

ESTUDO SOBRE O IMPACTO DOS AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NO FATOR ESPECTRAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SÃO PAULO

Luis Gustavo Bet – gustavo.bet@unifesp.br

Nilton Manuel Évora do Rosario

Universidade Federal de São Paulo, *Campus* Diadema. Diadema, São Paulo.

Fernando Ramos Martins

Universidade Federal de São Paulo, *Campus* Baixada Santista. Santos, São Paulo.

Roberto Zilles

Universidade de São Paulo, Cidade Universitária, São Paulo.

Resumo. *A geração de energia elétrica a partir da energia solar é uma alternativa com potencial de contribuir para atender os objetivos de desenvolvimento sustentável no setor energético. A aplicação da tecnologia fotovoltaica em centros urbanos, com instalação de pequenas plantas geradoras, vem sendo amplamente apontada como uma alternativa viável de geração distribuída próximo a grandes polos consumidores. Ao mesmo tempo que a aplicação das tecnologias fotovoltaicas apresenta um crescimento contínuo, a poluição atmosférica, um problema crônico das grandes cidades, pode impactar negativamente a sua produtividade. Os aerossóis atmosféricos constituem o principal atenuador da radiação solar na ausência de nuvens em áreas urbanas, principalmente aquelas localizadas em regiões que apresentam estações secas bem definidas, como é o caso de São Paulo, dominadas por condições atmosféricas que favorecem o maior tempo de permanência na atmosfera. Os aerossóis modulam o total da irradiação solar incidente na superfície assim como alteram a sua distribuição espectral. Sendo assim, este trabalho buscou investigar como a variação na quantidade e na natureza dos aerossóis atmosféricos podem afetar o desempenho de sistemas fotovoltaicos operando na região metropolitana de São Paulo, via análise do fator espectral de módulos fotovoltaicos. A análise da série histórica das propriedades ópticas dos aerossóis possibilitou identificar a contribuição importante de aerossóis provenientes de queimadas em outras regiões do país. Associado a esse ciclo dos aerossóis, foi possível observar a mesma sazonalidade no fator espectral dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino em operação, acarretando em uma defasagem de até 5% do desempenho espectral dos módulos. Essa variação no desempenho acompanhou os cenários atmosféricos com elevada espessura óptica dos aerossóis e vapor d'água.*

Palavras-chave: *Geração fotovoltaica, Desempenho de sistemas fotovoltaicas, Fator espectral, Aerossóis atmosféricos, Ambientes urbanos.*

1. INTRODUÇÃO

A questão energética é um ponto crítico para muitas nações e reconhecidamente um desafio da sociedade contemporânea, sendo considerado um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7), Energia Limpa e Acessível, da Agenda 2030. Como forma de reduzir o impacto do setor energético nas mudanças climáticas, mantendo a capacidade de suprir a sua demanda energética com qualidade e segurança, busca-se atender o consumo de energia com fontes renováveis.

A energia solar vem apresentando crescimento rápido nos últimos anos, devido a sua versatilidade de aplicação e tecnologia de aproveitamento, contribuindo para diversificação da matriz energética de diversos países (IRENA, 2019). Entre as formas de aproveitamento, a energia solar fotovoltaica (PV) recebe destaque. Esta tecnologia pode ser utilizada de forma centralizada, com grandes centrais geradoras, porém a geração distribuída nos telhados das construções urbanas está impulsionando a expansão da participação dessa fonte de energia na matriz elétrica brasileira (EPE, 2021). A capacidade do consumidor final gerar sua própria energia abre novas possibilidades para o mercado energético, além de contribuir para o ODS 11, Cidades e Comunidades Sustentáveis.

Atualmente, a tecnologia fotovoltaica é a principal tecnologia de aproveitamento solar utilizada, totalizando cerca de 20,4% de toda a energia renovável produzida em 2018 (IRENA, 2018), aproximadamente 627 GW de capacidade instalada acumulada de energia solar no mundo em 2019 (IEA, 2019). No Brasil, a potência outorgada está em torno de 21GW e cerca de 4 GW de capacidade instalada atual se encontra em pequenos produtores e geração distribuídas, muitas vezes localizados junto aos telhados de casas nos centros urbanos ou áreas afastadas, segundo dados de 2021 do Sistema de Informação de Geração (SIGA) da ANEEL.

Considerando a perspectiva de um futuro mais sustentável, o desenvolvimento científico e tecnológico interdisciplinar é fator primordial para dar suporte ao crescimento do uso da energia solar em nossa sociedade, principalmente na geração de eletricidade. Estudos integrando a ciência dos materiais, ciências ambientais, sensoriamento remoto, arquitetura, urbanismo, políticas públicas e sociais são imprescindíveis para que tenhamos, de fato, o uso e, conseqüentemente, os benefícios dessas tecnologias emergentes para toda a população.

Apesar do potencial da tecnologia de geração de energia a partir da fonte solar ajudar na descarbonização da matriz energética no mundo todo, a totalidade do seu benefício sofre impactos negativos com o aumento dos níveis de poluição atmosférica, especialmente dos aerossóis, que reduzem a quantidade de energia solar incidente na superfície (Martins e Pereira, 2006; Nobre *et al.*, 2016). Pesquisas têm constatado que o recurso da energia solar incidente na superfície da Terra e a produtividade de sistemas PV tendem a ser menores em dias com elevada concentração de particulados e gases poluentes na atmosfera. Li *et al.* (2017) constatou a diminuição entre 25-35% do recurso solar em regiões poluídas da China. Nobre *et al.* (2016) detectou redução de 15% na irradiância global horizontal em episódios de alta poluição atmosférica em Singapura causados por eventos de queimadas, gerando um impacto entre 15% a 25% no rendimento dos módulos nestes episódios. No Brasil, ainda há muito a ser explorado sobre o impacto da poluição atmosférica nos módulos fotovoltaicos, principalmente para as grandes metrópoles do país, as quais apresentam níveis de poluição mais elevados, podendo ter um maior impacto no aproveitamento das tecnologias fotovoltaicas.

Aerossóis atmosféricos consistem em um sistema de partículas sólidas ou líquidas suspensas em um gás por um período de tempo (HORVATH, H., 2000). Essas partículas apresentam tamanhos, formatos e composição química variados, de acordo com o processo de formação e a fonte emissora. Este tema de alta complexidade é fonte de pesquisas pelo mundo devido ao seu impacto na saúde pública e consequências no contexto das mudanças climáticas, e sendo também uma das principais fontes de incerteza para modelos de previsão que buscam identificar o recurso solar em determinadas localidades (RUIZ-ARIAS *et al.*, 2016).

Além da redução direta da radiação solar, os aerossóis atmosféricos, dependendo do tamanho e composição química, têm impacto variado na atenuação ao longo do espectro de radiação solar, um aspecto importante ao considerarmos que diferentes tecnologias respondem à distintas bandas do espectro. Portanto, entender como os aerossóis presentes na atmosfera dos grandes centros urbanos afetam o espectro da radiação solar incidente à superfície, e a produtividade dos módulos fotovoltaicos, pode trazer avanços significativos para área de previsão de produtividade dos módulos e estimativas mais realistas do potencial disponível do recurso solar, principalmente nas proximidades de grandes centros consumidores ou em áreas impactadas pelas emissões de queima de biomassa.

Este trabalho é resultado de pesquisa de Mestrado desenvolvida em parceria entre a Universidade Federal de São Paulo e a Universidade de São Paulo com o intuito de caracterizar o regime sazonal dos aerossóis atmosféricos numa área urbana da região metropolitana de São Paulo e investigar como impactam o desempenho dos módulos fotovoltaicos com base na análise do parâmetro fator espectral. A região metropolitana de São Paulo é a maior região urbana do país, sujeita a concentrações elevadas de aerossóis atmosféricos, principalmente na estação seca (Castanho *et al.*, 2001, Yamasoe *et al.*, 2017), e com grande potencial para expansão da geração fotovoltaica. A área de estudo é Cidade Universitária, situado na região oeste da cidade de São Paulo, em razão da disponibilidade de dados meteorológicos, radiométricos e de aerossóis atmosféricos. Dados observados pela estação da AERONET (Holben *et al.*, 1998) localizada no Instituto de Física da USP e da planta de geração fotovoltaica em operação no Instituto de Energia e Meio Ambiente também foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

O artigo segue tratando brevemente sobre a influência do espectro da radiação solar incidente na superfície e no desempenho do módulo fotovoltaico. Em seguida, descreve a importância da avaliação em áreas urbanas como a região metropolitana de São Paulo. A metodologia utilizada é descrita no tópico 4 do artigo seguido pela apresentação de resultados e conclusões.

2. RESPOSTA ESPECTRAL DAS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

A geração fotovoltaica é baseada no efeito fotovoltaico observado em materiais semicondutores. O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico responsável pela conversão da radiação eletromagnética em eletricidade, e foi observado primeiramente por Edmond Becquerel em 1839. Resumidamente, a energia do fóton interage com a estrutura cristalina do semicondutor, fazendo com que elétrons (portadores de carga negativa) "saltem" da camada de valência para a camada de condução do material, deixando "buracos" (portadores de carga positiva) na estrutura cristalina. A diferença de energia entre as duas bandas (*bandgap* em inglês) é fornecida pelo espectro de radiação solar incidente na superfície do semicondutor. A resposta espectral (SR – "*spectral response*") do módulo fotovoltaico está associada ao *bandgap* do semicondutor utilizado, assim as tecnologias fotovoltaicas apresentam características espectrais distintas.

Os módulos de a-Si apresentam uma curva de resposta espectral na faixa espectral entre 300 – 700 nm. Por outro lado, as placas de silício cristalino (c-Si) possuem uma resposta espectral mais ampla, entre 350 – 1200 nm (POLO *et al.*, 2017). As diferentes respostas espectrais das tecnologias implicam produtividades diferentes que são impactadas pelas condições atmosféricas uma vez que a composição atmosférica altera o espectro da radiação solar incidente na superfície do módulo. Uma forma de avaliar os ganhos e perdas de desempenho dos módulos fotovoltaicos oriunda do espectro solar incidente é utilizar o fator espectral ou *Spectral Factor* (SF), definido na norma 60904-7 da IEC (International Electrotechnical Commission) pela Eq. (1).

$$SF = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)SR(\lambda)d\lambda \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E^c(\lambda)SR_{ref}(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E^c(\lambda)SR(\lambda)d\lambda \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E(\lambda)SR_{ref}(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

onde, $E(\lambda)$ representa a irradiância solar espectral modelada ou observada no local de operação do sistema fotovoltaico, $E^*(\lambda)$ irradiância solar espectral padrão, descrita pela norma IEC 60904-3, $SR(\lambda)$ é a resposta espectral relativa do módulo e $SR_{ref}(\lambda)$ é a resposta espectral do dispositivo de referência da coleta. Além disso, os limites de integração λ_1 e λ_2 são, respectivamente, o menor e maior comprimento de onda que a tecnologia fotovoltaica responde. Enquanto os limites λ_3 e λ_4 , são os comprimentos de ondas máximos e mínimos dos dispositivos. Em condições mais específicas, considerando G como a irradiância global integrada entre 300 nm e 4000 nm, podemos simplificar a equação anterior na forma descrita na Eq. (2).

$$SF = \frac{I_{sc} G}{I_{sc}^* G^*} \quad (2)$$

onde I_{sc}^* é a corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico em condições padrões, I_{sc} é a corrente de curto circuito em regime de operação no campo e G^* é irradiância solar global padrão (STC). Naturalmente, o valor do SF fica em torno do valor um(1), quando o módulo não estiver sofrendo uma alteração de sua produtividade devido às variações espectrais da irradiância solar na superfície. O SF com valor abaixo de 1 significa que o módulo apresenta menor desempenho devido a distribuição espectral da radiação solar incidente. Valores acima de 1 representam ganho de desempenho para o módulo, lembrando que considerando apenas o aspecto espectral do módulo.

Diversos estudos utilizam o fator espectral para entender o impacto da atmosfera nas diferentes tecnologias de geração fotovoltaica. Starks e Theristis, (2015) avaliaram o impacto de diferentes parâmetros atmosféricos, como vapor d'água (PW), massa óptica (AM) e a profundidade óptica dos aerossóis (AOD) na performance espectral de diferentes tecnologias fotovoltaicas. Segundo os autores, os módulos perovskita e CdTe sofreram o maior impacto com o aumento de AOD e AM , com redução de até 26% do desempenho para valores de AOD_{500nm} de ordem de 1.0 (um). Alonso-Arabella *et al.* (2014) estudaram o fator espectral de diferentes tecnologias em operação na Europa ao longo de dias, meses e anos e constataram uma variação notável no rendimento energético dos módulos avaliados, chegando a redução de até 20% em valores horários.

3. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR COM AEROSSÓIS

Os aerossóis participam do processo de atenuação da radiação solar através dos processos de absorção e espalhamento. A absorção da radiação solar remove parte da energia radiativa do feixe de radiação solar, enquanto o processo de espalhamento modifica a direção do feixe de radiação eletromagnética incidente. Estudos sobre o impacto dos aerossóis no balanço radiativo do planeta (IPCC, 2013) mostram que apesar da emissão de gases do efeito estufa intensificar o aquecimento da atmosfera, os aerossóis lançados para a atmosfera podem contribuir para seu resfriamento, visto que a forçante radiativa do aerossol varia de -0,85 até +0,15 Wm^{-2} com a incerteza de 1 Wm^{-2} . Além disso, as partículas de aerossol também podem influenciar na atenuação da radiação solar a partir de efeitos indiretos uma vez que atuam como núcleos de condensação e podem alterar as características das nuvens como, por exemplo, a distribuição de tamanho das gotículas, e consequentemente o seu albedo e tempo de permanência na atmosfera (SEKIGUCHI, 2003).

A interação da radiação eletromagnética com material particulado depende da relação entre sua dimensão e o comprimento de onda da radiação (λ). A profundidade óptica dos aerossóis possui dependência espectral descrita pela lei de Ångström, Eq. (3), que relaciona o coeficiente de turbidez (β) e o coeficiente de Ångström (α).

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (3)$$

Sendo a dependência espectral da profundidade óptica sensível à distribuição de tamanho das partículas presente na atmosfera, o coeficiente de Ångström pode ser utilizado para inferir características da distribuição do tamanho das partículas. Valores baixos do coeficiente de Angstrom indicam a predominância de partículas da moda grossa, com dimensões maiores, enquanto valores maiores de α estão associados à presença de partículas da moda fina, em geral, produzidas pelas emissões antrópicas associadas à queima de combustível fóssil. Aerossóis urbanos tendem a ter valores de α entre 1.2 e 2.5 (DUBOVİK *et al.*, 2000). As propriedades descritas aqui são essenciais para os estudos e entendimento da transferência radiativa na atmosfera, principalmente na questão espectral. Esse campo de estudo se torna cada vez mais necessário com o aumento da aplicação de novas tecnologias de aproveitamento da energia solar (NEHER *et al.*, 2017).

4. METODOLOGIA

1.1 Área de Estudo

São Paulo é a cidade mais populosa do país com aproximadamente 12 milhões de habitantes, de acordo com o último censo (2010) feito pelo IBGE. A cidade está localizada na região sudeste do Brasil, nas coordenadas 23,55°S, 46,63°W, e apresenta um regime de precipitação com dois períodos sazonais característicos: uma estação chuvosa (ou úmida) que acontece durante os meses de primavera e verão (entre outubro e março); e uma estação seca entre abril e setembro.

Relatório elaborado pela CETESB (2017) aponta que a emissão veicular é a principal fonte emissora a contribuir para as concentrações de poluentes atmosféricos devido ao número de veículos circulantes na cidade. Estimou-se uma frota com cerca 7,3 milhões na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), aproximadamente 48% de toda frota do estado. A média de idade dessa frota é de 9,3 anos, com cerca de 34% da frota atingindo os 20 anos. Veículos mais antigos, geralmente, apresentam um nível de emissão mais elevado do que os veículos mais novos.

O município de São Paulo é o principal centro consumidor de energia do estado de São Paulo e detém o segundo maior consumo de energia per capita do país, aproximadamente 3.107 kWh/hab. Somente o município consumiu aproximadamente 27,5 MWh em 2018, sendo que os setores residencial, comercial e industrial contabilizam 38,9%; 38,5%; 10,5%, respectivamente, de acordo com os dados da Secretaria de Minas e Energia do Estado de São Paulo (2018). (Disponível em: <http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalecv2/intranet/Eletricidade/index.html>).

Apesar de estar fora da região com maior potencial de recurso solar no país, a média anual de irradiação solar global é bastante elevada, da ordem de 4,5 kWh/m², comparável ao recurso disponível em países com mercado de geração fotovoltaico já bem estabelecido. Segundo estimativas apresentadas no Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017), as maiores médias mensais de irradiação solar global na superfície ocorrem na estação chuvosa, atingindo 5,8 kWh/m² em dezembro. As menores médias mensais ocorrem na estação seca com valor mínimo de 3,2 kWh/m² em junho.

4.3 Dados de Propriedades Ópticas dos Aerossóis e Vapor d'água

A AEROSOLS ROBOTIC NETWORK (AERONET) é uma rede mundial de monitoramento dos aerossóis coordenada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) em parceria com várias outras instituições (HOLBEN *et al.*, 1998). Esta rede tem o propósito de monitorar as propriedades ópticas, microfísicas e radiativas dos aerossóis em diferentes regiões do planeta a partir do sensoriamento remoto em superfície. Os dados de radiação solar são coletados em sete comprimentos de onda da radiação solar (340, 380, 440, 500, 670, 875, 1020 nm) com uso do fotômetro CIMEL CE-318. A base de dados utilizada neste estudo foi coletada pela estação em operação no Instituto de Física da USP, Cidade Universitária, a cerca de 100 m de distância do sistema fotovoltaico descrito mais adiante. Os registros da AERONET versão 3 e nível de qualidade 2.0, no período de 2001 até dezembro de 2017, foram selecionados para este trabalho em razão do estrito controle de qualidade empregado para rastreamento de influência de nebulosidade (cloud-screening) (Smirnov *et al.*, 2000). A série temporal não inclui dados para o ano de 2013.

A profundidade óptica do aerossol (AOD, do termo inglês Aerosol Optical Depth) é a principal variável monitorada e indica a carga de aerossol presente na coluna atmosférica que afeta a transmitância atmosférica da radiação solar nos diversos comprimentos de onda mencionados. A acurácia da profundidade óptica obtida pelo sistema varia entre 0,01 e 0,02, a depender do comprimento de onda, conforme descrito por Holben *et al.* (1999).

Além da AOD, outras propriedades ópticas são necessárias para caracterizar a atenuação da radiação solar pelos aerossóis atmosféricos: o albedo simples (ω_o), expoente de Ångström (α) e o parâmetro de assimetria (g) (DUBOVİK *et al.*, 2000, YU *et al.*, 2017, ZHANG *et al.*, 2018). Todos esses parâmetros apresentam dependência com o comprimento de onda da radiação (HOLBEN *et al.*, 1999). O albedo simples indica a capacidade do aerossol em absorver ou espalhar a radiação em um determinado comprimento de onda, sendo o valor de ω_o igual a 1 para o caso de um aerossol puramente espalhador. Os parâmetros α e o g estão relacionados à distribuição de tamanho e formato das partículas de aerossóis. No caso do monitoramento feito pela AERONET, os valores do ω_o só estão disponíveis para valores de AOD em 440 nm acima de 0,4, devido ao aumento da incerteza no processo de inversão com valores mais baixos de carga de aerossóis.

O vapor d'água (PW) total na coluna atmosférica é um dado dos produtos de inversão do fotômetro solar oriundo de cálculo envolvendo o comprimento de onda de 935 nm para toda a coluna. PW tem uma incerteza estimada de $\pm 10\%$ (Smirnov *et al.*, 2004). Estes dados foram avaliados separadamente e concomitantemente para refinamento na compreensão das características ópticas dos aerossóis e na interferência gerada na resposta espectral dos módulos fotovoltaicos.

4.4 Base de Dados de Geração Fotovoltaica

Para este estudo, foram utilizados dados de operação do sistema fotovoltaico nomeado de BAPV, instalado sobre o telhado da Biblioteca Brasileira Guita e Jose Mindlin (23°33' S, 46°43' O). A Fig. 1 mostra a imagem do sistema cuja potência nominal é de 150 kWp operando com 10 inversores com potência nominal de 15 kW. Cada inversor recebe conexão de 3 strings com 20 módulos. A orientação do sistema é de 27° à leste do norte e com uma inclinação de 23°.

4.5 Base de Dados de Solarimétricos e Meteorológicos

Os dados de irradiância solar e meteorológicos empregados no desenvolvimento do trabalho foram coletados em estação solarimétrica operando no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos instalado no IEE/USP. Trata-se de uma estação de coleta de dados que atende os requisitos estabelecidos para coleta de dados em geração fotovoltaica. As características dos equipamentos instalados são listadas abaixo conforme descrito por Rosa (2003):

- a. Piranômetro: Modelo Kipp & Zonen CM 11, apresentando uma variação máxima anual de 0,5% e um erro direcional menor que 10 W/m²;
- b. Sensores de temperatura e umidade relativa Campbell Scientific-Vaisala Model HMP-45C, apresentam um erro máximo de 0,5%, operando em temperaturas entre -40°C e 60°C;
- c. Anemômetros: Modelo 05103 R.M. Young Wind Monitor, com erro máximo de 0,3 m/s e 3° para medidas de velocidade e direção do vento, respectivamente;
- d. Sistema automático de coleta de dados: CR10X da Campbell Scientific, com erro máximo de 0,1%.



Figura 1 – Sistema BAPV instalado no edifício da Biblioteca Brasiliana na Cidade Universitária da USP em São Paulo.
Fonte: Pin, M. (2017).

4.6 Caracterização climatológica dos aerossóis na área de estudo

Caracterizar e analisar o impacto dos aerossóis atmosféricos no desempenho dos módulos fotovoltaicos é uma tarefa que demanda entendimento da dinâmica dos mesmos e da variabilidade das suas propriedades na atmosfera na área de estudo. Assim, uma avaliação detalhada da série histórica dos dados coletados na estação da AERONET foi realizada para caracterizar as propriedades óticas dos aerossóis e seu comportamento sazonal. As séries históricas foram analisadas estatisticamente observando as variações diárias, mensais e anuais, bem como as relações entre elas.

O albedo simples dos aerossóis (ω_o) foi determinado a partir de dados em quatro faixas espectrais disponíveis (440 nm, 675 nm, 870 nm, 1020 nm). Posteriormente, como requisito de entrada no modelo de transferência radiativa adotado nos testes de sensibilidade, a média ponderada foi adotada para obter um valor único dessas propriedades óticas com o intuito de caracterizar diferentes condições de aerossóis: predominantemente absorvedor, moderado, predominantemente espalhador, e um cenário intermediário entre absorvedor e espalhador. Os pesos utilizados para calcular a média ponderada foram inversamente proporcionais ao quadrado do desvio padrão (σ) em cada comprimento de onda. O processo foi igualmente feito para o parâmetro de assimetria (g).

4.7 Cálculo e análise do fator espectral

O cálculo do fator espectral (SF) foi realizado utilizando os dados de corrente elétrica de uma string de dois inversores sistema fotovoltaico BAPV. Os valores de irradiância coletados *in situ* também foram utilizados para cálculo baseado na Eq. (3). Vale ressaltar que o SF calcula o desempenho dos módulos com relação ao espectro da radiação solar incidente no módulo, desconsiderando os outros parâmetros que interferem no desempenho do sistema como um todo. Após a sincronização das bases de dados de geração fotovoltaica, dados solarimétricos e propriedade óticas de aerossóis observados *in situ*, uma série de filtros foi aplicada ao conjunto de dados para possibilitar maior assertividade do estudo. Registros realizados com ângulos zenitais elevados acima de 70° foram descartados para minimizar influência das perdas de desempenho referentes a geometria solar. Uma vez que estamos interessados em avaliar a influência dos aerossóis atmosféricos sobre o fator espectral dos módulos, os registros com irradiância solar abaixo de 250 W/m² foram descartados pois podem estar associados à condição de sombreamento ou presença de nuvens para as angulações zenitais menores de 70°.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterização climatológica dos aerossóis na área de estudo

A dependência espectral dos aerossóis está fortemente relacionada com o tipo de partícula presente na atmosfera no momento da aquisição dos dados. A média mensal histórica entre o período de 2001 e 2017 possibilita observar um aumento expressivo da profundidade óptica dos aerossóis para os meses de agosto, setembro e outubro. Esse padrão foi notado nos quatro comprimentos de onda avaliados conforme indica a Fig. 2. No entanto, houve uma maior influência no comprimento de onda de 500 nm, corroborando a participação proeminente de aerossóis da moda fina ($MP_{2.5}$) na atmosfera de São Paulo.

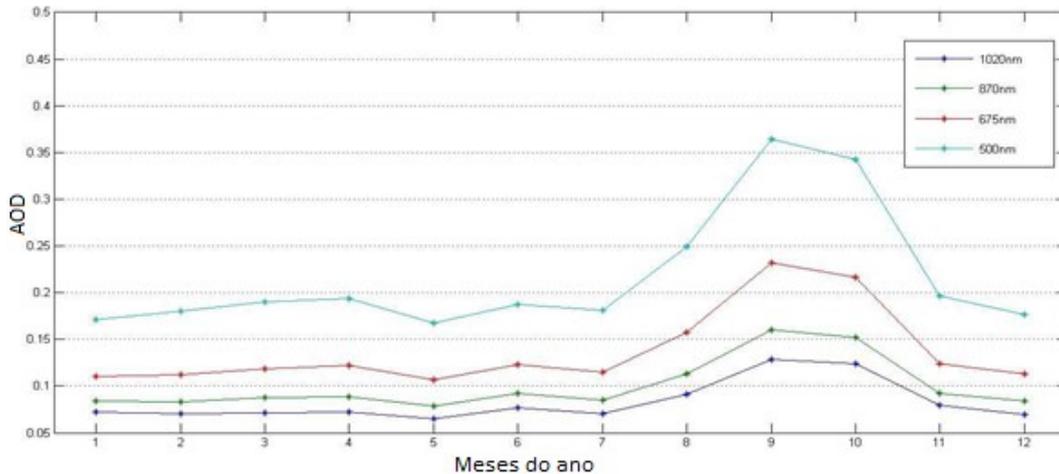


Figura 2 – Média mensais de 2001-2017 para os dados de AOD nos comprimentos de onda de 500, 675, 870, 1020 nm na cidade de São Paulo. Fonte: Autor

Esta característica observada ao longo dos 16 anos indica presença de aerossóis de queimada oriundos de outras regiões (Toledano *et al.*, 2007, Yamasoe *et al.*, 2017), resultando em AOD_{500nm} que pode atingir valores superiores à 0,2 nos meses da estação seca. O valor médio do AOD_{500nm} permaneceu em torno de 0,2, em mais de 50% do período de estudo indicando um padrão abaixo do observado em regiões urbanas similares no mundo (Dubovik *et al.*, 2002). No entanto, episódios de poluição elevada, tanto devidos ao transporte de aerossóis provenientes de eventos de queimadas em áreas distantes quanto ao acúmulo de poluentes por períodos prolongados sem precipitação, ocorrem principalmente na época seca.

De acordo com Dubovik *et al.* (2002), o tipo de biomassa queimada e o tipo de fonte emissora em áreas urbanas modificam a capacidade de espalhamento e de absorção das partículas. Os valores médios de ω_o (440 nm, 675 nm, 870 nm, 1020 nm) obtidos para a área de estudo são, respectivamente, $0,89(\pm 0,05)$, $0,87(\pm 0,05)$, $0,85(\pm 0,06)$, $0,84(\pm 0,06)$, valores inferiores ao encontrado em outros centros urbanos. O aerossol de São Paulo é mais absorvedor que os aerossóis emitidos em queimadas, e isso está relacionado com o maior teor de carbono negro (*black carbon*) presente (Martins *et al.*, 2009), refletindo no valor da média ponderada do albedo simples cerca de 0,86. Entretanto, ao longo do ano, podemos verificar uma alta variabilidade em torno 0,7 até 0,91, valores na estação seca representa cenários com aerossóis com características mais espalhadoras intrinsecamente relacionados a queima de biomassa.

Avaliamos a variação no tamanho das partículas presentes na atmosfera de acordo com a quantidade de vapor d'água e quantidade de aerossóis presentes na atmosfera de São Paulo, conforme mostra a Fig. 3. Observa-se que os dias com quantidade de água precipitável (PW) acima de 2 cm apresentaram valores de $\alpha_{500-870nm}$ próximos de 1,5, indicando uma predominância de aerossóis de moda fina. Além disso, os dias com maiores profundidades ópticas dos aerossóis também apresentam quantidade elevada de vapor d'água na atmosfera, esta característica está associada ao fato dos eventos extremos de AOD estarem associados ao transporte de massas de ar ricas em umidade e material de queima de biomassa das regiões do sul da bacia Amazônica em direção a São Paulo.

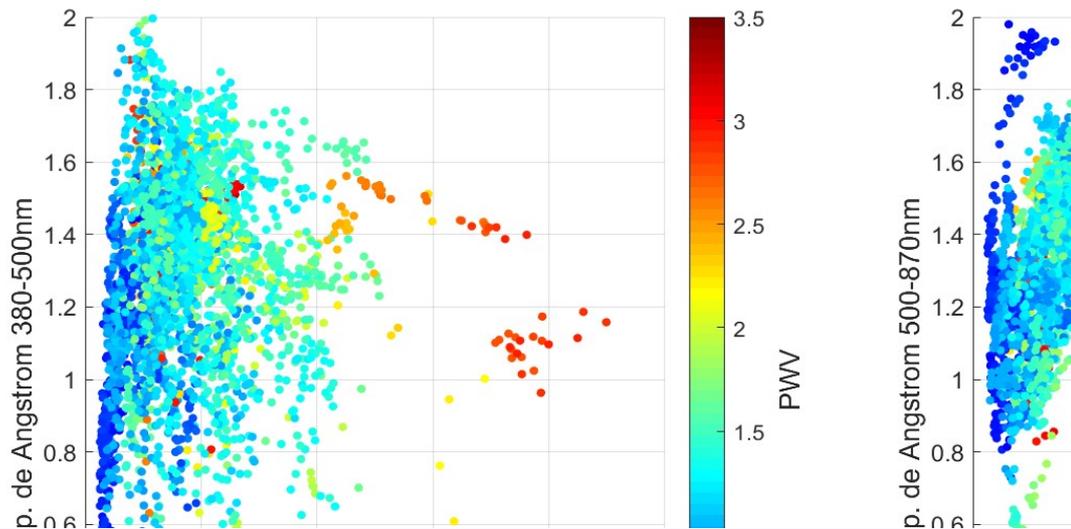


Figura 3 – Dispersão do expoente de Ångstrom em função da profundidade ótica dos aerossóis e da água precipitável na atmosfera. Fonte: Autor.

5.2 Fator Espectral e as propriedades óticas dos aerossóis

O fator espectral calculado para o sistema BAPV apresentou valores elevados e similares para as duas *strings*, em torno de $1,00 \pm 0,04$ e $1,01 \pm 0,03$, conforme indicado na Fig. 4, compatível com valores encontrados por outros estudos para o desempenho espectral de módulos fotovoltaicos de silício cristalino (ISHII, OTANI, TAKASHIMA, 2010; ALONSO-ABELLA, M. *et al.*, 2014; NOFUENTES, G. *et al.*, 2014; STARK, C., THERISTIS, M., 2015). Naturalmente, devido a uma resposta espectral mais ampla, as tecnologias de silício cristalino tendem a ter um impacto menor do que outras tecnologias como silício amorfo, CdTe e outros filmes finos que apresentam maior seletividade espectral.

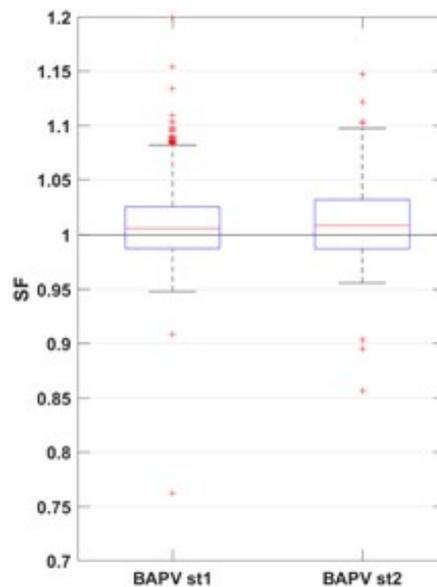


Figura 4. Boxplot de duas *strings* do sistema BAPV localizado na Cidade Universitária – USP/SP. Fonte: Autor.

A Fig. 5a demonstra que o fator espectral representou uma defasagem máxima de 5% do desempenho dos módulos durante o período supracitado. Curiosamente, observando a variação dos parâmetros atmosféricos durante este período, foi o momento em que AOD_{500nm} e PW atingiram seus valores mais altos, acima de 0,7 e 2 cm, respectivamente (Fig. 5d e 5e). De acordo com os resultados obtidos na seção. 5.1, notamos que durante os meses de agosto e setembro as propriedades óticas de aerossóis apresentam um padrão de valores de AOD_{500nm} elevados e uma maior variação nos valores de ω_o e α , para todos os anos entre 2001-2017, devido ao transporte de aerossóis de áreas distantes, principalmente das regiões de queimadas.

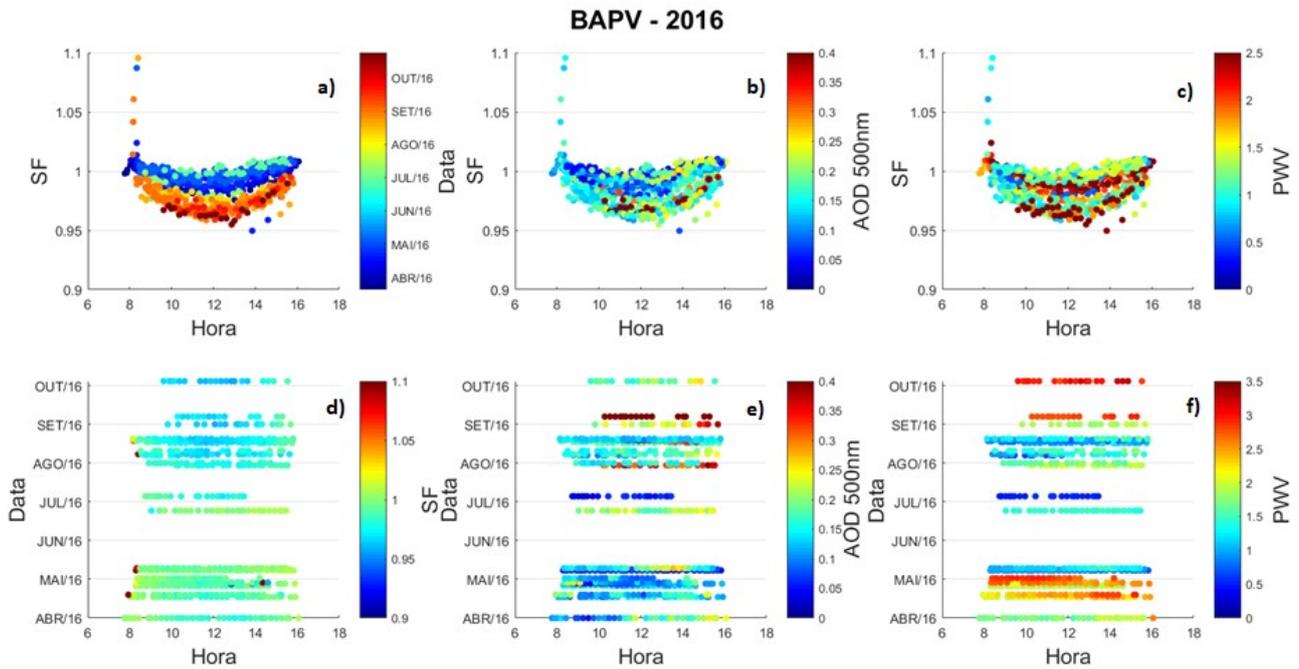


Figura 5. a) Variabilidade diária do SF do sistema BAPV ao longo dos meses em 2016. b) Variabilidade diária do SF do sistema BAPV em função do AOD_{500nm} em 2016. c) Variabilidade diária do SF do sistema BAPV em função do PWV em 2016. d) Variabilidade anual do SF no sistema BAPV em 2016. e) Variabilidade anual do AOD_{500nm} em 2016. f) Variabilidade anual do PWV em 2016. Fonte: Autor.

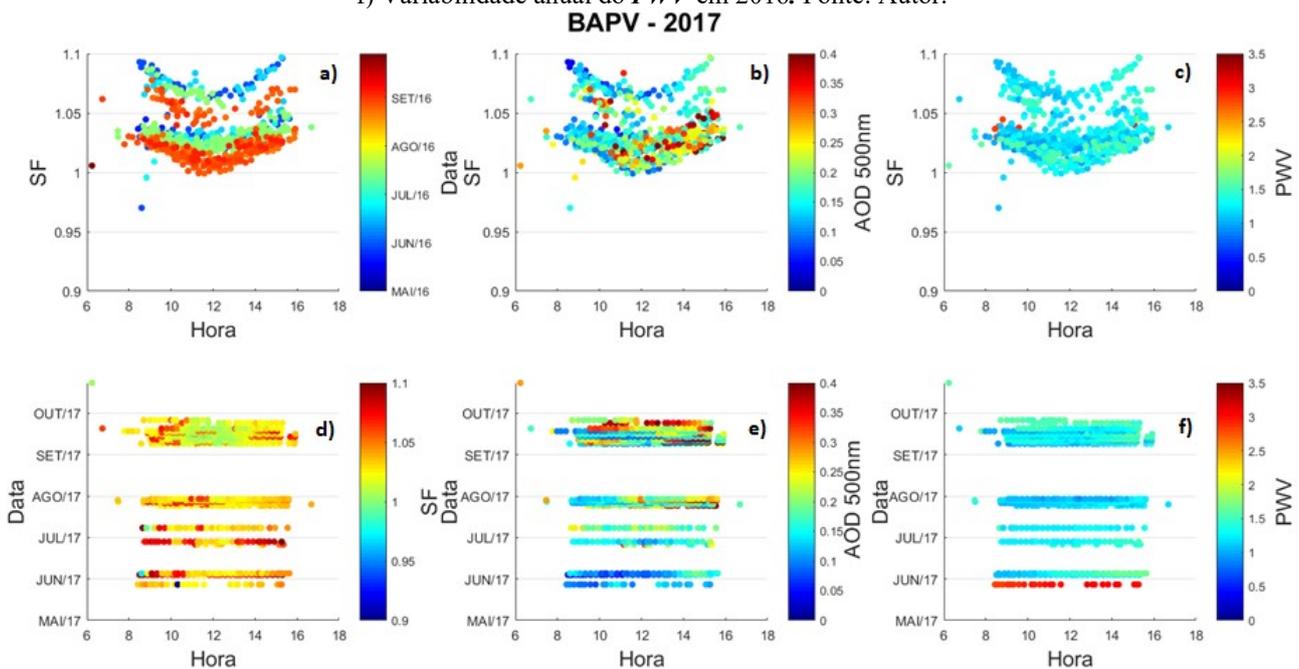


Figura 6. a) Variabilidade diária do SF do sistema BAPV ao longo dos meses em 2017. b) Variabilidade diária do SF do sistema BAPV em função do AOD_{500nm} em 2017. c) Variabilidade diária do SF do sistema BAPV em função do PWV em 2017. d) Variabilidade anual do SF no sistema BAPV em 2017. e) Variabilidade anual do AOD_{500nm} em 2017. f) Variabilidade anual do PWV em 2017. Fonte: Autor.

Curiosamente, os valores de SF obtidos para o ano 2017 ficaram predominantemente acima de 1 (Fig. 6a), enquanto 2016 ficou abaixo, indicando que os módulos do sistema BAPV tiveram um melhor desempenho espectral no ano de 2017. Apesar do episódio com AOD_{500nm} mais elevado, analisando a variação do fator espectral com relação a essa variável, vemos que ao longo do dia, os aerossóis atmosféricos apresentaram uma relação consistente e sistemática com redução dos valores de SF , os valores mais altos de AOD_{500nm} estão atrelados aos valores de cerca de 5% mais baixos de SF (Fig. 6) quando AOD_{500nm} atinge valores superiores a 0,2.

Complementando a análise do impacto da profundidade óptica dos aerossóis e do vapor d'água no desempenho de módulos fotovoltaicos, avaliamos a potência em corrente contínua produzida pelo sistema BAPV. Nota-se forte influência da irradiância na potência gerada pelos módulos fotovoltaicos, comportamento esperado para qualquer tecnologia de módulo fotovoltaico. Além disso, os maiores valores de AOD_{500nm} estão atrelados a valores inferiores da

curva diária de potência, com uma diferença de até 2 kW de potência para valores próximos às 12h (Fig. 7). A água precipitável na atmosfera não apresentou influência sistemática na redução da potencia do sistema indicando que PWV elevado com AOD_{500nm} em trono de 0,1 não acarreta redução dos valores de potência ao longo do dia.

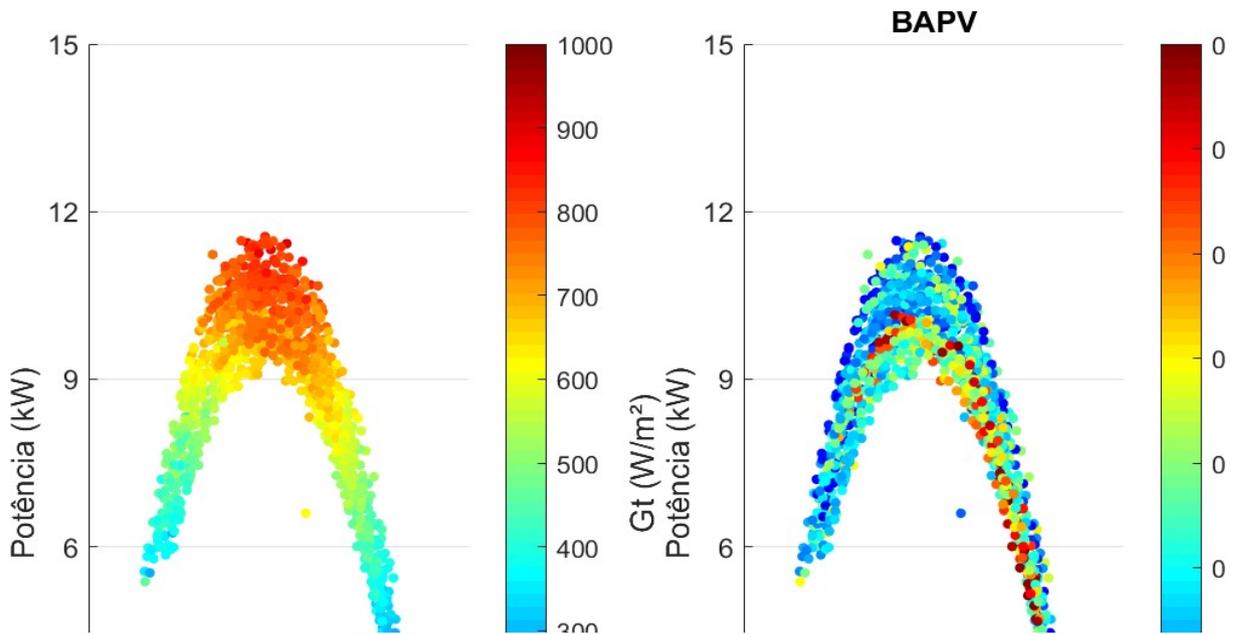


Figura 7. Variação diária da potência em corrente contínua em função dos dados atmosféricos, sendo eles: irradiância global inclinada (Gt), AOD_{500nm} e PWV , para o sistema BAPV no período de 2016-2017. Fonte: Autor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo teve como objetivo avaliar o impacto que os aerossóis atmosféricos produzem no desempenho de módulos fotovoltaicos do tipo de silício monocristalino, operando na Cidade Universitária, campus da USP, na região metropolitanas de São Paulo. Por meio da metodologia empregada, foi possível obter resultados relevantes que agregam mais entendimento sobre como a poluição atmosférica urbana pode afetar o desempenho dos módulos, devido a alterações do espectro e a intensidade da irradiância solar. Buscou-se aplicar um olhar interdisciplinar no processo de desenvolvimento da pesquisa, tentando respeitar e conectar conhecimento das diferentes temáticas.

Os elevados valores de AOD_{500nm} , juntamente com a variação nos parâmetros que representam o dimensão (α) e a capacidade de absorção/espalhamento (ω_o) das partículas, ajudaram na análise da origem dos aerossóis presentes na atmosfera. As análises dos dados da AERONET apontam para a presença de aerossóis de fontes urbanas em maior predominância, e aerossóis associados a eventos de transporte de produtos de queimadas de outras regiões durante a estação seca entre maio e setembro no Brasil. As condições meteorológicas durante a época seca do ano facilitam o acúmulo de poluentes o que explica as maiores concentrações de aerossóis na atmosfera de São Paulo nesta época do ano.

A análise do SF e a sua dependência com aspectos ambientais, como a poluição atmosférica, tem sido realizada em diversas regiões do mundo para diferentes tecnologias de aproveitamento. Entretanto, estudos dessa natureza no Brasil são escassos e têm grande potencial de contribuir nos estudos de previsão de geração, principalmente em grandes centros urbanos como a cidade de São Paulo, onde o nível de poluição tende a ser mais acentuado, especialmente nas estações secas, afetando o desempenho dos módulos.

O sistema BAPV demonstrou sofrer a influência sazonal associada aos aerossóis atmosféricos, com os valores mais baixos de SF para os meses de agosto e setembro, representando perdas de desempenho de 5% em relação ao período com baixos valores de AOD_{500nm} . Os parâmetros atmosféricos influenciam negativamente o desempenho dos módulos, principalmente o AOD_{500nm} , quanto maior a quantidade de particulados na atmosfera, maior a perda de desempenho do sistema, bem como da potência gerada. O impacto dos aerossóis é maior quando valores de AOD acima de 0,2 associados com água precipitável acima de 1,5. Valores elevados de água precipitável não acarretam redução de potência do sistema quando a profundidade ótica dos aerossóis é baixa, em torno de 0,1.

Concluindo, o estudo traz contribuições relevantes para a complexidade que envolve os padrões do fator espectral no contexto das suas relações com as variáveis ambientais analisadas, em particular a poluição atmosférica. Além disso, contribuiu para a compreensão dos cenários dos aerossóis na cidade de São Paulo no contexto da sua importância para a geração de energia fotovoltaica, mostrando a relevância do monitoramento das suas propriedades ópticas, especialmente visando a sua representação em modelos numéricos que se propõe prognosticar a produção de energia.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a meus familiares e amigos por todo apoio. Agradeço também aos companheiros do Laboratório de Modelagem Aplicada a Recursos Renováveis de Energia (LABMAR) e do Laboratório de Clima e Poluição do Ar (LabCliP) por todo conhecimento compartilhado ao longo da pesquisa. Agradecimentos são devidos à UNIFESP e à CAPES pela infraestrutura e financiamento ao projeto. Por último, agradeço ao Prof. Dr. Roberto Zilles e todos os pesquisadores do Laboratório de Sistema Fotovoltaicos do LSF – IEE/USP pelos dados cedidos para o desenvolvimento da pesquisa bem como os esclarecimentos sobre os dados prestados em todo processo.

REFERÊNCIAS

- Alonso-Abella, M., Chenlo, F., Nofuentes, G., Torres-Ramírez, M., 2014. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) Technologies: The case of four specific sites. *Energy*, vol. 67, pp. 435-443.
- Atlas brasileiro de energia solar / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rütther; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira; Jefferson Gonçalves de Souza -- 2.ed. -- São José dos Campos : INPE, 2017. pp. 88
- Castanho, A. D. A., & Artaxo Netto, P. E., 2001. Wintertime and summertime São Paulo aerosol source apportionment study. *Atmospheric Environment*, vol. 35(29), pp. 4889-4902.
- CETESB. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Qualidade do ar no estado de São Paulo 2018. São Paulo: Cetesb, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- Dubovik, O., Holben, B., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., Tanré, D., Slutsker, I., 2002. Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations. *Journal of Atmospheric Science*, vol. 59, n. 3, pp. 590 – 608.
- Gueymard, C. A., Ruiz-Arias, J.A., 2016. Extensive worldwide validation e climate sensitivity analysis of direct irradiance prediction from 1-min global irradiance. *Solar energy*, vol. 128, pp. 1-30.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., 1998. AERONET – A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosols Characterization. *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, n. 1, pp. 1- 16.
- Horvath, H., 2000. Aerosols – An introduction. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 51, n. 1, pp. 5-25.
- IEA, International Energy Agency. Solar PV Tracking Clean Energy Progress. Disponível em: <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/solar/> Acesso em: 18 de novembro de 2018.
- IPCC, Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Chapter 7 – Clouds and Aerosols. 2013.
- IRENA, International Renewable Energy Agency. LCOE 2010-2017. 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/LCOE-2010-2017>. Acesso em: 10 jul. 2019.
- IRENA, International Renewable Energy Agency. **Solar Energy Data: Installed Capacity Trends**. 2018. Disponível em: <https://www.irena.org/solar>. Acesso em: 10 jul. 2019.
- Ishii, T., Otani, K., Takashima, T., 2011. Effects of solar spectrum and module temperature on outdoor performance of photovoltaic modules in round-robin measurements in Japan. *Progress in Photovoltaics*, vol. 19, n. 2, pp. 141-148.
- Li, X., Wagner, F., Peng, W., Yang, J., Mauzerall, D. L., 2017. Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China. *PNAS*. vol. 114, n. 45, pp. 11867-11872.
- Martins, V. J., Artaxo, P., Kaufman, Y. J., Castanho, A. D., Remer, L. A., 2009. Spectral absorption properties of aerosols particles from 350 – 2500nm. *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n. 13, pp. 1-5.
- Neher, I., Buchmann, T., Crewell, S., Evers-Dietze, B., Pfeilsticker, K., Pospichal, B., Schirrmeyer, C., Meilinger, S., 2017. *Energy Procedia*, vol. 125, pp. 170-179.
- Nobre, A. M., Karthik, S., Liu, H., Yang, D., Martins, F. R., Pereira, E. B., Rütther, R., Reindl, T., Peters, I. M., 2016. On the impact of haze on the yield of photovoltaic system in Singapore. *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 389-400.
- Nofuentes, G., García-Domingo, B., Muñoz, J. V., Chenlo, F., 2014. Analysis of dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution. *Applied Energy*, vol. 113, pp. 302-309.
- Pin, M. L. F., 2017. Levantamento do potencial de geração fotovoltaica com sistemas de microgeração aplicados à arquitetura nos edifícios do Campus São Paulo da USP, Dissertação de Mestrado, IEE -USP, São Paulo.
- Polo, J., Alonso-Abella, M., Ruiz-Arias, J. A., Balanzategui, J. L. 2017. Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic Technologies. *Solar Energy*, vol. 142, pp. 194-203.
- Rosa, D. J. DE M., 2003. Caracterização da radiação solar: o caso da cidade universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia. [s.l.] Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Sekiguchi, M., 2003. A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite data sets of aerosols and cloud parameters. *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, n. 22, pp. 1 -15.
- Smirnov, A., Holben, B. N., Eck, T. F., Dubovik, O., Slutsker, I., 2000. Cloud-Screening and Quality Control Algorithms for the AERONET Database. *Remote Sensing of Environment*, vol. 73, n. 3, pp. 337-349.
- Stark, C., Theristis, M., 2015. The impact of Atmospheric Parameters on the Spectral Performance of Multiple Photovoltaic Technologies, New Orleans – LA, 42° PVSC - Photovoltaic Specialist Conference.

- Toledano, C., Cachorro, V. E., Berjon, A., de Frutos, A. M., Sorribas, M., de la Morena, B. A., Goloub, P., 2007. Aerosol optical depth and Angstrom exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 133, n. 624, pp. 795 – 807.
- Yamasoe, M. A., Rosário, N. M. E., Barros, K. M., 2017. Downward solar global irradiance at the surface in São Paulo City – The climatological effects of aerosols and clouds. *Journal of Geophysical Resource: Atmospheres*, vol. 122, pp. 391- 404.
- Yu, X., Lü, R., Liu, C., Yuan, L., Shao, Y., Zhu, B., Lei, L., 2017. Seasonal variation of columnar aerosol optical properties and radiative forcing over Beijing, China. *Atmospheric Environment*, vol. 166, pp. 340-350.
- Zhang, M., Ma, Y., Gong, W., Liu, B., Shi, Y. F., Chen, Z., 2018. Aerosol optical properties and radiative effects: Assessment of urban aerosols in central China using 10-year observations. *Atmospheric Environment*, vol. 182, pp. 275-285.

STUDY ON THE IMPACT OF ATMOSPHERIC AEROSOLS ON THE SPECTRAL FACTOR OF PHOTOVOLTAIC MODULES IN SÃO PAULO

Abstract. Photovoltaic power generation is an alternative that can contribute to achieving sustainable development goals in the energy sector. The distributed power generated based on photovoltaic technology in urban centers has been widely pointed out as a viable alternative for distributed generation close to large consumer centers. At the same time that applying photovoltaic technologies presents continuous growth, air pollution, a chronic problem in big cities, can negatively impact their productivity. Atmospheric aerosols in urban areas are the primary modulator of solar radiation attenuation in the cloudless atmosphere, especially in metropolitan cities presenting dry climate season, such as São Paulo. Aerosols cause the attenuation of the total amount of solar radiation incident on the surface and alter its spectral distribution. Therefore, this work aimed to investigate how the amount and nature of atmospheric aerosols can affect the performance of photovoltaic systems operating in the metropolitan region of São Paulo. By analyzing the historical series of the optical properties of aerosols, it was possible to identify a significant influence of aerosols from fires in other regions of the country, especially during the year's dry season. Furthermore, it was possible to observe the same seasonality in the spectral factor of the crystalline silicon photovoltaic modules in operation, resulting in a lag of up to 5% of the spectral performance of the modules. This variation in performance followed the atmospheric scenarios with high aerosol optical thickness and water vapor.

Keywords: PV power generation, PV performance, Spectral factor, Atmospheric aerosols, Urban environment.