}$ . Os principais elementos identificados foram O (48,36%), C (25,26%), Ca (10,46%) e Si (8,56%); detecta-se ainda traços de Al, Fe, Mg, S, Cobre (Cu) e Ti. A análise mineralógica revelou presentes de quartzo, calcita e sulfeto de silício. Os autores determinam que a perda de potência do m-Si sujo para os ângulos de instalação de 60°, 34,5° e 15° foi de 11,13%, 16,16% e 19,33%, respectivamente, enquanto para o p-Si sujo a 60°, 34,5° e 15° foi de 7,95%, 11,55% e 13,8%, respectivamente; uma perda média de 0,54%/dia no módulo m-Si e 0,38%/dia no p-Si no ângulo de instalação de 34,5° para uma deposição média de 0,154 g/m<sup>2</sup>/dia. Para o ângulo de 34,5° foi registrada uma perda de potência 36,75% para o m-Si e 26,25% para o p-Si para uma deposição de 10,5 g/m<sup>2</sup>. Ao validar o sistema automático proposto verifica-se que a potência foi recuperada em 98% no módulo sujo após limpeza.

No experimento realizado por Ullah *et al.* (2020) durante 120 dias em Lahore (Paquistão) a análise elementar mostrou que C (46%), O (30,4%), Si (8,7%), Al (3,2%), Fe (3,2%), Ca (2,6%) e Tântalo (Ta) (2,5%) são os principais elementos; K (1,1%), Mg (0,8%), Antimônio (Sb) (0,6%), Na (0,4%), Cl (0,2%) e Ti (0,2%) foram observados em pequena quantidade. A composição mineralógica detectou quartzo (50%), alumina (23%), hematita (10%), cianita (9%) e calcita (8%). Em relação à morfologia foi observado elevado número de partículas aglomeradas. Quanto aos aspectos elétricos, a perda de potência reduziu com o aumento do ângulo de inclinação, variando de 45% a 8,3% para inclinação de 0° e 90°, respectivamente, após 42 dias de exposição. Para o ângulo de 30°, ideal para a região de estudo, a perda de energia aumentou de 4% para 23%, após 23 dias de exposição, redução de 0,84%/dia. Ao verificar o desempenhos de módulos bifaciais (emulado com dois módulos monofaciais), na inclinação de 30° e 90°, foi registrada uma perda de potência de 1,12%/dia e 0,22%/dia, respectivamente. Após 13 dias, foi observada perda de 3% da energia para instalação vertical e 15% para ângulo de 30°.

Investigações experimentais para entender as características da poeira e seu efeito no desempenho de módulos p-Si sob as condições climáticas de Sharjah (Emirados Árabes Unidos) foram realizadas por Hachicha, Al-Sawafta e Said (2019). O diâmetro das partículas variou na faixa de 1,61–38,40  $\mu\text{m}$ , sendo que mais de 95% ficou abaixo de 25  $\mu\text{m}$ . A análise elementar mostra presença de O (46,1%), C (20,3%), Ca (10,5%) e Si (10,2%). Os principais minerais detectados foram quartzo, óxido de cálcio e hematita. O experimento ao ar livre verificou que após 2 semanas de exposição, ao aumentar o ângulo de 0° para 25°, a redução da eficiência passou de 37,63% para 14,11%. Todavia, ao

alterar a inclinação entre 25° e 45° a eficiência apresentou melhoria de 4%. Para exposição por cerca de 5 meses a perda de energia aumentou de 0,29% para 12,7% para um aumento da densidade de deposição de 0 a 5,44 g/m<sup>2</sup>.

Em Abdelsalam *et al.* (2021) o impacto da sujidade naturalmente depositada durante 6 semanas em ambiente externo da Universidade de Sharjah, Emirados Árabes foi investigado. As partículas da sujidade apresentaram tamanhos e formatos distintos; tamanho médio de 18 µm. A análise elementar mostrou dominância do O (45,3%), seguido por C (29,3%), Ca (8,8%) e Si (6,6%). A análise mineralógica mostrou que óxido de cálcio corresponde a 36,67% da amostra, seguido por quartzo (30,79%) e óxido de ferro III (11%). Após 5 dias de exposição, a diferença de potência entre o módulo limpo e sujo foi de 1,08% passando para 2,59% após 15 dias (2,04 g/m<sup>2</sup>), 3,94% após 20 dias (3,10 g/m<sup>2</sup>), 4,67% com 26 dias de exposição (3,68 g/m<sup>2</sup>), 6,48% após 34 dias (4,75 g/m<sup>2</sup>) e 8,47% após 41 dias (6,67 g/m<sup>2</sup>).

Para um usina FV com módulo p-Si instalada em um estádio de futebol em Minas Gerais (Brasil), Fraga *et al.* (2018) relatam uma redução de 13,7% da potência durante período seco e 6,5% no período após uma chuva, ocasionando em uma redução de aproximadamente 16,5%/dia da produção no período de seca e 8%/dia no período após uma chuva. Ademais, os principais minerais identificados nas amostras foram quartzo, hematita, caulinita, calcita e muscovita. A análise elementar revela, em maior proporção, presença de Si, Fe, Al, Ca e S; traços de Mn, Mg, K, Cu, P, Na, Cl, Ti, Zn, Estrôncio (Sr) e Zircônio (Zr) também foram identificados. Em relação ao tamanho, cerca de 70% das partículas do Grupo A (orientado para sudoeste) apresentaram diâmetro na faixa de 18–51,5 µm (média de 35,3 µm) e de 10,5–43,5 µm (média de 28,7 µm) no Grupo B (orientado para o nordeste). Quanto à morfologia, as partículas eram heterogêneas, apresentando formas poligonais e de bastonetes.

Em Conceição *et al.* (2018) é verificado o impacto de duas tempestades de areia no Saara, ocorridas em fevereiro e março de 2017, na deposição de sujidade em Évora e Alter do Chão, Portugal. Em Alter do Chão, a amostra de sujidade era composta por aluminossilicatos e halita, apresentando ainda Al, S e Cl; as partículas estavam aglomeradas e com tamanhos diversos. Para as amostras de Évora foram usadas amostras de vidro em diferentes direções e angulações, sendo observado que a amostra E6 (menos afetada) continha aluminossilicatos, quartzo e calcita, enquanto na N6 (com presença de gota de lama) foram detectados quartzo, óxidos de ferro, calcita, gesso e rutilo. Quanto ao desempenho de módulos p-Si instalados em Évora, foi registrada uma redução de 8% na potência de saída e 3% na I<sub>sc</sub>, em virtude da formação de sujidade irregular na superfície do módulo sujo. No evento de março 2017, foi observada redução de 3% na taxa de sujidade e deposição homogênea da sujidade.

Observações experimentais do efeito da temperatura, irradiação e sujidade em módulos m-Si instalados em Teerã (Irã) realizadas por Farahmand *et al.* (2021) mostram que em dias limpos e empoeirados as partículas são compostas de Al, Fe, Cromo (Cr), Níquel (Ni), Mn, Zn, Cádmiio (Cd) e Chumbo (Pb), com tamanho variando entre 2,37 e 3,92 µm. Para módulos instalados a 35°, a I<sub>sc</sub> foi reduzida em 8,42% no verão e 27,27% no inverno. Para instalação horizontal, a redução foi 22,72% e 39,52% no verão e inverno, respectivamente. A V<sub>oc</sub> reduziu 3,14% durante o inverno para o módulo com inclinação de 35°. Apesar do impacto relatado, os autores afirmam que para o local de estudo a temperatura ambiente afetou a potência de saída mais que a sujidade.

Para as condições climáticas do Deserto do Atacama (Chile), Ferrada *et al.* (2019) analisam as características da sujidade e do solo em 4 localidades distintas, nomeadas L1 à L4. Em relação ao tamanho das partículas em L1 (localização mais ao norte), apresentam variação entre 1 e 130 µm (98% são menores que 50 µm); em L2 (zona industrial), 75% das partículas do solo e 56% das partículas dos módulos variaram entre 1 e 10 µm; em L3 (costa), 93% das partículas são menores que 50 µm; em L4 (*Solar Platform of Atacama Desert*), 76% das partículas dos módulos e 60% das partículas do solo são menores que 10 µm. Quanto à forma, em L1, mais de 30% das partículas (32% das amostras de solo e 36% das amostras de módulo) são círculos perfeitos, a maioria são quase circulares; em L2, o número de partículas circulares no solo e nos módulos se assemelha; em L3, as partículas circulares são 25% e 32% da poeira do solo e do módulo, respectivamente; em L4, 15% e 18% das partículas do solo e do módulo, respectivamente, eram circulares. A análise elementar mostrou O e Si como principais elementos para todas as localidades. Ademais, amostras de L4 apresentam S (17%) e Ca (12%); Na (7%) é mais significativo em L1 e as maiores quantidades de Mg (10%) são detectadas nas amostras coletadas em L3. Foram identificados como elementos minerais: albita, anortita, calcita, cristobalita, gesso, halita, quartzo, muscovita e ortoclase; os principais compostos detectados nas partículas coletadas do solo e da superfície do módulo correspondem entre si. Ao analisar impacto da sujidade entre módulos limpo e sujos (sujeitos a 10 meses de deposição) para tecnologias p-Si e CdTe (Telureto de Cádmiio), foi identificado que a corrente foi o parâmetro mais afetado, com redução de pelo menos 40% (tanto o I<sub>sc</sub> quanto a corrente máxima I<sub>Máx</sub>); a V<sub>oc</sub> e o fator de forma (FF) apresentaram redução máximo 5%; a potência de saída reduziu em até 45%.

Em Kazem e Chaichan (2019) foi investigado o impacto da sujidade no desempenho de módulos m-Si instalados em 6 localidades distintas (Shinas, Liwa, Sohar, Al-Khabourah, Al-Suwaiq e Muscat) de Omã. Quanto à composição, a maior parte da amostra era composta por quartzo (até 65%), contendo resíduos de S e hidrocarbonetos. Componentes distintos são observados em locais específicos, por exemplo, a maior quantidade de fumaça e PM (Matéria Particulada) foi observado em Liwa e Sohar, já sais de Na, óxido de cálcio e Mg são mais presentes em Al-Khabourah e Muscat. Quando ao impacto no desempenho, foi registrada uma redução na eficiência de 5,5% (Al-Suwaiq e Al-Khabourah) à 18% (Liwa); o maior declínio mensal na produtividade ocorreu na cidade de Liwa, seguida por Sohar e Muscat. Os autores relatam ainda que, deixar de empregar um método de limpeza por 1 mês, pode resultar na redução da capacidade de produção a uma taxa alta de até 50%.

Um estudo para quantificar as perdas por sujidade causada pela exposição por 8 semanas e tempestades de areia em plantas PV instaladas em Ouargla (Argélia) foi realizado por Dida *et al.* (2020). A análise FRX determinou que os elementos presentes na amostra são Si (52,16%), Fe (16,69%), Al (5,33%), Índio (In) (4,34%), Ti (4,02%), Mg (3,56%),

Ródio (Rh) (3,43%), Zr (3,43%), S (2,64%), Rutênio (Ru) (2,23%), Pd (1,18%), Mn (0,26%), Ni (0,16%), Ítrio (Y) (0,16%), Cr (0,13%), e Cu (0,09%). Quanto ao desempenho de módulos m-Si, o acúmulo de 2,6962 g/m<sup>2</sup> de poeira após 2 semanas de exposição ao ar livre, provocou uma redução de 5,71% da potência e a 4,06% da I<sub>sc</sub>. Após 8 semanas, a deposição de 4,3619 g/m<sup>2</sup> de sujeira ocasionou redução de 6,10% e 8,41% da I<sub>sc</sub> e na potência máxima, respectivamente; a V<sub>oc</sub> reduziu 0,51%. Ao verificar o efeito de uma tempestade de areia em uma usina FV de 30 MW (p-Si) foi constatada redução de mais de 32,85% da energia gerada.

Em Chen *et al.* (2020) é verificado que as partículas de sujidade depositadas em módulos instalados em Hangzhou (China) apresentaram formatos irregulares, mas não esféricos, sendo compostas principalmente por Si (20,63%), Ca (9,22%), Al (8,69%), Fe (8,49%), K (2,7%), Mg (1,65%), Na (1,03%), Ti (0,881%), S (0,369%), P (0,246%). Os principais componentes de óxido foram quartzo (36,26%), óxido de alumínio (14,84%), óxido de cálcio (8,55%), óxido de ferro III (7,03%) e óxido de magnésio (2,57%). Ao serem limpos, após 2 anos de exposição, e expostos por uma semana, os módulos experimentaram uma densidade média de deposição de 0,644 g/m<sup>2</sup>, ocasionando uma redução de 7,4% da potência. Após duas semanas, a saída de energia reduziu 13,9% em relação ao estado limpo, sendo mitigada a 7,07% de perdas após um evento de chuva.

Em Tanesab *et al.* (2017) é avaliado o efeito sazonal da sujidade em módulos a-Si, p-Si e m-Si instalados na *Renewable Energy Outdoor Testing Area* (ROTA) em Perth (Austrália Ocidental) e em módulos p-Si e m-Si instalados na *Politeknik Negeri Kupang* (PNK) em Nusa Tenggara Timur (NTT) (Indonésia). A análise elementar da sujidade revelou que a poeira de ROTA consistia em O (34%) e Si (29,14%) como os principais elementos; quantidades menores de Ca (13,21%), Al (9,26%), Fe (8,83%) e K (5,56%) foram detectadas. A amostra de PNK era predominantemente composta por Ca (31,20%), O (26,68%) e Si (19,42) com menores quantidades de Fe (9,03%), Al (7,28%), K (4,08%) e P (2,31%). Quanto à mineralogia, as partículas de ROTA continham quartzo e óxido de cálcio. Entretanto a poeira do PNK continha uma grande porção de óxido de cálcio e quartzo; quantidades menores de feldspatos e berilita foram detectadas. Morfológicamente a poeira de ROTA e PNK foram classificadas como forma angular e agregada-porosa, respectivamente. Em relação ao tamanho, a porcentagem de argila (<4 µm) (67,34%-ROTA e 57,34%-PNK) e silte muito fino (4-8 µm) (22,24%-ROTA e 18,41%-NPK) da amostra de ROTA são maiores do que a de PNK. Os autores destacaram que as perdas totais de potência dos módulos em ROTA variam de 6 a 8% e de 16 a 19% para módulos em PNK, sendo principalmente contribuídas à sujidade. O módulo PV mais afetado foi o p-Si implantado no PNK, com perda de 10,92 W de potência no final da estação seca, que equivale a uma perda de pelo menos 69 Wh/dia.

### 3.2 Análise Bibliométrica e Discussões

Considerando os estudos descritos anteriormente, na presente seção é analisada a contabilização das informações dos 21 EPs admitidos nessa RSL. Para tal, apresenta-se uma análise bibliométrica considerando o ano de publicação dos EPs, local de realização dos EPs, meios de divulgação científica (periódicos e congressos), autoria e ocorrência de palavras-chave. Na Fig. 2 é apresentado o perfil de distribuição anual do número de EPs publicados, bem como, a frequência acumulada destas publicações. Nota-se crescimento no interesse pela temática em vista ao aumento do número de publicações. Destaca-se que o ano de 2021 apresenta maior volume de publicação mesmo tendo sido considerados EPs publicados até o mês de julho (mês de buscas nos repositórios).

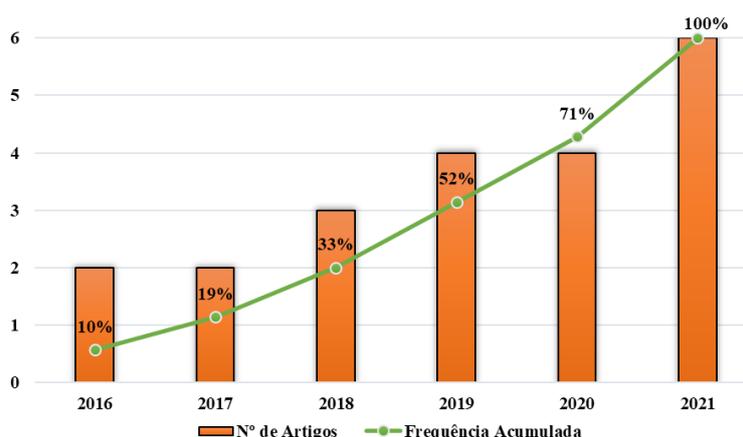


Figura 2 – Distribuição anual da quantidade de EPs.

Ao serem analisados os locais de estudo dos EPs selecionados, observa-se o Qatar com a maior quantidade de estudos realizados, seguido pelo Marrocos, conforme mostrado na Fig. 3. Ademais é importante destacar que a maior parte dos estudos foi realizada em países situados na África e na Ásia.

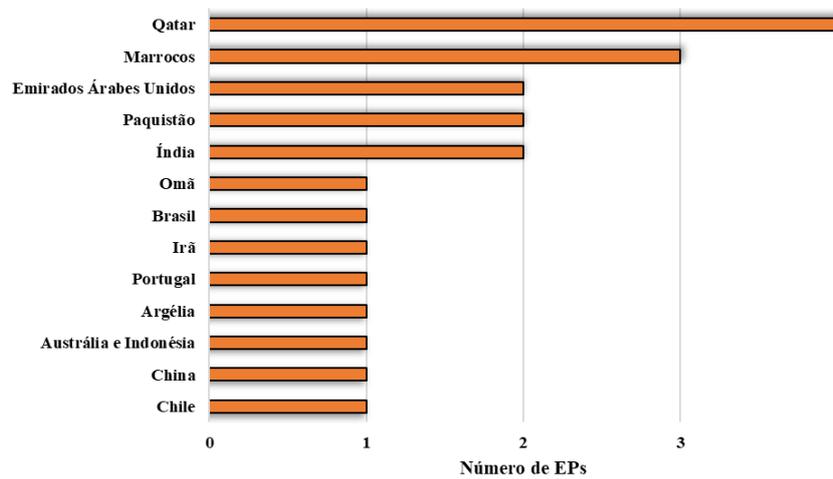


Figura 3 – Locais de realização dos estudos de sujidade.

Quanto ao meio de divulgação, cerca de 95% dos EPs foram publicados em periódicos. Na Fig. 4 é apresentada a quantidade de EPs publicados por meio de divulgação. Destaca-se que o único artigo de conferência foi publicado na *International Conference on Power and Renewable Energy* e o periódico *Solar Energy* concentrou a maior quantidade de publicações.

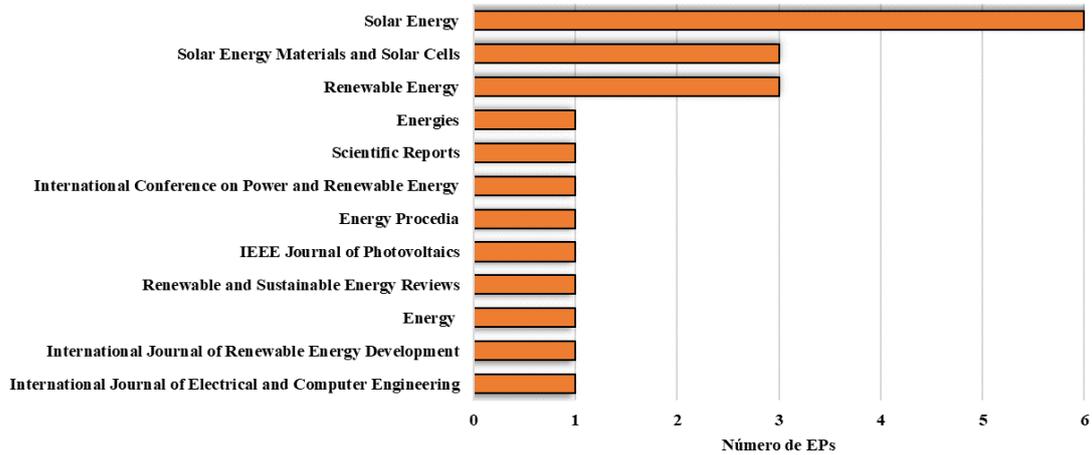


Figura 4 – Principais meios de divulgação dos EPs seleccionados.

Nos EPs apresentados foram identificados 103 autores distintos, sendo que 91 autores (88,3%) participam de apenas um EP, ao passo que 4 (3,8%) estão presentes em três publicações. Na Fig. 5 são apresentados os nomes dos pesquisadores que estão presentes em duas ou mais publicações.

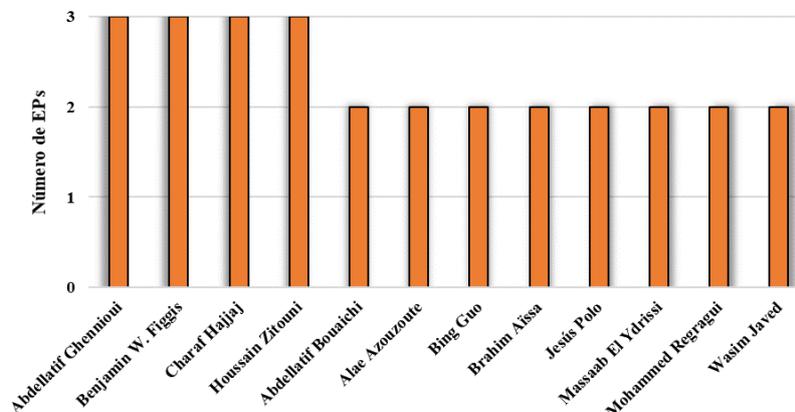


Figura 5 – Pesquisadores com EPs publicados.

Através da análise textual foram detectadas 71 diferentes palavras/termos utilizados como palavras-chaves nos EPs. Destas, 58 foram utilizadas uma única vez. Na Fig. 6 são apresentados os termos utilizados duas ou mais vezes

como palavras-chave. Ao considerar cada palavra de modo isolado observa-se a ocorrência do termo *Dust* em 35% das palavras-chave, 25% utilizam os termos *Photovoltaic* ou *PV* e 15% utilizam a expressão *Soiling*. Vale destacar que, embora alguns dos termos utilizados na busca, como por exemplo *Dirt* e *Investigation*, não tenham sido observados em nenhuma das palavras-chave dos EPs analisados, as buscas nos repositórios consideram ainda a utilização desses termos no título e resumo das publicações, ou seja, a utilização desses termos na *string* de busca pode auxiliar na identificação de EPs.

Ao verificar as tecnologias FV utilizadas nos EPs observa-se maior utilização de módulos p-Si e m-Si; a tecnologia CdTe foi a menos utilizada nos estudos de investigação experimental. No caso de amostras de vidro, é observada sua utilização para realizar análise de densidade de deposição, uma vez que são expostas nas mesmas condições dos módulos, devido à maior praticidade na mensuração da quantidade de sujeira depositada. Ademais, são utilizadas para estudos de perda de transmitância devido à sujeira.

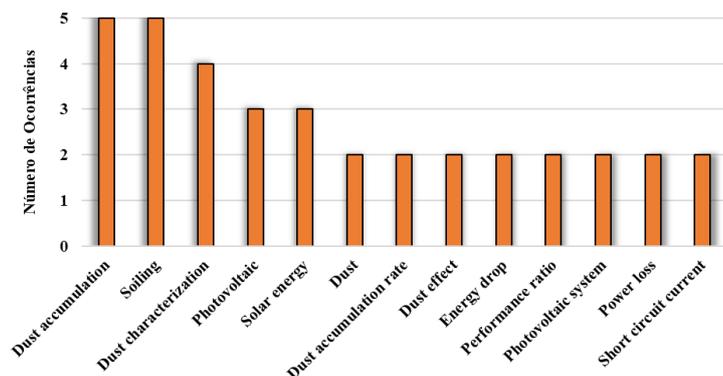


Figura 6 – Principais termos utilizados como palavras-chave nos EPs.

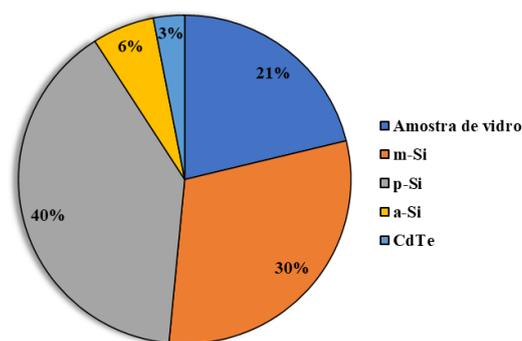


Figura 7 – Principais tecnologias FV utilizadas nos EPs.

Quanto à metodologia para a realização do estudo do impacto da sujidade no desempenho de geração, foi observado que de modo geral os autores expuseram ao menos dois módulos com características semelhantes às mesmas condições em ambiente externo, sendo um destes limpo de forma manual, com intervalos entre limpeza variando da frequência diária (JAVED *et al.*, 2016) à semestral (JAVED *et al.*, 2021), e o outro submetido ao processo de limpeza natural provocado pela ocorrência de chuvas, orvalho ou vento. Pode ainda ser adotado método de limpeza passivo por meio da utilização de nano revestimentos anti-sujidade (EHSAN *et al.*, 2021) ou métodos ativos automáticos (MAJEED *et al.*, 2020).

Em relação aos impactos nas características elétricas, a análise dos EPs mostra que a  $I_{sc}$  foi o parâmetro mais afetado. Contudo, esse impacto é dependente das características da instalação, composição da sujidade e tempo de exposição (densidade de exposição), podendo apresentar redução de 39,58% após 5 dias de exposição em locais próximos a minas em Chitradurga (Índia) (TRIPATH, ARUNA E MURTHY, 2017) a 40% após 10 meses de exposição no Deserto do Atacama (Chile) (FERRADA *et al.*, 2019). Outra questão que merece destaque é a influência de eventos não ordinários sobre o processo de deposição de sujidade, uma vez que, foi observada redução de 32,85% da geração de uma usina FV de 30 MW após a ocorrência de uma tempestade de areia em Ouarga (Argélia) (DIDA *et al.*, 2020) e uma redução de 45%/dia do índice de limpeza de módulos p-Si instalados em Doha (Qatar) (JAVED *et al.* (2016)).

Quanto às características físico-químicas da sujidade, foi observada variação da composição em função do local de instalação, ocorrência de eventos não ordinários e tempo de exposição. Em relação ao tamanho foram detectadas partículas desde 0,6  $\mu\text{m}$  em Doha (Qatar) (ILSE *et al.*, 2018) até 130  $\mu\text{m}$  no Deserto do Atacama (Chile) (FERRADA *et al.*, 2019). Morfologicamente as partículas apresentaram-se com formatos diversos, sendo relatada mudança no formato predominante à medida que o tempo de exposição aumenta (ZITOUNI *et al.*, 2021). Quanto à natureza química, foi observada variação da composição da sujidade para cada localidade estudada; contudo, elementos como Si, Ca, Al, O, Fe, Ca e Na aparecem com maior frequência e em quantidade significativa. Os principais compostos minerais detectados foram quartzo, calcita e dolomita. Vale destacar que as principais técnicas utilizadas para o estudo das características físico-químicas da sujidade foram MEV, EDS, FRX e DRX.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente artigo foram apresentados os resultados de uma revisão de literatura sobre as características e impactos da sujidade em sistemas FV. Em função da quantidade de publicações sobre a temática, o procedimento metodológico empregado foi uma Revisão Sistemática da Literatura, uma vez que, foram estabelecidos de maneira prévia os procedimentos de busca, estratégias de seleção de informações e critérios de inclusão/exclusão dos EPs. Após a execução de todas as etapas estabelecidas no protocolo de condução foram identificados 150 EPs; contudo, nesse artigo, por questão de síntese, foram apresentados os estudos experimentais realizados em condições externas que descrevem as características físico-químicas da sujidade e os efeitos no desempenho de geração de sistemas FV.

Através da análise dos EPs foi observado que o processo de deposição de sujidade é influenciado por fatores como ocorrência de chuvas, velocidade dos ventos, formação de orvalho, características geográficas locais e eventos não ordinários, tais como, tempestades de areia e construções de edifícios. Ademais, foram observadas diferentes respostas no desempenho de módulos FV, havendo dependência em relação à tecnologia FV utilizada. Através da análise bibliométrica foi observado aumento de interesse na realização de estudos relacionados a essa temática, bem como forte tendência na investigação da sujidade em localidades da África e Ásia. A tecnologia p-Si foi a mais utilizada nos estudos; as características físico-químicas da sujidade variam dependendo da localidade, sendo utilizadas, principalmente, as técnicas MEV, EDS, FRX e DRX para o estudo de sua composição e caracterização física.

### **Agradecimentos**

Paulo C. M. Carvalho agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisador concedida.

### **REFERÊNCIAS**

- Afridi, M. A. *et al.* Determining the effect of soiling and dirt particles at various tilt angles of photovoltaic modules. *International Journal of Engineering Works*, 4(8), p. 143–146, 2017.
- Abdelsalam, M. A. M. *et al.* Experimental study of the impact of dust on azimuth tracking solar PV in Sharjah. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, v.11, n. 5, p. 3671-3681, 2021.
- Aïssa, B. *et al.* Structural and physical properties of the dust particles in Qatar and their influence on the PV panel performance. *Sci Rep* 6, 31467 (2016).
- Alnasser, T. M. A. *et al.* Impact of dust ingredient on photovoltaic performance: An experimental study. *Solar Energy*, v. 195, p. 651-659, 2020.
- Araújo, D. N.; Carvalho, P. C. M. de; Dupont, I. M. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. *Revista Tecnologia*, v. 40, n. 2, 2019.
- Azouzoute, A. *et al.* Modeling and experimental investigation of dust effect on glass cover PV module with fixed and tracking system under semi-arid climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. v. 230, 111219, 2021.
- Barbosa, E. R.; Faria, M. D. S. F. D.; Gontijo, F. d. B. Influência da sujeira na geração fotovoltaica. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado. Rio Grande do Sul. Brasil. [S.l.: s.n.], 2018.
- Chen, J. *et al.* Study on impacts of dust accumulation and rainfall on PV power reduction in East China. *Energy*, v. 194, 116915, 2020.
- Conceição, R. *et al.* Saharan dust transport to Europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in Portugal. *Solar Energy*, v. 160, p. 94-102, 2018.
- Costa, S. C.; Diniz, A. S. A.; Kazmerski, L. L. Solar energy dust and soiling r&d progress: Literature review update for 2016. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 82, p. 2504–2536, 2018.
- Dida, M. Output power loss of crystalline silicon photovoltaic modules due to dust accumulation in Saharan environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 124, 109787, 2020.
- Ehsan, R. M. Effect of Soiling on Photovoltaic Modules and Its Mitigation Using Hydrophobic Nanocoatings. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 11, n. 3, p. 742-749, 2021.
- Farahmand, M.Z. *et al.* The Simultaneous Impacts of Seasonal Weather and Solar Conditions on PV Panels Electrical Characteristics. *Energies*, 14, 845, 2021.
- Fraga, M. M. Analysis of the soiling effect on the performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in Minas Gerais, Brazil. *Solar Energy*, v. 163, p. 387-397, 2018.
- Ferrada, P. *et al.* Physicochemical characterization of soiling from photovoltaic facilities in arid locations in the Atacama Desert. *Solar Energy*, v. 187, p. 47-56, 2019.
- Freitas Filho, Marcelo Ferreira *et al.* Análise da composição físico-química da sujidade de plantas fotovoltaicas: estudo de caso para Fortaleza. *Revista Tecnologia*, v. 41, n. 1, 2020.
- Guo, B. *et al.* Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar. In: 2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE). IEEE, p. 1-6, 2015.
- Hachicha, A. A.; Al-Sawafta, I.; Said, Z. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. *Renewable Energy*, v. 141, p. 287-297, 2019.
- Hernandes, E. *et al.* Using QJM and TAM to evaluate start-a tool that supports systematic review, *CLEI Electronic Journal*, v. 15, n. 1, p. 3–3, 2012.
- Ilse, K. K. *et al.* Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. v. 186, p. 309-323, 2018.
- Jaszczur, M. *et al.* Impact of dust and temperature on energy conversion process in photovoltaic module. *Thermal Science*, v. 23, n. Suppl. 4, p. 1199-1210, 2019.
- Javed, W. *et al.* Photovoltaic performance degradation due to soiling and characterization of the accumulated dust. 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 2016, p. 580-584.

- Javed, W. *et al.* Dust potency in the context of solar photovoltaic (PV) soiling loss. *Solar Energy*, v. 220, p. 1040-1052, 2021.
- Kazem, H. A.; Chaichan, M. T. Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman. *Solar Energy*, v. 139, p. 68-80, 2016.
- Kazem, H. A.; Chaichan, M. T. The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman. *Solar Energy*, v. 187, p. 30-38, 2019.
- Majeed, R. Experimental investigation of soiling losses and a novel cost-effective cleaning system for PV modules. *Solar Energy*, v. 201, p. 298-306, 2020.
- Menoufi, K. *et al.* Dust accumulation on photovoltaic panels: a case study at the east bank of the Nile (Beni-Suef, Egypt). *Energy Procedia*, Elsevier, v. 128, p. 24–31, 2017.
- Nascimento, L. R. do *et al.* Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1070-1082, 2020.
- Nepal, P. *et al.* Accurate soiling ratio determination with incident angle modifier for PV modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 295–301, 2018.
- Picotti, G. *et al.* Soiling of solar collectors—Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 2343-2357, 2018.
- Silva, A. M. *et al.* The study and application of evaluation methods for photovoltaic modules under real operational conditions, in a region of the Brazilian Southeast. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 138, p. 1189–1204, 2019.
- Ribeiro, S. *et al.* Literature Review on the Theory of Constraints Applied in the Software Development Process, in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 11, p. 2747-2756, 2018.
- Tanesab, J. *et al.* Seasonal effect of dust on the degradation of PV modules performance deployed in different climate areas. *Renewable Energy*, v. 111, p. 105-115, 2017.
- Tripathi, A. K.; Aruna, M.; Murthy, C. Performance Evaluation of PV Panel Under Dusty Condition. *International Journal of Renewable Energy Development*, v. 6, n. 3, p. 225-233, 2017.
- Ullah, A. Investigation of soiling effects, dust chemistry and optimum cleaning schedule for PV modules in Lahore, Pakistan. *Renewable Energy*, v. 150, p. 456-468, 2020.
- Zitouni, H. *et al.* Experimental investigation of the soiling effect on the performance of monocrystalline photovoltaic systems. *Energy Procedia*, v. 157, p. 1011-1021, 2019.
- Zitouni, H. *et al.* Experimental investigation and modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables: A case study of semi-arid climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. v. 221, p. 110874, 2021.

## SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW ON SOILING IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: EFFECTS AND CHARACTERISTICS

**Abstract.** *Considering the crescent interest in the use of photovoltaic (PV) systems to production of electrical energy and that soiling impacts on performance, this article aims to present a literature review on the characteristics and effects of dirt in PV systems. Thus, a methodological procedure is adopted for a systematic literature review (SLR) to optimize the process of searching, selecting, and extracting of the information. Through the execution of the search protocol and the use of the StArt tool, 21 primary studies (PS) that present results of outdoor investigations on the characteristics and effects of soiling naturally deposited on PV modules of different technologies installed in different locations around the world were identified and analyzed. The bibliometric analysis identifies the annual distribution of publications, the locations where the studies were carried out, the means of scientific dissemination that published the PSs and the main researchers. Through the analysis of the PSs, it was observed that the short-circuit current ( $I_{sc}$ ) is usually the parameter most affected by the presence of soiling, as well as that there are different responses depending on the PV technology. Furthermore, it was verified that elements such as Si, Ca, Al, O, Fe, Ca and appear in the composition more frequently and that the main mineral compounds detected are quartz, calcite and dolomite.*

**Key words:** *Systematic Literature Review, Photovoltaic Systems; Soiling.*