

ESTUDO DE REVISÃO SOBRE AS TÉCNICAS APLICADAS NA REMOÇÃO DE SUJIDADES DEPOSITADAS SOBRE A SUPERFÍCIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS, BEM COMO OS SEUS EFEITOS

Jorge Augusto Pereira Rodrigues (PUC Minas) - jorgeaugusto.eng.seg.trab@gmail.com

Antonia Sonia Alves Cardoso Diniz (GREEN - PUCMINAS) - asacd2012@gmail.com

Resumo:

Este artigo possui características qualitativas sobre as técnicas de limpeza de módulos fotovoltaicos, a fim de proporcionar melhor limpeza da sujeira, sem afetar a qualidade dos módulos. Esta revisão foi baseada em artigos relacionados à área publicados nos últimos anos no portal de periódicos da CAPES/MEC. Vários fatores internos e externos vêm sendo estudados a fim de caracterizar e mensurar as diversas perdas na produção de energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos, dentre os quais, destaca-se a deposição da sujeira sobre a superfície frontal, que não apenas reduz a absorção dos fótons pelas células solares, reduzindo sua potência de saída, como também leva a outros efeitos térmicos, que podem resultar em falha completa do módulo. Como decorrência das técnicas de remoção da sujeira depositada no vidro da superfície frontal dos módulos advêm impactos ainda não tão conhecidos sobre as superfícies, como o aumento da rugosidade superficial e ranhuras que podem reduzir a transmitância e aumentar a reflexão do equipamento e adesão da poeira.

Palavras-chave: *Sujeira; Técnicas; Remoção; Transmitância.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

ESTUDO DE REVISÃO SOBRE AS TÉCNICAS APLICADAS NA REMOÇÃO DE SUJIDADES DEPOSITADAS SOBRE A SUPERFÍCIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS, BEM COMO OS SEUS EFEITOS

Jorge Augusto Pereira Rodrigues – jorgeaugusto.eng.seg.trab@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas,
Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica.

Túlio Pinheiro Duarte – tulio-p.duarte@outlook.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas,
Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica.

Lawrence Lee Kazmerski – solarpvkaz@gmail.com

Universidade do Colorado / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas

Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / Orientadora e Professora universitária

Resumo. Este artigo apresenta uma revisão da literatura sobre as técnicas de limpeza de módulos fotovoltaicos, a fim de proporcionar melhor limpeza da sujidade, sem afetar a qualidade dos módulos. Esta revisão foi baseada em artigos relacionados à área publicados nos últimos anos no portal de periódicos da CAPES/MEC. Vários fatores internos e externos vêm sendo estudados a fim de caracterizar e mensurar as diversas perdas na produção de energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos, dentre os quais, destaca-se a deposição da sujidade sobre a superfície frontal, que não apenas reduz a absorção dos fótons pelas células solares, reduzindo sua potência de saída, como também leva a outros efeitos térmicos, que podem resultar em falha completa do módulo. Como decorrência das técnicas de remoção da sujidade depositada no vidro da superfície frontal dos módulos advêm impactos ainda não tão conhecidos sobre as superfícies, como o aumento da rugosidade superficial e ranhuras que podem reduzir a transmitância e aumentar a reflexão do equipamento e adesão da poeira.

Palavras-chave: Sujidade; Técnicas; Transmitância.

1. INTRODUÇÃO

Desde o entendimento do princípio físico que rege a conversão de radiação solar em eletricidade, a humanidade tem se dedicado a desenvolver novas tecnologias e materiais que propiciem e dinamizem esse fluxo. Buscas por melhores eficiências na conversão, redução de espessuras, flexibilidade de aplicação, novas junções, entre outros fatores são os campos preponderantes e que movimentam as pesquisas e desenvolvimento da tecnologia desde então.

Como muito se vê, lideranças mundiais têm se dedicado a atualizar as matrizes energéticas para as novas necessidades e preocupações globais. Motivadas pela eminente escassez de recursos não-renováveis, como petróleo, gás natural e carvão mineral; e pela necessidade de redução da emissão de gases causadores do efeito estufa fontes renováveis têm ganhado destaque nos planejamentos energéticos desde então.

Dados da Agência Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA) (2017), colocam que a maior parte da energia gerada no mundo ainda vem de origem não-renovável, o carvão mineral (31,7%), o petróleo (28,1%) e o gás natural (21,6%) são as principais fontes primárias das matrizes energéticas mundiais.

Ainda conforme a IEA (2017), a geração de eletricidade global também é baseada nas fontes não-renováveis, como o carvão mineral (39,3%) e gás natural (22,9%), muito se deve a praticidade de implementação de usinas térmicas baseadas nestas fontes energéticas e da maior confiabilidade de operação, visto que a geração não necessita ser interrompida devido a fatores climáticos.

No que diz respeito à energia fotovoltaica ocorreu um salto de produção global, entre os anos de 2005 e 2015 de quase 6.100%, saltando de 4TWh para 247TWh, em 2015. Países como a China (18,3%) e Alemanha (15,7%) contribuíram para disseminar e incentivar o uso dessa fonte renovável e limpa. Países como Itália e a própria Alemanha já contam com quase 10% de dependência das suas matrizes nacionais relacionada à geração fotovoltaica. (IEA, 2017)

Dados do Balanço Energético Nacional – BEN (2017), mostram que o Brasil consome um total de 580TWh, deste total 19,5% são de fontes não renováveis, como gás natural (9,76% do total) e carvão (2,94% do total); os 80,5% restantes da matriz vêm de fontes renováveis, principalmente hidráulicas (65,80% do total). Apesar de serem consideradas uma fonte limpa, a construção de usinas hidrelétricas demanda uma grande área alagada, com impactos significativos à fauna e flora local.

Para a crescente projeção de demanda energética, alternativas que caminhem em conjunto com a sustentabilidade e reduzam a necessidade de fontes fósseis são incentivadas. A diversificação da matriz energética, com inserção de potencial gerador que utilizem fontes renováveis são vistos como alternativas ao sistema convencional.

Parques eólicos e solares já se consolidaram como tecnologias economicamente viáveis, tanto ao redor do globo, quanto em território nacional. Contudo, dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2017), demonstram o destaque para o sistema de micro e minigeração distribuída, em que quase 6.700 domicílios já contavam com a tecnologia em 2016.

Informações fornecidas pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR (2017), apresentam o salto para quase 20mil domicílios com sistemas de micro e minigeração distribuída, totalizando 0,02% das

unidades consumidoras do país.

Informações fornecidas pelo Banco de Informações de Geração – BIG, da ANEEL, (2018), apresentam a existência de 2.235 usinas solares instaladas no país, com capacidade instalada de 1,31GW. Há ainda a previsão de construção de 61 novos empreendimentos, com adição de novos 1,70GW à rede elétrica nacional.

1.1. Objetivo

A finalidade dessa revisão da literatura é identificar os principais resultados encontrados nos últimos anos a cerca da pesquisa sobre a remoção de sujidade da superfície dos módulos fotovoltaicos, com foco nas técnicas empregadas, bem como os efeitos provocados nos módulos fotovoltaicos.

2. METODOLOGIA

O presente estudo constitui uma revisão da literatura específica de caráter sistemático, com a finalidade de avaliar as técnicas de limpeza empregadas para a remoção de sujidade na parte frontal dos módulos fotovoltaicos. Para isso, definiu-se que o critério de inclusão de um artigo nessa revisão seria conter pelo menos uma dessas ênfases: técnicas de limpeza; influência da limpeza na durabilidade do módulo fotovoltaico. Para tanto, organizou-se a seleção dos artigos utilizados na revisão da literatura de acordo com o fluxograma representado na Figura 1:

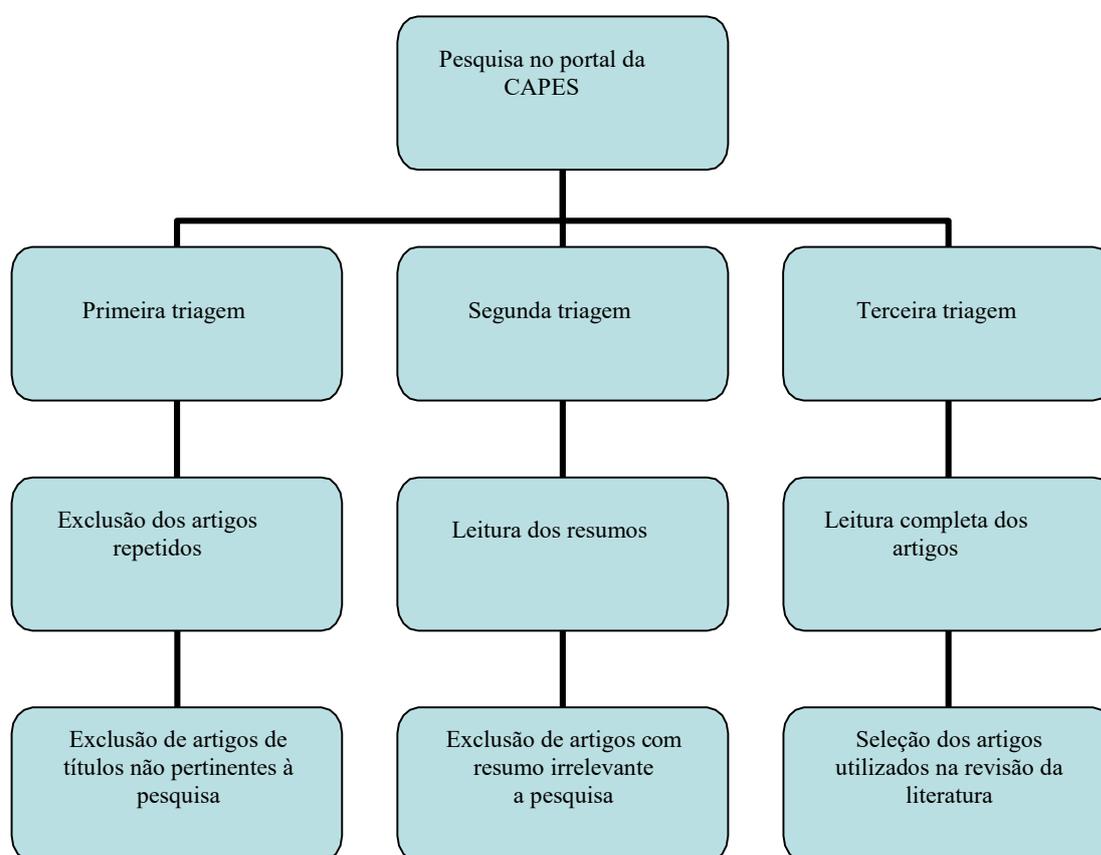


Figura 1 – Fluxograma com as fases do processo seletivo dos artigos.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa no portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), entre os dias 19 de outubro de 2019 e 01 de dezembro de 2019, tendo a finalidade de selecionar as bases de dados com artigos sobre o tema. Estabeleceu-se que seriam incluídos somente os artigos publicados entre os anos de 2013 e 2019, baseou-se a escolha no aumento de inovações e pesquisas sobre o tema nos últimos anos, assim a revisão retrataria, com maior precisão, a atual realidade dos avanços relacionados as técnicas de limpeza dos módulos fotovoltaicos.

Com relação ao idioma, aceitou-se português, inglês e espanhol. Inicialmente foram selecionados 219 artigos, os quais foram submetidos à primeira triagem, com o intuito de excluir, por meio da análise dos títulos, trabalhos científicos que não possuíam relevância à pesquisa. Desses, apenas 83 restaram, em seguida, submetem-se os artigos selecionados na etapa anterior à segunda triagem, que consistiu na leitura dos resumos, também para identificar somente aqueles que correspondiam ao objetivo da pesquisa. Após essa triagem ficaram 17 artigos, por fim, leram-se integralmente os artigos remanescentes e para escolher os relevantes à revisão. Ao final das triagens foram selecionados 11 artigos.

3. TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE SUJIDADE EM SUPERFÍCIES

De todos os efeitos elencados, promovidos pela sujidade, nenhum apresenta fator positivo ao funcionamento do sistema,

todos são correlacionados à fatores que induzem a perda de potência e de degradação dos módulos, sendo, portanto, necessário o estudo de técnicas que realizem a retirada dessa camada depositada, a fim de se reestabelecer o funcionamento previsto.

Técnicas de remoção modernas já caminham para medidas sustentáveis, com sistemas que não utilizem, ou utilizem o mínimo possível, de água como fator primário. Visto ser um recurso escasso e com perspectivas de racionamento/falta em várias localidades do mundo, principalmente nos locais de instalação desses sistemas que possuam maior viabilidade, como áreas desérticas e degradadas por outras atividades.

A fim de se diferenciar algumas técnicas para posterior estudo e análise, há a divisão em técnicas ativas e passivas. Técnicas ativas são aquelas que necessitam de energia para executar o trabalho, como os métodos eletrostáticos, ou os mecânicos, para realizar o movimento dos mecanismos. Métodos passivos não necessitam de energia para terem sua aplicação ativada, como exemplo tem-se o método do revestimento do substrato a partir de superfícies hidrofóbicas ou hidrofílicas (Syafiq et al., 2017).

Lu, Zhang e Hu (2013) propuseram um método de remoção baseado em atuador linear de piezoelétrico. Dessa forma, o atuador move-se linearmente em uma guia e com auxílio de uma estrutura interligada om cerdas de polipropileno, realiza a limpeza da superfície do módulo. O trabalho contemplou a análise quanto à variação do comprimento desta haste limpante, considerando a possibilidade de posicionamento variada em um módulo com estrutura retangular; da carga de aplicação pela velocidade de deslocamento e carga de aplicação pela eficiência obtida com a limpeza.

Ainda conforme Lu, Zhang e Hu (2013), chegou-se aos resultados de que uma carga de aplicação menor, em torno de 1N, é mais benéfica ao ganho de energia do sistema. Quanto ao posicionamento do conjunto de limpeza em um módulo retangular, a haste posicionada na menor direção apresentou melhor ganho de energia após a passagem. A Figura 2, retiradas do artigo, apresentam o sistema desenvolvido para a limpeza e o efeito do mesmo sobre o módulo.



Figura 2 – Atuador linear baseado em piezoelétrico desenvolvido pelos autores, à direita módulo antes e após a limpeza realizada pela técnica.

Shehri e Outros (2016) discutem o impacto da deposição de sujeira e da remoção desta, a partir de um sistema baseado em escovação seca, na transmitância do vidro. Foi feita exposição do vidro ao ambiente externo, encontrado em Thuwal, na Arábia Saudita, em uma inclinação completamente horizontal, resultados indicaram a redução da transmitância, proporcional ao tempo de exposição e acúmulo de partículas, após uma semana de análise. O primeiro dia de exposição teve o maior efeito na transmitância, queda de 2%, quando comparado com o estado inicial, enquanto os demais dias apresentaram reduções bem menores.

Continuando com Shehri e Outros (2016), agora analisando-se o efeito de uma limpeza seca aplicada ao sistema, discorre-se sobre a preocupação da efetividade deste tipo de técnica. Devido ao potencial da água ou de outros agentes químicos líquidos envolvidos dissolverem a sujeira e servirem como meio de transporte para estas partículas, entende-se que este tipo de técnica seja mais eficiente. Em sistemas à seco, o método de retirada é através da fricção e o ar é o meio utilizado para o transporte. Outra preocupação quanto ao método é o efeito da fricção nos substratos, visto que a força de aplicação deverá ser maior que a força de adesão das partículas no sistema.

Tendo em vista estas preocupações, Shehri e Outros (2016) desenvolveram um sistema mecânico para avaliação dos efeitos de limpeza e fricção da superfície frontal com o uso de escova de nylon. O sistema consistia na repetibilidade da passagem da escova sobre o substrato, amparada pelo sistema de acionamento. Várias amostras de vidro foram ensaiadas por tempos controlados e as medições de transmitância foram feitas posteriormente. Os resultados indicam que, independentemente do tempo de aplicação de escovação, não se retorna ao estado original com esse sistema, ocorre a restauração de até 90,67% da transmitância apenas. Enquanto que a utilização de água na limpeza fez com que ocorresse a completa restauração do estado original. A Figura 3 apresenta o sistema mecânico desenvolvido para o experimento e os resultados da transmitância analisados das amostras.

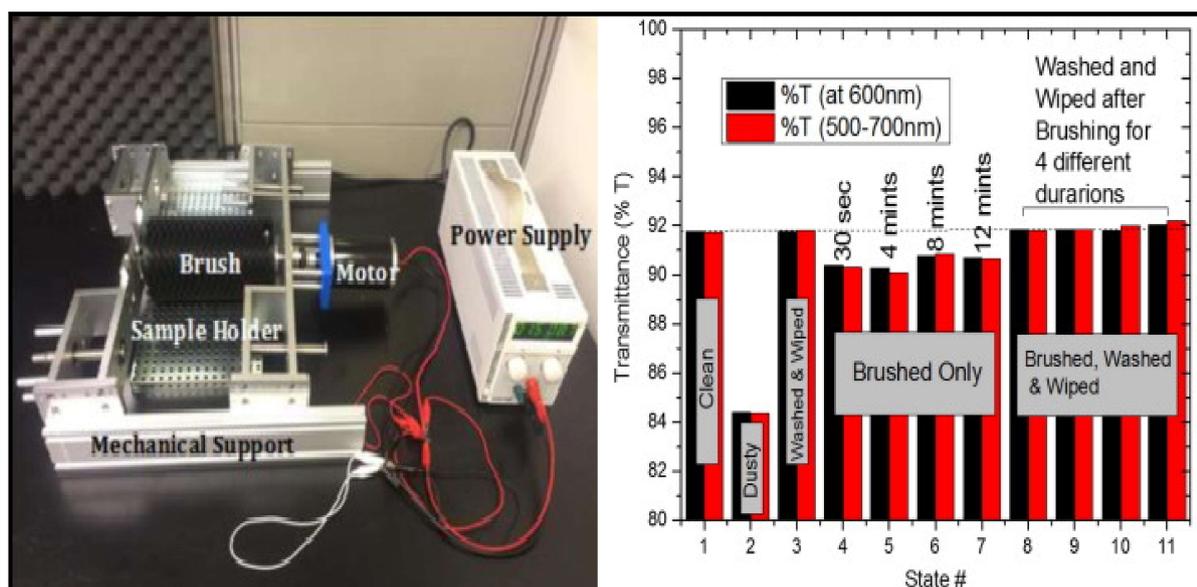


Figura 3 – Configuração o sistema de escovação e espectro da transmitância para os diferentes métodos analisados.

Moharram e outros (2013) estudaram a influência do uso de água e surfactantes na performance de módulos fotovoltaicos, o objetivo do trabalho era minimizar o uso de água e ainda se conseguir alto rendimento na remoção da sujeira encontrada na região do Cairo, Egito. O experimento consistia na remoção de sujeira de seis módulos FV e sistema de água fechado, com capacidade para 0,16m³, sistema de bombeamento próprio e sistema de filtragem. De forma sucinta, a água flui: tanque → bomba → filtro → esguicho → módulos FV → tubos de drenagem → tanque, fechando o ciclo.

O experimento foi conduzido ao longo de 45 dias, com aplicação da água pura e da água com surfactante ao longo de 10 minutos todos os dias. A perda de água do sistema, através da evaporação e respingos foi de 10% ao longo da análise, mostrando o potencial de aplicação em áreas desérticas. Três experimentos distintos foram feitos nos módulos, de forma não simultânea, para se determinar a influência na performance, no primeiro ocorreu ausência de limpeza, no segundo limpeza executada apenas com água não-pressurizada e no terceiro a limpeza foi feita com uma mistura de água com surfactantes (MOHARRAM et al., 2013).

O primeiro experimento conduzido mostrou a influência da sujeira no desempenho do sistema e a real necessidade de se realizar uma limpeza para manter a potência de saída em níveis estáveis. O segundo experimento executado mostrou uma perda de eficiência de 50% ao final dos 45 dias, algo em torno de -0,14%/dia, realçando que sistemas não-pressurizados não são os mais adequados para limpeza, contudo as perdas de água em sistemas pressurizados são mais altas devido à respingos, o que é um problema para áreas com escassez do recurso. O terceiro experimento, executado com o uso de água mais surfactantes, apresentou redução de 3% na eficiência, que pode ser explicado pela época do experimento devido à variação da temperatura de trabalho do módulo, portanto o uso de surfactante mostrou-se um eficiente método de limpeza (MOHARRAM et al., 2013).

A Figura 4, apresenta os módulos em cada um dos experimentos, (a) sem a execução da limpeza, (b) limpeza com água não-pressurizada e (c) limpeza com água não-pressurizada e surfactantes.

Syafiq et al. (2018) estudaram os avanços em métodos auto limpantes de sistemas fotovoltaicos, com a perspectiva de manter um nível estável de performance. Pesquisas elencaram diversos métodos de limpeza, sendo eles do tipo mecânico, como os que utilizem escovas, ar comprimido e vibração; tipo eletrostático e métodos com base em revestimento da superfície.

Métodos de recobrimento da superfície frontal de vidro modificam as suas propriedades químicas, tais como adesão, molhabilidade, resistência à corrosão e ao desgaste. Superfícies hidrofóbicas necessitam ter baixa energia de superfície com propriedades repelentes à água, enquanto superfícies hidrofílicas demandam alta energia superficial, devido as propriedades de molhabilidade. De qualquer modo, o revestimento auto limpante é uma solução que requer baixo gasto energético e pouca manutenção (SYAFIQ et AL., 2018).

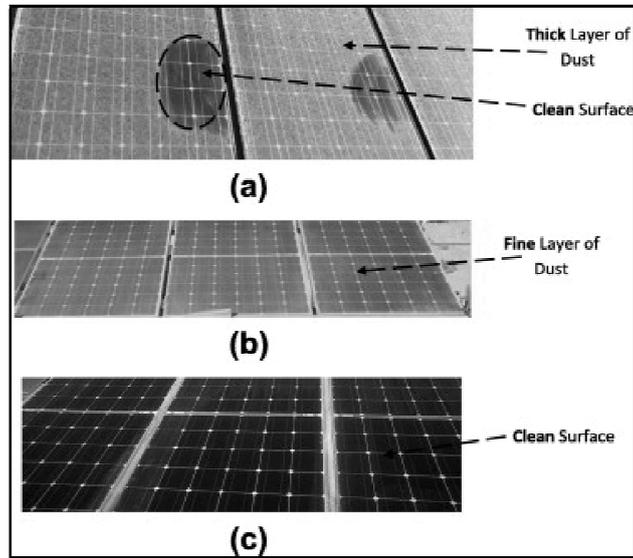


Figura 4 – Módulos solares após diferentes análises.

Os métodos mecânicos estudados por Syafiq et al. (2018) foram àqueles que removem a sujidade a partir da escovação, ar pressurizado e vibrações ultrassônicas, por exemplo. A utilização de máquinas, para executar a limpeza, aumentam a eficiência e reduzem o tempo demandado comparados com mão-de-obra humana. As vantagens de sistemas baseados no uso de ar e água é a possibilidade dos mesmos retirarem calor da superfície dos módulos. Os métodos eletrostáticos ainda carecem de estudos e análises, devido às limitações dos modelos até então propostos e poucos estudos aplicados.

Chen et al. (2017) avaliou a força de escovação dos módulos, contendo particulados da atmosfera de Doha, Catar. O estudo mostra que a limpeza em condições sem água, a carga de escovação é independente. Contudo, para situações com presença de água, há-se a necessidade, proporcional à presença da água, de aumentar a carga de aplicação, almejando-se obter uma boa eficiência para a limpeza.

Deb e Brahmhatt (2018) propuseram um sistema automatizado de limpeza de módulos sem a utilização de água, comparando-o com um sistema sem efetiva limpeza em um período de um mês, na região de Ahmedabad, na Índia. O protótipo da proposta foi construído a um custo de US\$450,00, com a expectativa de uma produtividade serial e em massa de ter esse valor reduzido. A Figura 5 apresenta o protótipo proposto para limpeza sem utilização de água. O princípio de funcionamento baseia-se na rotação da escova sob o substrato do módulo.



Figura 5 – Protótipo de limpeza sem utilização de água

O potencial mensurado, ao longo do mês, da limpeza foi um crescimento de 9,05% na conversão energética dos módulos. O cálculo realizado na eficiência econômica da proposta mostrou um ganho de 6,31%, considerando a produção do protótipo e custo energético da região, com vias de melhora em caso de produção massiva do equipamento (DEB e BRAHMBHATT, 2018).

Outra técnica ativa, com princípio mecânico de funcionamento, foi desenvolvida por Parrot et al. (2018), consistindo na automatização do processo de limpeza com o uso de escova à seco para remoção da sujidade em Thuwal, na Arábia Saudita. O estudo visa o desenvolvimento de um novo tipo de escova, que utiliza borracha de silicone na sua estrutura.

Um sistema instalado, com inclinação de 27°, foi utilizado como campo de experimento, consistindo em 3 métodos distintos de limpeza avaliados, a fim de se comparar a eficiência do sistema proposto. Limpeza efetuada pelo protótipo, limpeza realizada manualmente e com instrumentos próprios, de forma mensal e outra de forma semanal. O estudo apontou que o uso diário do protótipo, com a escova de borracha de silicone, foi efetivo na limpeza dos módulos, apresentando ganhos de performance ao ser comparado com o resultado de limpezas semanais e mensais (PARROT et al., 2018). A Figura 6 apresenta os dados obtidos pelo experimento e o equipamento proposto pela equipe.

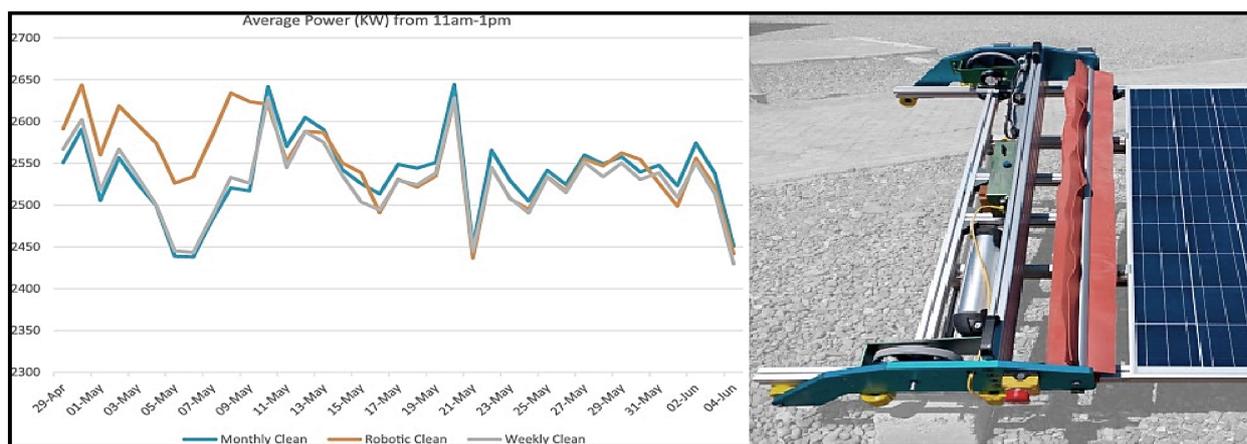


Figura 6 – Avaliação da Eficiência do método de limpeza, a direita, equipamento proposto com escova de borracha de silicone.

Estudos realizados por Arabatzis et al. (2017) avaliaram a fotocatalise como método de revestimento auto-limpante em módulos fotovoltaicos caracterizados e monitorados em condições reais de operação. A exposição do revestimento foi monitorada ao longo de meses em duas regiões distintas, na Grécia e na China, a fim de se mensurar o efeito devido ao uso do material. Sob condições reais de uso do revestimento apresentou melhora média de 5-6% no desempenho do módulo. Servindo para melhorar as condições sob luz difusa, 19% de melhora, e irradiação com alto ângulo de incidência, melhora de 30%, fatores estes atribuídos ao revestimento devido às propriedades anti-reflexivas e anti-sujidade.

Kawamoto e Guo (2017) discutem a melhoria em um sistema eletrostático para limpeza de módulos fotovoltaicos. Alta tensão é aplicada em eletrodos paralelos que estão imersos no substrato, com a tendência de repelir a sujidade presente na superfície. O empecilho encontrado no método é quanto a pequenos particulados que não são eficientemente repelidos. Dessa forma o experimento foi conduzido a partir de módulos inclinados em 20°, situação tipicamente encontrada em sistemas instalados no Oriente Médio. A tensão aplicada foi do tipo retangular, com frequência baixa, na ordem de 1Hz.

O funcionamento do sistema se baseia em a soma da força eletrostática, acrescida de forças externas, como a do próprio vento deve ser superior à força gravitacional e de adesão entre as partículas e o substrato. As melhorias propostas com o estudo envolveram, portanto, uma maior frequência de operação do sistema de limpeza, visando minimizar os efeitos de adesão entre partículas e substrato; tentativa de sincronismo do método com a incidência de ventos naturais, a fim de se maximizar o efeito da limpeza; utilização de recobrimentos em conjunto com o método; redução do coeficiente de isolamento e da espessura da superfície (KAWAMOTO e GUO, 2018).

Conforme Quan e Zhang (2016), a aplicação de revestimentos transparentes em módulos solares, com diferentes níveis de hidrofobia, vem sendo estudados e preparados, almejando-se uma boa relação de custo-benefício com a utilização. O experimento realizado por eles testou a eficácia de ação do revestimento preparado à base de sílica e SiO₂, aplicados em módulos com sujidade retiradas de Guangzhou, na China.

A superfície revestida apresentou, após testes de dispersão de poeira, redução de 0,30% da transmitância, enquanto a superfície sem revestimento apresentou 20% de redução. Quando se realiza o experimento de poeira com a umidade do ar natural da região a redução da transmitância do revestimento chegou a 0,49%, enquanto a superfície descoberta mantém redução de mais de 20%. A redução da transmitância é de menos de 0,6%, portanto, na situação de uso do revestimento e mais de 1,5% no substrato desprotegido, além do material se mostrar eficaz no processo de autolimpeza com o uso da força dos ventos do local (QUAN e ZHANG, 2016).

Em face do exposto, pode-se fazer uma tabela comparativa com relação aos dados obtidos durante a revisão da literatura, dessa forma tem-se a tabela 01:

Autor	Método de Limpeza	Conclusões
Lu, Zhang e Hu (2013)	Atuador de piezoelétrico	Com relação ao posicionamento da haste limpante, em um módulo retangular, percebeu-se que a localização no lado de menor dimensão apresentou melhor ganho de energia após a passagem do sistema. Além disso, percebeu-se que a carga de aplicação menor, em torno de 1N apresentou melhor ganho de energia do sistema.
Shehri e Outros (2016)	Sistema mecânico de fricção da superfície frontal com escovação de nylon seca	Utilizando uma metodologia própria, os autores perceberam que a exposição do módulo as condições locais provocou uma redução da transmitância de 2% no primeiro dia e menores reduções nos dias seguintes. O método de limpeza utilizado apresentou uma restauração máxima da transmitância de 90,67%. Porém com a utilização de água foi constatado uma recuperação de 100% da transmitância.
Moharram e outros (2013)	Aplicação da água pura e da água com surfactante	O método com água pura não pressurizada ocasionou uma perda de 50% da eficiência ao final dos 45 dias analisados, por isso, os autores perceberam que esse método não é o mais adequado para limpeza. Ao passo que o método da água com surfactante apresentou ótimo resultados, com redução de somente 3% da eficiência.
Syafiq et al. (2018)	Métodos auto limpantes: superfícies hidrofóbicas e superfícies hidrofílicas	As superfícies hidrofóbicas necessitam ter baixa energia de superfície com propriedades repelentes à água, por sua vez, superfícies hidrofílicas demandam alta energia superficial, devido às propriedades de molhabilidade. Em geral, os autores perceberam que os métodos auto limpantes apresentam baixo gasto energético e pouca manutenção. Com isso, aumentam a eficiência e reduzem o tempo demandado comparados com mão-de-obra humana
Deb e Brahmhatt (2018)	Sistema automatizado de limpeza baseado na rotação da escova sob o substrato do módulo	Apresentou um crescimento de pouco mais de 9% na conversão energética dos módulos.
Parrot et al. (2018)	Automatização do processo de limpeza a seco com o uso de escova que utiliza borracha de silicone na sua estrutura	O processo de limpeza apresentou ganhos de performance, principalmente para limpezas diárias.
Arabatzis et al. (2017)	Fotocatálise	Esse revestimento autolimpante em módulos fotovoltaicos apresentou aumento de 6% no desempenho do módulo.
Kawamoto e Guo (2017)	Sistema eletrostático	Esse método demonstrou ineficiência para a remoção de pequenos particulados, porém
Quan e Zhang (2016)	Aplicação de revestimentos transparentes em módulos solares	Esse revestimento mostrou-se bastante eficiente, visto que, a redução da transmitância foi de apenas 0,3% e para módulos sem revestimento a redução foi de 20%.

Tabela 01: Quadro comparativo sobre as principais conclusões de cada artigo estudado

3.1 Efeito das Técnicas de Remoção nos Módulos Fotovoltaicos

Várias técnicas são apresentadas com intuito de remover a sujidade da superfície de módulos e reestabelecer seu funcionamento previsto. Contudo os efeitos ocasionados pelas mitigações e remoções dessa sujidade ainda carecem de melhor entendimento e testes padronizados para se obter resultados passíveis de comparação ao redor do mundo.

Toth et al. (2018) debatem acerca dos efeitos observados sobre o revestimento em um estudo de 5 anos de duração. O National Renewable Energy Laboratory (NREL), localizado nos Estados Unidos, está atualmente trabalhando em técnicas de padronização dos testes de durabilidade dos revestimentos dos módulos. O objetivo primário do estudo é coletar dados suficientes de abrasão e danos para ser possível, no futuro, realizar testes acelerados em laboratório.

Várias opções estão sendo estudadas, quanto às formas de limpeza do revestimento, que condigam com situações normais encontradas em campo, como: a não execução de limpeza, água despressurizada sem auxílio mecânico, esponja úmida com rodo e escovação seca. O experimento consiste em amostras revestidas e expostas ao tempo, pelo prazo de 1 a

5 anos, em diversas regiões climáticas do mundo (TOTH et al., 2018).

A Figura 7, é um exemplo da estrutura utilizada no experimento, aplicada na Califórnia com angulação de 30°, ao lado são os instrumentos utilizados para a limpeza com escova e esponja úmida com rodo.

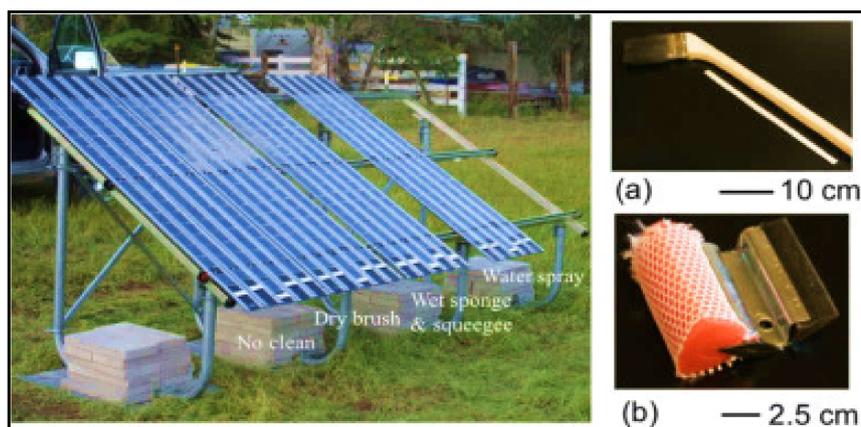


Figura 7 – Estrutura exposta em Sacramento, Califórnia, para realização do experimento. A direita, exemplos dos equipamentos utilizados para auxílio na limpeza

Os resultados preliminares revelam clara degradação para todos os revestimentos e em todas as localidades. O pior caso é o localizado na Califórnia que apresenta extenso dano causado pela combinação das condições ambientais e limpeza por contato mecânico à seco. Arranhados estão presentes em maior quantidade neste tipo de técnica apreciada, de escovação sem água, como constata-se a presença de arranhados na limpeza com esponja úmida e rodo. As demais avaliações, sem interferência e com água despressurizada não apresentaram riscos visíveis. Quanto a eficácia do processo, o método de escovação proporcionou a menor perda de transmitância, enquanto água despressurizada expôs os piores índices (TOTH et al., 2018).

Ensaio realizado por Parrot et al., 2018 avaliaram os efeitos cumulativos do uso do equipamento na limpeza da superfície. Realizaram a repetição da passagem do equipamento sobre o módulo mil vezes e concluíram que não há impacto causado apenas pelo deslocamento, testes de eletroluminescência não revelaram nenhuma microfissura, ou células danificadas, indicando a preservação do módulo mesmo com uso constante.

Testes acelerados em câmaras em vistas a estudar o desgaste, características óticas e elétricas em módulos fotovoltaicos limpos à seco foram foco do estudo proposto por Shehri et al. (2017). Sistemas de deposição de sujidade foi integrado ao recinto, sendo possível a realização de testes simulados equivalentes a 20 anos. Utilizou-se, para o experimento, três materiais de escova distintos: nylon, pano e borracha. Na figura 8 estão demonstrados os diferentes tipos de escovas:



Figura 8 - Diferentes tipos de escova ensaiadas, (a) Nylon; (b) Pano; (c) Borracha de silicone

Análises indicaram que a escovação da superfície, em testes acelerados, não afetou a corrente de curto-circuito (I_{sc}) nas condições simuladas, o revestimento do módulo mostrou-se resistente aos efeitos danosos. Riscos na superfície foram observados em amostras de todos os materiais, apesar de que a borracha de silicone apresentou o menor índice de arranhados. Contudo, não repercutiu em efeitos negativos na eficiência dos módulos (SHEHRI et al. 2017). A Figura 09 apresenta imagens de microscópio das amostras, em (a) amostra original, nunca ensaiada; (b) amostra ensaiada com borracha de silicone sem testes de deposição de sujidade; (c) amostra ensaiada com borracha de silicone com testes de deposição de sujidade; (d) amostra ensaiada com escova de nylon com deposição de sujidade; (e) amostra ensaiada com pano e com deposição de sujidade; (f) zoom na região da imagem de (e).

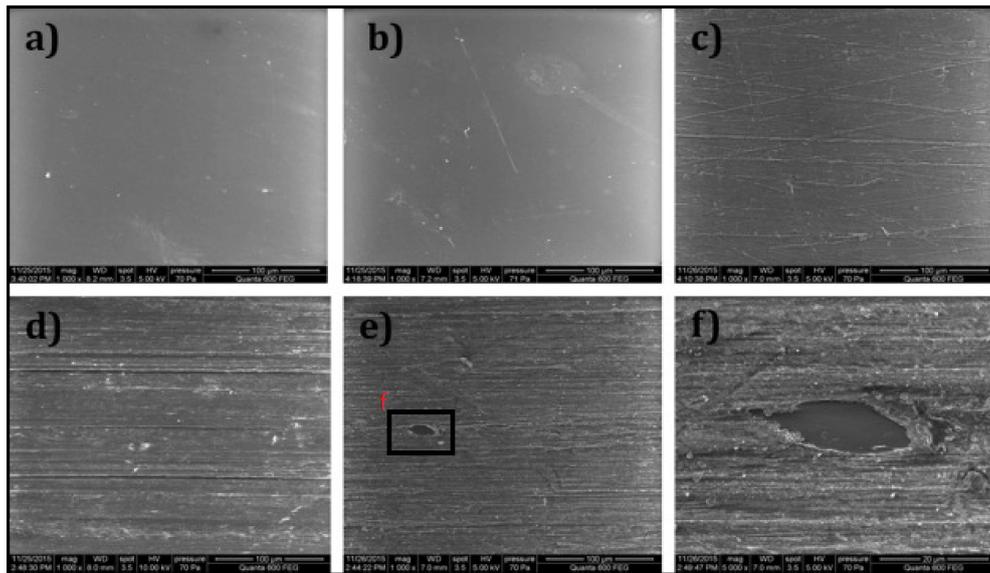


Figura 09 – Imagens de microscópio do ensaio acelerado de limpeza

4. CONCLUSÃO

Em face dessas análises é possível perceber que os malefícios ocasionados pelo excesso de deposição de sujidades nos módulos está fazendo com que estudos cada vez mais elaborados busquem alternativas de limpeza, seja de forma mecânica, automática. Basicamente existem dois tipos de técnicas passivas e ativas, sendo que as mais exploradas em estudos tem sido as passivas por acreditar que podem trazer melhores resultados de limpeza, bem como reduzir significativamente o desgaste ocasionado no atrito durante a limpeza por técnica ativa.

Através da pesquisa, foi possível evidenciar que o “melhor método” depende de uma série de fatores, como custo, disponibilidade de recurso, tipo de sujidade da região, tamanho da planta de instalação, entre outros, ou seja, para chegar definição do melhor método, é necessário um estudo amplo que envolve aspectos técnicos e viabilidade de aplicação.

Agradecimentos

Agradecimento especial a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais por toda a estrutura fornecida para o desenvolvimento da pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecimento à orientadora Antônia Sônia Cardoso Alves Diniz por toda a sua disponibilidade e dedicação para transmitir os conhecimentos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Banco de Informações de Geração – Fontes de Energia Exploradas no Brasil. Brasília: MME – Ministério de Minas e Energias, Governo Federal, DF, 2018.
- ARABATZIS, Ioannis. TODOROVA, Nadia. FASAKI, Ioanna. TSESMELI, Chrysovalanti. PEPPAS, Antonis. LI, Wen Xin. ZHAO Zhiwei, Photocatalytic, self-cleaning, antireflective coating for photovoltaic panels: Characterization and monitoring in real conditions, *Solar Energy*, v.159, 2018, p.251-259, ISSN 0038-092X.
- CHEN, Eugene Yu-Ta. MA, Lian. YUE, Yuan. GUO, Bing. LIANG, Hong, Measurement of dust sweeping force for cleaning solar panels, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.179, 2018, p.247-253, ISSN 0927-0248.
- DEB, Dipankar. BRAHMBHATT, Nisarg L., Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V.82, Part 3, 2018, p.3306-3313, ISSN 1364-0321.
- LU, Xiaolong. ZHANG, Qi. HU, Junhui. A linear piezoelectric actuator based solar panel cleaning system, *Energy*, v.60, 2013, p.401-406, ISSN 0360-5442.
- MOHARRAM, K.A.. ABD-ELHADY, M.S.. KANDIL, H.A.. EL-SHERIF, H., Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels, *Energy Conversion and Management*, v.68, 2013, p.266-272, ISSN 0196-8904.
- PARROTT, Brian. ZANINI, Pablo Carrasco. SHEHRI, Ali. KOTSOVOS, Konstantinos. GEREIGE, Issam, Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush, *Solar Energy*, v.171, 2018, p.526-533, ISSN 0038-092X.
- QUAN, Yun-Yun. ZHANG, Li-Zhi, Experimental investigation of the anti-dust effect of transparent hydrophobic coatings applied for solar cell covering glass, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.160, 2017, p.382-389, ISSN 0927-0248.

- SHEHRI, Ali Al. PARROTT, Brian. CARRASCO, Pablo. SAIARI, Hamad. TAIE, Al Ihsan, Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for PV modules applications, *Solar Energy*, v.135, 2016, p.317-324, ISSN 0038-092X.
- SHEHRI, Ali Al. PARROTT, Brian. CARRASCO, Pablo. SAIARI, Hamad. TAIE, Al Ihsan, Accelerated testbed for studying the wear, optical and electrical characteristics of dry cleaned PV solar panels, *Solar Energy*, v.146, 2017, p.8-19, ISSN 0038-092X.
- SYAFIQ, A.. PANDEY, A.K.. ADZMAN, N.N.. RAHIM, Nasrudin Abd, Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels. *Solar Energy*, v.162, 2018, p.597-619, ISSN 0038-092X.
- TOTH, Sarah. MULLER, Matthew. MILLER, David C.. MOUTINHO, Helio. TO, Bobby. MICHELI, Leonardo. LINGER, Jeffrey. ENGTRAKUL, Chaiwat. EINHORN, Asher. SIMPSON, Lin, Soiling and cleaning: Initial observations from 5-year photovoltaic glass coating durability study, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.185, 2018, p.375-384, ISSN 0927-0248.

REVIEW STUDY ON THE TECHNIQUES APPLIED IN REMOVAL OF DEPOSITS SUBJECT TO THE SURFACE OF PHOTOVOLTAIC MODULES AS WELL AS THEIR EFFECTS

***Abstract.** This article presents a literature review on photovoltaic module cleaning techniques, in order to provide better cleaning of dirt, without affecting the qualities of the modules. This review was based on articles related to the area published in recent years on the CAPES / MEC journals portal. Several internal and external factors have been studied in order to characterize and measure the various losses in the production of electrical energy by photovoltaic modules, among which, the deposition of dirt on the front surface stands out, which not only reduces the absorption of photons by solar cells, reducing their output power, as well as leading to other thermal effects, which can result in complete module failure. As a result of the techniques for removing the dirt deposited on the glass on the front surface of the modules, impacts that are still not so well known on the surfaces, such as increased surface roughness and grooves that can reduce transmittance and increase the reflection of the equipment and dust adhesion.*

Keywords: *Dirt; Techniques; Transmittance.*