

Universidade Federal de Mato Grosso
Instituto de Física
Programa de Pós-graduação em Física Ambiental

A influência de partículas atmosféricas na redução da
incidência de radiação solar aplicadas a sistemas
fotovoltaicos.

Amanda Crystina Araujo da Silva

Orientador: Prof. Dr. João Basso Marques

Cuiabá - MT
Fevereiro/2023

Universidade Federal de Mato Grosso
Instituto de Física
Programa de Pós-graduação em Física Ambiental

A influência de partículas atmosféricas na redução da
incidência de radiação solar aplicadas a sistemas
fotovoltaicos.

Amanda Crystina Araujo da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Ambiental.

Prof. Dr. João Basso Marques

Cuiabá, MT
Fevereiro/ 2023

DEDICATÓRIA

*Dedico aos meus pais Elaine e Walter
por sempre acreditarem em mim. Amo
você!*

Agradecimentos

À Deus por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior–Brasil (CAPES) pelo financiamento da Pesquisa.

Ao projeto AERONET, e os pesquisadores Paulo Artaxo, José de Souza Nogueira (Paraná) (*in memorian*), Alfredo Jorge e Geraldo Aparecido Rodrigues Neves pelo esforço em estabelecer e manter o site (CUIABÁ-MIRANDA) em funcionamento.

Ao meu professor orientador João Basso Marques, ao coordenador Sérgio Roberto de Paulo pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

À banca avaliadora formada pelos professores Fernando Sallo e Jeferson de Oliveira por todas as sugestões e correções que foram e serão apontadas.

Aos meus pais Elaine Cristina e Walter Flores pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações.

Ao meu querido namorado Fabrício Jorge pelo seu amor incondicional, por compreender minha dedicação ao projeto de pesquisa além de todas as contribuições experimentais, com Python e demais linguagens de programação.

À todo grupo de pesquisa (Thaís, Martin, Lucas), especialmente a doutoranda Rayanna Costa por toda a ajuda e auxílio com a pesquisa.

Ao meu amigo Ian Maxime por toda ajuda durante esse 1 ano de mestrado presencial. Pelo auxílio na instalação e manutenção da Placa Solar, além da ajuda em todas as outras questões referentes ao Mestrado.

Aos meus amigos Paloma, Luís, Lucielly, João Pedro, e também aos colegas de mestrado André, Fernando e Nivalda por todo carinho e suporte nos momentos necessários.

Aos Servidores Jô, Flair, Soilce e Cesário por sempre serem solícitos e me ajudarem sempre que precisei.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE ABREVIATURAS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	1
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Problemática	2
1.2 Justificativa	3
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Sol e Atmosfera Terrestre	5
2.1.1 Radiação Solar	6
2.2 Aerossóis	9
2.2.1 Aerossóis e Radiação Solar	11
2.2.1.1 Profundidade Ótica do Aerossol	11
2.2.1.2 Albedo de Espalhamento Simples	12
2.2.1.3 Coeficiente de Turbidez de Ångström	12
2.3 Energia Solar	12
2.3.1 Células fotovoltaicas	14
2.3.2 Eficiência	15

3	MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1	Caracterização da área de estudo	17
3.2	Coleta de dados	18
3.2.1	AERONET	18
3.2.2	Instalação do Módulo Solar Fotovoltaico	20
3.2.2.1	Limpeza do módulo fotovoltaico	22
3.2.3	Sistema Fotovoltaico Residencial	23
3.3	Métodos	24
3.3.1	Correlação estatística	24
4	RESULTADOS	27
4.1	Caracterização de propriedades ópticas de aerossóis no cerrado mato-grossense	27
4.2	Dados de corrente elétrica e potência elétrica do módulo fotovoltaico	33
4.2.1	Aplicação do teste de Correlação	33
4.2.1.1	Módulo Fotovoltaico	33
4.2.1.2	Sistema Fotovoltaico Residencial	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
	REFERÊNCIAS	40

LISTA DE FIGURAS

2.1	Estrutura da Atmosfera Terrestre Fonte: (VAREJÃO, 2006)	6
2.2	Espectro eletromagnético. Fonte: (VAREJÃO, 2006)	7
2.3	Espectro solar no topo da atmosfera, comparado com o espectro de um corpo negro a 6000 K e com o espectro solar a nível do mar. Fonte:(VAREJÃO, 2006)	7
2.4	Representação da Irradiância Solar. Fonte: (MARTINS et al., 2017)	8
2.5	Características das partículas atmosféricas de acordo com o seu tamanho, Fonte: (ALVES, 2005)	10
2.6	Sistema respiratório humano. Fonte: (DUARTE et al., 2003)	10
2.7	Tendências de capacidade instalada de energia solar e todos os sistemas de energia renovável ao longo da última década Fonte: (RABAIA et al., 2021) Adaptado.	13
2.8	Banda de valência, band gap (GAP) e banda de condução: isolante, condutor e semicondutor. Fonte: (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017), Adaptado.	14
2.9	Célula fotovoltaica Fonte: (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017) Adaptado. . . .	15
2.10	Eficiência das células. Fonte: (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017), Adaptado.	16
3.1	Mapa da área de estudos. Fonte: (Elaborado pela autora).	18
3.2	radiômetro espectral CE318 (Cimel Electronique, França) da rede AERONET. Fonte: AERONET NASA, disponível em: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/ . Acesso em 13 de outubro de 2022.	19
3.3	Rede de radiômetros AERONET espalhadas pelo globo terrestre. Fonte: AERONET NASA, disponível em: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/ . Acesso em 13 de outubro de 2022.	19

3.4	Vista do fotômetro solar com: Ojeda à esquerda e Dr. José de Souza Nogueira “Paraná” à direita (<i>in memorian</i>). Fonte: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/	20
3.5	Módulo solar utilizado para instalação. Fonte: Arquivo pessoal da autora. .	21
3.6	Instalação da Placa Solar. Fonte: Arquivo pessoal da Autora.	21
3.7	Módulo INA219 utilizado para captar os dados de corrente elétrica e tensão do módulo fotovoltaico. Fonte: https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-corrente-dc-ina219-i2c/	22
3.8	Limpeza do módulo fotovoltaico referente aos dias 8/10/22 e 22/10/22. Fonte: Arquivo Pessoal da Autora.	23
3.9	Representação de um Módulo Solar da marca Canadian. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/ . Acesso: 22 de janeiro de 2023.	23
4.1	Variação das médias mensais de AOD nos comprimentos de onda 1640, 1020,870, 675 e 500nm no período de 2001 à 2021. Fonte: elaborado pela autora.	27
4.2	Média dos Focos de Queimadas de 2001 à 2021 para o estado de Mato Grosso. Dados retirados do Programa Queimadas - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Disponível em https://queimadas.dgi.inpe.br). Fonte: elaborado pela autora.	28
4.3	Variação anual de AOD_{500nm} (2001 à 2021). Fonte: elaborado pela autora.	29
4.4	Variação dos dados de AOD_{500nm} nas estações seca e úmida. Fonte: elaborado pela autora.	30
4.5	Histograma de frequência de valores observados de AOD em 500 nm no cerrado mato-grossense no o período entre 2001 à 2021. Fonte: elaborado pela autora.	31
4.6	a) Ano característico do Expoente de Ångström em Mato Grosso, nos comprimentos de onda 380 à 500nm, 440 à 675nm e 440 à 870nm. b) Histograma de Frequência do Expoente de Ångström de comprimento de onda 380 à 500nm. c) Histograma de Frequência do Expoente de Ångström de comprimento de onda 440 à 675nm d) Histograma de Frequência do Expoente de Ångström de comprimento de onda 440 à 870nm.	32

4.7	Dados AOD_{500nm} do ano de 2022 AERONET. Qualidade nível 1.5. Fonte: elaborado pela autora.	33
4.8	Potência elétrica (em vermelho) e Corrente elétrica (em azul) do Módulo Fotovoltaico. Fonte: elaborado pela autora.	34
4.9	Diagrama de Dispersão de AOD e Corrente (acima) e AOD e Potência elétrica (abaixo).	35
4.10	Potência elétrica e energia gerada pelo Sistema Fotovoltaico Residencial durante o ano de 2022.	36

LISTA DE ABREVIATURAS

AERONET: Aerosol Robotic Network (Rede Robótica de Aerossol);

AOD: Aerosol Optical Depth (Profundidade Óptica do Aerossol);

CNES: Centro Nacional de Estudos Espaciais;

HSP: Horas de Sol Pleno ;

NASA: National Aeronautics and Space Administration;

NASDA: National Association of State Departments of Agriculture;

PPGFA: Programa de Pós-graduação em Física Ambiental;

TOA: Radiação solar no topo da atmosfera;

RESUMO

Nos últimos anos notou-se uma expansão considerável no ramo de energia solar no Brasil. Acredita-se que esse aumento seja decorrente não só da preocupação com os impactos ambientais gerados por fontes convencionais, mas também pela alta da inflação energética brasileira. Apesar de ser uma alternativa atraente, a utilização da energia solar apresenta desvantagens quando comparadas às fontes convencionais. Isso se deve pela alta dependência de fatores climáticos como temperatura, nebulosidade e disponibilidade de radiação solar. Outro fator que também influencia na produção de energia solar é a presença de partículas suspensas na atmosfera, os chamados aerossóis. Aerossóis são partículas no estado sólido ou líquido com tamanhos variando na faixa de micrômetros a nanômetros, podem ter origem natural ou antropogênica e como principais fontes de emissão estão poeiras do solo, sal marinho, queima de biomassa, processos industriais, veiculares etc. Entretanto, estudos apontam uma perda de mais de 20% da eficiência de geração de energia solar em um ambiente poluído por aerossóis, tornando-se um fator preocupante devido ao aumento substancial no número de queimadas nos últimos anos, causando o crescimento do número de partículas suspensas na atmosfera. Neste trabalho pretende-se caracterizar a profundidade ótica dos aerossóis atmosféricos de uma região de cerrado-matogrossense, a fim de verificar de que forma ocorrem as variações sazonais e anuais dos aerossóis, bem como investigar quais são suas principais fontes. Objetiva-se também investigar se existe correlação estatística entre a Profundidade ótica de Aerossóis (AOD) e a potência de módulos fotovoltaicos. Para a realização desta pesquisa utilizou-se dados de profundidade ótica e derivados disponibilizados pela rede AERONET ((Aerosol Robotic Network) de um radiômetro espectral localizado em Cuiabá-MT (Fazenda Miranda), além de fazer a instalação e manutenção de um módulo fotovoltaico nas dependências do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental. Utilizou-se também os dados de um sistema fotovoltaico residencial também localizado em Cuiabá. Ao fazer a caracterização dos aerossóis verificou-se predominância dos aerossóis na faixa de 500nm. Percebeu-se que na região investigada existe uma grande predominância de aerossóis provenientes de queima de biomassa, além de um grande aumento dos índices de AOD durante o período da seca. No cálculo do coeficiente de correlação de Spearman encontrou-se uma correlação estaticamente significativa para o Módulo Fotovoltaico, com amostras de corrente elétrica e AOD e também potência elétrica e AOD. Entretanto, a correlação apresentou um valor positivo, o que não era esperado. Já para o Sistema fotovoltaico residencial, encontrou-se uma fraca correlação entre as variáveis Potência elétrica e AOD e Energia gerada e AOD.

Palavras-chave: Aerossóis, Energia Solar, AERONET.

ABSTRACT

In recent years there has been a considerable expansion in the field of solar energy in Brazil. It is believed that this increase is due not only to the concern with the environmental impacts generated by conventional sources, but also to the high Brazilian energy inflation. Despite being an attractive alternative, the use of solar energy has disadvantages when compared to conventional sources. This is due to the high dependence on climatic factors such as temperature, cloudiness and availability of solar radiation. Another factor that also influences the production of solar energy is the presence of suspended particles in the atmosphere, the so-called aerosols. Aerosols are particles in the solid or liquid state with sizes ranging from micrometers to nanometers, they can have natural or anthropogenic origin and the main sources of emission are soil dust, sea salt, biomass burning, industrial processes, vehicles, etc. However, studies indicate a loss of more than 20% in the efficiency of solar energy generation in an environment polluted by aerosols, becoming a worrying factor due to the substantial increase in the number of fires in recent years, causing the growth of the number of fires. particles suspended in the atmosphere. The aim of this work is to characterize the optical depth of atmospheric aerosols in a Cerrado-Matogrossense region, in order to verify how seasonal and annual variations of aerosols occur, as well as to investigate which are their main sources. The objective is also to investigate whether there is a statistical correlation between the Aerosol Optical Depth (AOD) and the power of photovoltaic modules. To carry out this research, optical depth data and derivatives made available by the AERONET network ((Aerosol Robotic Network) from a spectral radiometer located in Cuiabá-MT (Fazenda Miranda) were used, in addition to installing and maintaining a photovoltaic module in the facilities of the Postgraduate Program in Environmental Physics. Data from a residential photovoltaic system also located in Cuiabá were also used. When characterizing the aerosols, it was verified a predominance of aerosols in the 500nm range. It was noticed that in the region investigated, there is a great predominance of aerosols from biomass burning, in addition to a great increase in AOD indices during the dry period. of electric current and AOD and also electric power and AOD. However, the correlation showed a positive value, which was not expected. As for the residential photovoltaic system, a weak correlation was found between the variables Electric power and AOD and Generated energy and AOD.

Keywords: Aerosols, Solar Energy, AERONET.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Problemática

Muito se tem discutido sobre o aumento da demanda energética mundial, e com ela o uso excessivo de fontes de energia não renováveis. Estas fontes por sua vez causam grandes impactos ao meio ambiente, como por exemplo o uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral) que através de sua queima resultam em um grande aumento na quantidade de gases de efeito estufa. No caso da utilização de energia nuclear, deve-se levar em consideração a possibilidade de contaminação radioativa.

A preocupação com esses danos, fez com que a busca por fontes de energia alternativas aumentassem. Um desses recursos é a utilização de energia solar, que consiste em uma fonte de energia limpa, renovável e de baixo impacto ambiental.

Estima-se que a superfície terrestre recebe cerca de $3,5 * 10^{24}$ joules de energia solar por ano, o que seria aproximadamente dez mil vezes a mais do que o necessário para suprir as necessidades energéticas mundiais.

Devido sua localização, o Brasil é considerado um dos países de maior potencial exploratório de energia solar no mundo, recebendo durante todo o ano altos índices de radiação solar. Apesar disso, ao analisar a matriz energética brasileira, percebe-se que a porcentagem de utilização dessa fonte energética ainda é muito baixa, com apenas 1,7% de toda matriz. (BEN 2021)¹.

Entretanto, a crise hídrica brasileira, acompanhada pelo aumento das taxas tributárias de energia elétrica, levaram a um aumento significativo nos investimentos e buscas pela instalação de sistemas fotovoltaicos nos últimos anos, segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar e Fotovoltaica (ABSOLAR), apenas no ano de 2021, registrou-se um aumento de 49% nos investimentos neste setor, sendo desde grandes usinas, até pequenos sistemas instalados em residências rurais e urbanas.

Apesar de ser uma boa alternativa, a utilização da energia solar como fonte de

¹Balanço Energético Nacional 2021. o BEN documenta e divulga, anualmente, extensas pesquisas e a contabilidade relativas à oferta e consumo de energia no Brasil.

energia apresenta algumas desvantagens quando comparadas com as fontes convencionais. Isso se deve pela alta dependência de fatores climáticos como temperatura, nebulosidade e disponibilidade de radiação solar. Outro fator que também pode influenciar na produção de energia solar é a presença de aerossóis atmosféricos.

Aerossóis são partículas em estado sólido ou líquido que estão em suspensão em um meio gasoso, possuem dimensões que variam entre a faixa de micrômetros ($10^{-6}m$) até nanômetros ($10^{-9}m$) e podem ser provenientes tanto de fatores naturais, tais como aerossóis marinhos e poeira, quanto antrópicos, por exemplo, aqueles gerados através da queima de biomassa, emissões veiculares e industriais.

O Brasil registra variações sazonais da espessura ótica de aerossóis, com aumento durante o período da seca, principalmente na região centro-oeste, em consequência do grande aumento do número de queimadas. Segundo o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) no ano de 2020, o estado de Mato grosso registrou mais de 240 mil focos de queimada, números preocupantes, se levar em consideração que a presença de materiais particulados na atmosfera podem atenuar a radiação solar incidente na superfície. Segundo estudos como o de Calinoiu et al. (2013) essa atenuação pode reduzir a eficiência de geração de energia solar em até 20 % .

1.2 Justificativa

Estudos e pesquisas ambientais promovem a reflexão e busca por soluções para problemas sociais como poluição, degradação ambiental, aquecimento global, consumismo, dentre diversos outros fatores que afetam direta ou indiretamente todas as escalas sociais.

No caso das queimadas, além de influenciar no balanço de radiação, também trazem malefícios ao ambiente, causando danos a fauna e a flora, influenciando na fertilidade do solo, prejudicando a qualidade do ar, dessa forma, afetando a saúde populacional através de diversas doenças e problemas respiratórios.

Esses efeitos das queimadas são intensificados devido o aumento da espessura ótica de aerossóis na atmosfera, esses aerossóis podem interferir no micro e macroclima por meio de interações diretas e indiretas, como na absorção da luz solar ou até mesmo na modificação do ciclo de hidrogênio.

A atenuação da radiação solar pode afetar diretamente a produção de energia por meio de usinas solares. Entender e quantificar essa atenuação pode auxiliar produtores de energia solar a compreender melhor sua área de trabalho, bem como futuramente encontrar maneiras de contornar essa problemática.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é caracterizar o regime sazonal dos aerossóis atmosféricos em uma zona de vegetação tipicamente de cerrado e investigar se os aerossóis atmosféricos causam impacto no desempenho de módulos fotovoltaicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os aerossóis atmosféricos para identificar os cenários de poluição do cerrado-matogrossense, com base em dados dos últimos 20 anos.
- Realizar medidas da produção de corrente elétrica e potência de um módulo fotovoltaico.
- Verificar a correlação entre a profundidade ótica de aerossóis atmosféricos com a corrente e potência de módulos fotovoltaicos.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sol e Atmosfera Terrestre

O Sol, além de ser a estrela mais próxima da Terra, também é a maior fonte primária de energia terrestre, sendo fundamental para a existência de praticamente todas as fontes de energia conhecidas, além disso, produz a energia luminosa utilizada no processo de fotossíntese, tornando assim possível a existência de vida na Terra. Com uma temperatura superficial de aproximadamente $6000K$, e um raio de 696.340 km , ele fornece a Terra cerca de quatro milhões de exajoules ($1\text{EJ} = 10^{18}\text{J}$) de energia solar por ano (KABIR et al., 2018).

A radiação solar interage com a Terra atravessando sua camada protetora, conhecida como atmosfera terrestre. A atmosfera é composta por diversos gases (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, etc) e possui uma espessura de cerca de cem quilômetros, que é dividida em camadas que variam de acordo com a pressão, altitude e temperatura (VAREJÃO, 2006).

A primeira camada, denominada Troposfera, inicia-se na superfície terrestre e possui 16km de altura, sua camada limite é denominada tropopausa, como pode ser observado na (Fig. 2.1). Esta é uma camada densa e contém cerca de 75% da massa gasosa total da atmosfera terrestre. Nela os fenômenos climáticos e a turbulência atmosférica são mais acentuados (BARRY; CHORLEY, 2009).

Em seguida, encontra-se a Estratosfera, que se estende até cerca de 50 Km de altitude após a troposfera, e tem como camada limite a estratopausa. Esta camada contém cerca de 10% da massa atmosférica, possuindo uma baixa densidade, é conhecida como a região do ozônio.

Acima dos 50km de altitude até cerca de 80km , encontra-se a Mesosfera, essa camada tem como característica baixas temperaturas médias (mínimas de -133°C), além de possuir a pressão muito baixa, variando de 1mb (em 50km de altitude) à $0,01\text{mb}$ (em 90km de altitude), sua camada limite se chama mesopausa. Por último encontra-se a

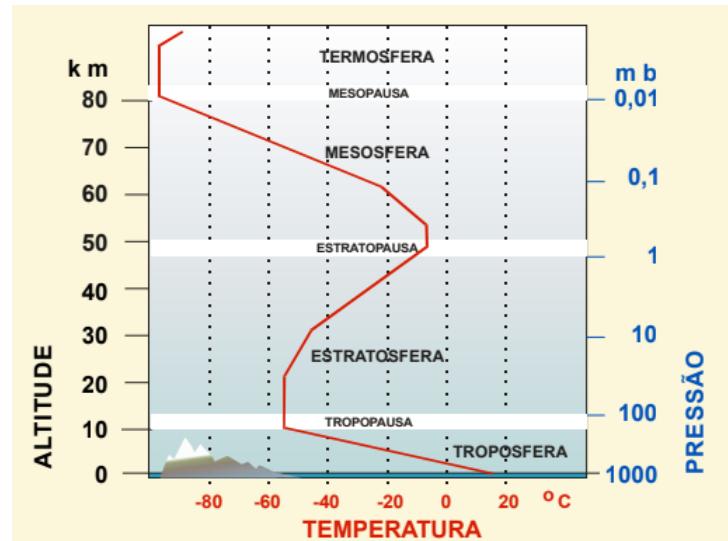


Figura 2.1: Estrutura da Atmosfera Terrestre Fonte: (VAREJÃO, 2006)

Termosfera, esta camada não possui um limite definido, mas possui uma temperatura maior que a camada anterior.

Através destas camadas ocorrem todos os processos associados ao clima e ao tempo, chamados de fenômenos meteorológicos. As transferências de energia do sistema Terra-Atmosfera com o universo ocorrem através de um fenômeno chamado transferência radiativa.

É assim que o Sol irradia sua energia, que atinge a parte superior da atmosfera na forma de ondas eletromagnéticas, de onde é transmitida através da luz visível, radiação ultravioleta (ondas curtas) e radiação infravermelha (ondas longas) através o espectro, parcialmente absorvida e parcialmente espalhada.

2.1.1 Radiação Solar

A radiação solar, também chamada de irradiância solar é essencialmente energia radiante emitida pelo Sol, que é emitida na forma de radiação eletromagnética e se origina da fusão termonuclear que ocorre no núcleo do Sol. O Sol se comporta de maneira semelhante a um corpo negro (MONTEITH; UNSWORTH, 2013). Na física denomina-se corpo negro um corpo hipotético que absorve toda a radiação incidente sobre ele, em todos os comprimentos de onda. Ele emite radiação em quase todos os comprimentos de onda, entretanto a maior parte da energia recebida (domínio da radiação solar) está situada na faixa de 0,15 e 4,0 μm de comprimento de onda (Fig. 2.2). Nessa faixa, aproximadamente 52% da radiação solar que atinge a superfície da Terra está na faixa espectral do infravermelho, 44% na faixa visível e apenas 4% no ultravioleta. (VAREJÃO, 2006)

Existe uma diferença entre a radiação solar que atinge o topo da atmosfera (TOA) e a radiação solar que atinge a superfície terrestre, o espectro da irradiância solar no

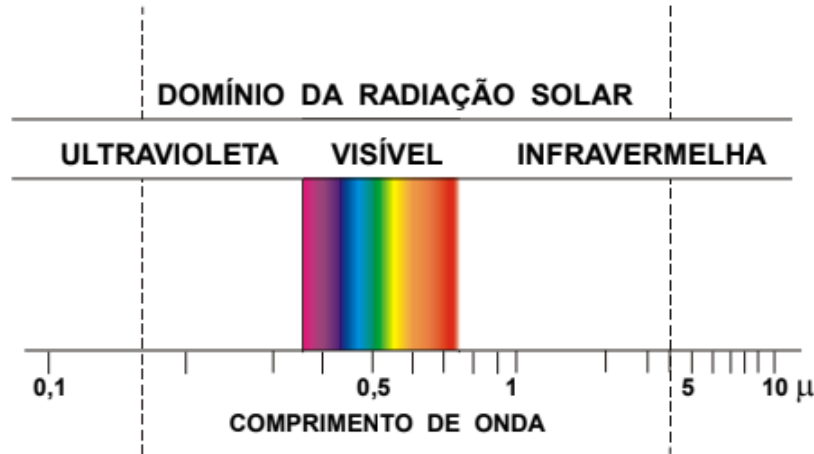


Figura 2.2: Espectro eletromagnético. Fonte: (VAREJÃO, 2006)

topo da atmosfera se assemelha a uma curva de radiação espectral de um corpo negro a 6000K. Na figura (2.3) pode-se observar o espectro contínuo da radiação eletromagnética emitida pelo Sol que atinge o topo da atmosfera e a superfície terrestre após a mitigação dos processos de radiação solar. Pode-se observar que alguns comprimentos de onda da radiação solar são completamente absorvidos na atmosfera e não atingem a superfície terrestre (MARTINS et al., 2017).

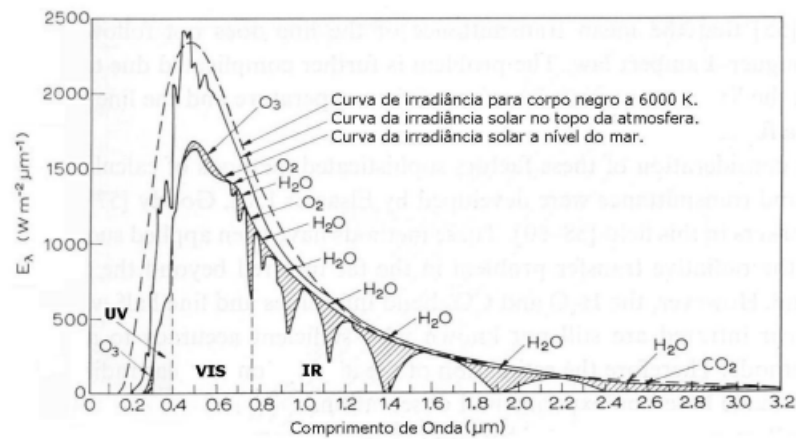


Figura 2.3: Espectro solar no topo da atmosfera, comparado com o espectro de um corpo negro a 6000 K e com o espectro solar a nível do mar. Fonte:(VAREJÃO, 2006)

A irradiância solar (W/m^2) que incide em uma superfície possui uma parcela direta e outra difusa (MONTEITH; UNSWORTH, 2013). A irradiância solar direta pode ser definida como a direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o sol. Ela representa a parte que não sofreu processos de absorção e difusão na atmosfera. Já a componente difusa inclui a radiação de todas as outras direções causada por processos de espalhamento por gases e partículas presentes na atmosfera (Figura 2.4).

Esse espalhamento pode ser conceituado como o modo de interação luz-matéria em que a luz é completamente absorvida e depois reemitida. Existem vários tipos de

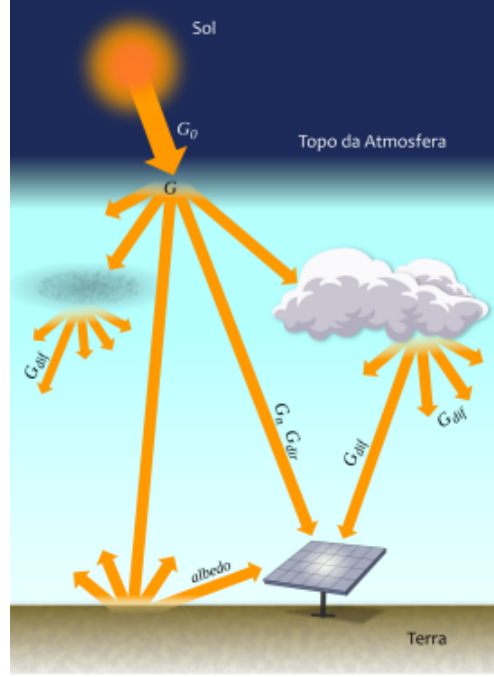


Figura 2.4: Representação da Irradiância Solar. Fonte: (MARTINS et al., 2017)

espalhamento, que dependem, entre outras coisas, do tamanho das partículas com as quais a luz interage em relação ao comprimento de onda da luz. É chamado de "Espalhamento Rayleigh" o espalhamento da luz por partículas muito menores do que o comprimento de onda. Já o segundo processo de atenuação é a absorção por gases atmosféricos e aerossóis.

Os principais gases que absorvem a radiação solar são o ozônio e o oxigênio (especialmente na faixa ultravioleta) e o vapor d'água e o dióxido de carbono (com bandas fortes na faixa do infravermelho). A absorção do aerossol é altamente dependente da fonte da substância, ao contrário do espalhamento, que simplesmente redireciona a radiação, a absorção remove a energia do feixe e aquece o aerossol e a atmosfera que o contém (MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

Uma das formas de descrever a atenuação da radiação solar é através da lei de Beer-Lambert, mas para isso é necessário considerar a coluna atmosférica como sendo um meio homogêneo. Essa lei descreve o comportamento dos raios de luz monocromáticos à medida que passam por um meio (neste caso a atmosfera). Portanto, a intensidade da luz diminui (atenuação) à medida que se propaga por esse meio devido à interação da radiação (espalhamento e absorção) e matéria (partículas) (SEINFELD; PANDIS, 2006). A lei de Beer-Lambert é expressa como:

$$I = I_0 e^{-\tau m} \quad (2.1)$$

Onde I é a irradiância medida no nível do solo, I_0 a irradiância solar no topo da atmosfera, τ é a espessura óptica total da atmosfera (espessura de toda a atmosfera), e m é a massa óptica (que pode ser definida como a razão entre a espessura óptica na direção

vertical e a espessura óptica em uma direção determinada. (OLMEDA, 2005)

2.2 Aerossóis

Os aerossóis atmosféricos são partículas líquidas e/ou sólidas suspensas na atmosfera de origem natural e antropogênica com diferentes propriedades como tamanho, forma, composição química (orgânica e inorgânica) e propriedades físicas (SEINFELD; PANDIS, 2006). Como exemplo de fontes naturais tem-se emissões vulcânicas e biogênicas, aerossóis marinhos, poeira do solo, entre outras. Como fontes antropogênicas, destacam-se as queimas de biomassa, as emissões industriais e veiculares (COSTA et al., 2014).

Essas partículas possuem tamanhos variados, podem ser grandes e, portanto, facilmente visíveis, como fuligem ou fumaça até muito pequenas, na ordem de nanômetros, sendo visíveis apenas com o auxílio de um microscópio (MCMURRY, 2000).

Os aerossóis podem ser divididos de acordo com seu processo de produção que os sintetizam em dois grupos: aerossóis primários e secundários. Os aerossóis primários são emitidos diretamente para a atmosfera, como partículas, por exemplo, os aerossóis gerados do atrito do vento com superfícies oceânicas ou continentais, ou combustão incompleta (FRANCO; NETTO, 2021). Já os aerossóis secundários são produzidos na atmosfera através de um processo denominado “Conversão Gás-Partícula” (GPC, do inglês gas-to-particle conversion), ou seja, quando um gás é liberado, ele passa por processos químicos e físicos, cujo resultado final são partículas (COSTA et al., 2014). Uma representação do processo de formação dos aerossóis pode ser encontrado na Figura (2.5).

Essas partículas ainda podem ser classificadas de duas maneiras: Partículas finas (MPF) possuindo diâmetro inferior a $2,5\mu m$ e partículas grossas (MPG) que possuem diâmetros superiores a $2,5\mu m$ (SEINFELD; PANDIS, 2006). Existem ainda subclassificações das partículas finas, separando-as em duas categorias: ultrafinas, também chamadas de núcleos de Aitken (partículas com diâmetro inferior a $0,1\mu m$) e moda de nucleação, com diâmetro até cerca de 10 nm ($0,01\mu m$), também são chamadas de Partículas Inaláveis (PM_{10}) as partículas que possuem diâmetro aerodinâmico menor que $10\mu m$, e de Partículas Respiráveis ($PM_{2,5}$) aquelas que possuem diâmetro aerodinâmico abaixo de $2,5\mu m$ (XIAO et al., 2011).

As altas concentrações de aerossóis atmosféricos podem afetar de maneira significativa a saúde populacional. As partículas PM_{10} são capazes de se depositar no sistema respiratório humano, as partículas $PM_{2,5}$ podem se alojar principalmente no trato respiratório superior e também nos brônquios principais. (COSTA et al., 2014). Existem ainda as partículas finas ($< 2,5\mu m$) que são capazes de atingir as partes mais profundas do sistema respiratório até os alvéolos pulmonares (figura 2.6) (FILHO et al., 2013).

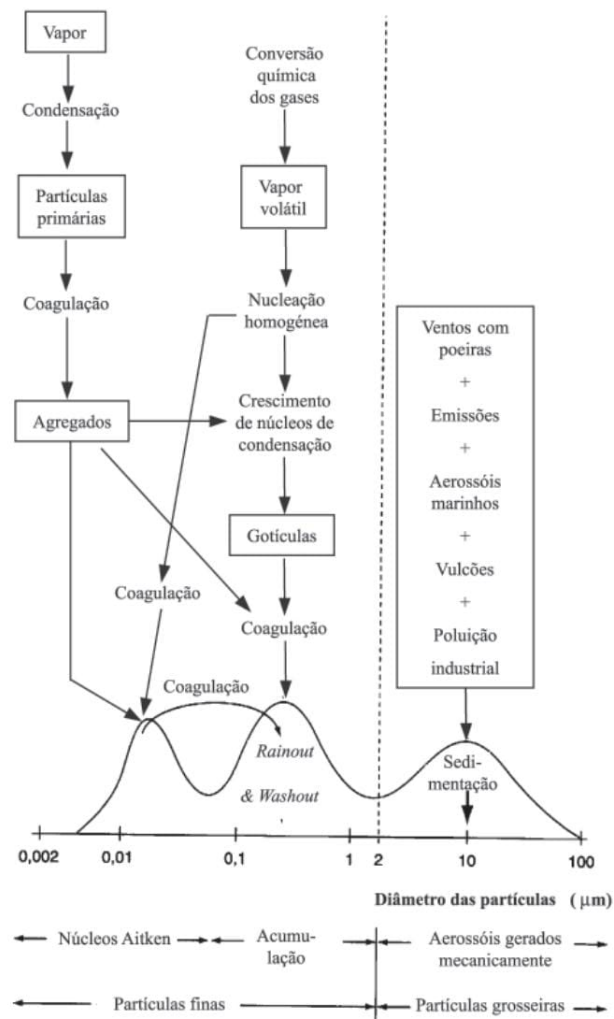


Figura 2.5: Características das partículas atmosféricas de acordo com o seu tamanho, Fonte: (ALVES, 2005)

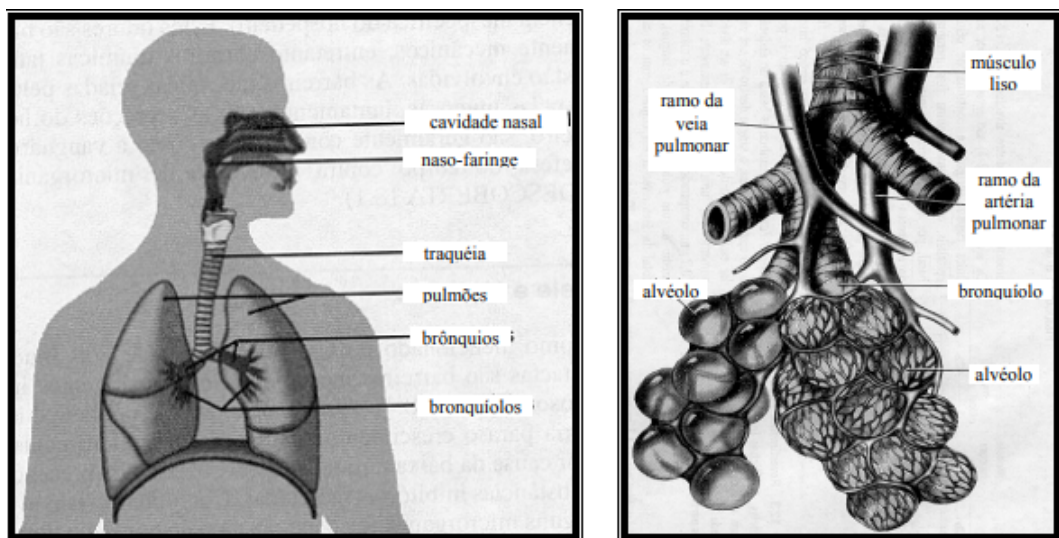


Figura 2.6: Sistema respiratório humano. Fonte: (DUARTE et al., 2003)

2.2.1 Aerossóis e Radiação Solar

Além dos efeitos na saúde, as partículas de aerossóis na atmosfera têm um papel importante nas mudanças globais, pois influenciam o balanço de radiação e o clima da Terra, espalhando ou absorvendo a radiação que entra e sai. O efeito direto inclui a absorção e dispersão da radiação solar, ou radiação de ondas curtas. O espalhamento (ou dispersão) da radiação de ondas curtas na atmosfera (e, portanto, aumento do albedo terrestre) e sua absorção pelas partículas de aerossol atmosférico.

Além da interação direta com a radiação, as gotículas de nuvens são formadas em sua fase inicial na fração de partículas de aerossol (os chamados CCN, núcleos de condensação de nuvens em inglês) (COSTA et al., 2014).

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) o efeito direto global dos aerossóis no balanço radiativo está na faixa de $-0,2$ à $-1,5W/m^2$, ou seja, contribuem para resfriamento do sistema Terra/Atmosfera. (IPCC, 2015).

O balanço radiativo é um componente chave do sistema climático da Terra, e aumentos na concentração de aerossóis atmosféricos causam uma mudança líquida no balanço de radiação, chamada radiação de aerossol (SANTOS et al., 2016).

2.2.1.1 Profundidade Ótica do Aerossol

A profundidade ótica do aerossol (AOD - Aerosol Optical Depth) consiste em um parâmetro físico adimensional responsável por indicar o quanto o feixe de radiação é atenuado pelos aerossóis à medida que se propaga em uma determinada camada da atmosfera (PRADO; COELHO, 2017). Para chegar em uma expressão de AOD é necessário fazer algumas manipulações matemáticas. Através da equação de Beer-Lambert (Eq. 2.1) é possível calcular a espessura ótica de aerossóis, para isso, basta isolar a espessura ótica total da atmosfera (τ):

$$\tau = \frac{-1}{m} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.2)$$

Desse modo, para calcular a profundidade ótica do aerossol (τ_A), basta subtrair a contribuição relacionada ao espalhamento Rayleigh (τ_{SR}) e as absorções por diferentes gases atmosféricos (τ_g) do total (τ).

$$\tau_A = \tau - \tau_{SR} - \tau_g \quad (2.3)$$

A Profundidade Ótica de Aerossóis é definida como a carga de aerossol da coluna atmosférica (do ponto de medição até o topo da atmosfera) e, portanto, é um indicador da quantidade de aerossóis. Esses parâmetros fornecem o tamanho e a distribuição do aerossol na atmosfera usando algoritmos de inversão e a teoria do Espalhamento de Mie (OLMEDA, 2005).

2.2.1.2 Albedo de Espalhamento Simples

Chama-se de Albedo de Espalhamento Simples (SSA - Single Scattering Albedo) um parâmetro para determinação do impacto do aerossol na atmosfera. Este parâmetro quantifica o quanto da radiação foi atenuada por espalhamento ao interagir com as partículas de aerossol. Um albedo igual a 1 unidade significa que todas as extinções de partículas são devidas à dispersão, já um albedo igual a zero implica que toda a extinção é devida à absorção (POKHREL et al., 2016). Pode ser definido pela equação:

$$\omega_o = \frac{b(\lambda, S)_{esp}}{b(\lambda, S)_{ext}} \quad (2.4)$$

Sendo $b(\lambda, S)_{esp}$ e $b(\lambda, S)_{ext}$ coeficientes de espalhamento e coeficiente de atenuação respectivamente.

2.2.1.3 Coeficiente de Turbidez de Ångström

A quantidade vertical de aerossóis presentes na atmosfera pode ser expressa por uma métrica denominada coeficiente de turbidez de Ångström (β). O valor de (β) está tipicamente na faixa de 0,0 a 0,5. A equação de turbidez de Ångström também fornece uma distribuição média de tamanho de aerossol denotada por (α). Para a atmosfera mais natural, $\alpha = 1,3 \pm 0,2$. (KHALIL; SHAFFIE, 2016) Dois parâmetros (α) e (β) entram na fórmula de turbidez de Ångström para o coeficiente de atenuação espectral de um aerossol da seguinte forma:

$$K_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2.5)$$

Sendo $K_{a\lambda}$ a profundidade óptica do aerossol na direção vertical, λ o comprimento de onda (micrômetros) e α é o expoente do comprimento de onda que é representativo da distribuição do tamanho do aerossol.

2.3 Energia Solar

São classificadas como fontes de energia renováveis, aquelas que utilizam como matéria-prima, recursos que são facilmente reabastecidos na natureza. Dentre as fontes renováveis conhecidas atualmente, apenas as de biomassa, geotérmica e solar conseguem ser utilizadas de maneira satisfatória para a geração de energia (KABIR et al., 2018). Ao fazer uma avaliação mais detalhada das tecnologias renováveis e suas estatísticas de desenvolvimento recentes, pode-se notar o grande interesse mundial em sistemas de energia solar, que apresentam cerca de 60% de aumento na capacidade renovável total em 2019 de 98 GW, conforme pode ser observado na figura (2.7) (RABAIA et al., 2021) .

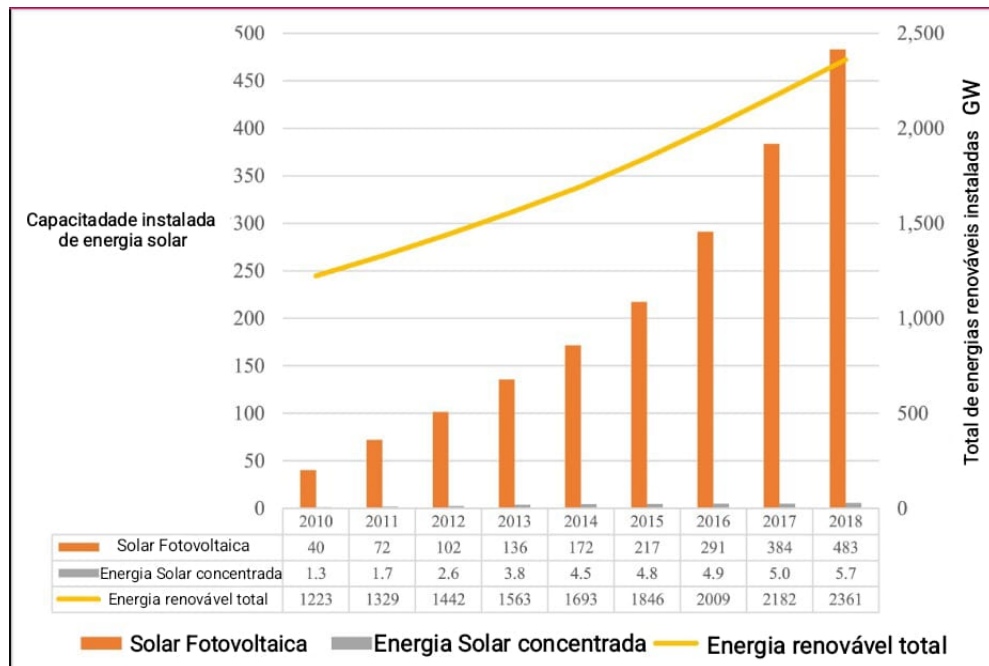


Figura 2.7: Tendências de capacidade instalada de energia solar e todos os sistemas de energia renovável ao longo da última década Fonte: (RABAIA et al., 2021) Adaptado.

De acordo com as projeções energéticas, a energia solar aumentará sua participação na geração de energia em mais de dez vezes até 2050 em comparação com 2017 (GÜNEY, 2022).

A utilização de energia solar, vem auxiliando na redução de um grande problema ambiental mundial, as altas taxas de emissão de dióxido de carbono (CO_2). Estudos mostram que o aumento da instalação de sistemas solares domésticos reduziram a emissão de cerca de 700 mil toneladas métricas de CO_2 , no estado da Califórnia, Estados Unidos (KABIR et al., 2018). Outras bibliografias (GÜNEY, 2022) mostram que o aumento de instalação de usinas de energia solar tem reduzido as emissões de CO_2 em diversos países pelo mundo.

Entretanto, o uso de energia solar fotovoltaica também possui desvantagens, principalmente devido sua variação local, sazonal e alta dependência de fatores climáticos. Outra questão é que o fluxo de potencial solar que chega até a superfície terrestre é baixo (cerca de $1kW/m^2$) quando comparado a fontes convencionais (RABAIA et al., 2021). Ainda é importante salientar que os equipamentos de captura e conversão requerem um investimento inicial maior do que os sistemas tradicionais.

O Brasil é um dos países de grande potencial exploratório de energia solar, pois recebe altos índices de radiação solar durante o ano, e também possui suas características climáticas favoráveis, possibilitando a produção de energia solar em larga escala (SILVA; ARAÚJO, 2022) Outro fator torna o Brasil um grande potencial de produção de energia solar, é que ele é um dos maiores produtores mundiais de silício (matéria prima para a produção de placas solares) (CARVALHO et al., 2014).

Apesar de parecer uma tecnologia recente, a energia solar começou a ser explorada no ano de 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, responsável pela descoberta do efeito fotovoltaico (KOMP, 1995). Este efeito é caracterizado pelo surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de um semicondutor, a partir da absorção de luz visível. (SOUZA, 2016) Já a primeira célula solar foi desenvolvida no ano de 1954, por cientistas da Bell Labs, esta célula era a base de silício, e possuía uma eficiência de 6% .

2.3.1 Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas consistem em dispositivos elétricos que utilizam materiais semicondutores (silício, arseneto de gálio, telureto de cádmio, etc.) para converter energia luminosa em energia elétrica. O processo de conectar este semicondutor em um circuito elétrico que possui uma diferença de potencial quando a radiação solar atinge este material semicondutor facilita a excitação dos elétrons dentro deste material, estes elétrons se movem de forma ordenada, e neste cenário para gerar uma corrente. A energia é gerada pelo efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico é produzido pela absorção da luz solar, criando uma diferença de potencial em toda a estrutura dos materiais semicondutores. As células solares não armazenam energia elétrica, elas apenas mantêm os elétrons fluindo pelo circuito enquanto houver incidência de luz sobre ela. (SEVERINO; OLIVEIRA, 2010 apud LANA et al., 2015)

Quase todos os dispositivos fotovoltaicos contêm uma junção PN no semicondutor onde a fotovoltagem é gerada. Esses dispositivos também são conhecidos como células solares. (GOETZBERGER et al., 2003). O material mais utilizado para a fabricação de células solares é o silício. Esses materiais possuem duas bandas de energia, em uma delas é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e a outra está totalmente vazia (banda de condução) (Fig. 2.8) (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

No silício, são necessários $1,12\text{eV}$ (eletrovolts) para que os elétrons ultrapassem o GAP(PENG; LEE, 2011).



Figura 2.8: Banda de valência, band gap (GAP) e banda de condução: isolante, condutor e semicondutor. Fonte: (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017), Adaptado.

A função da luz solar no efeito fotovoltaico é fornecer uma quantidade de energia ao elétron mais externo para possibilitar que ele se mova da banda de valência para a banda de condução no material, gerando eletricidade.

O material semicondutor deve ser capaz de absorver grande parte do espectro solar. A junção PN é a parte principal da célula onde a porção receptora de luz é o material do tipo N na parte abaixo deste o material é do tipo P. (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017) . Na Figura 2.9 pode-se observar a representação de uma típica célula solar.

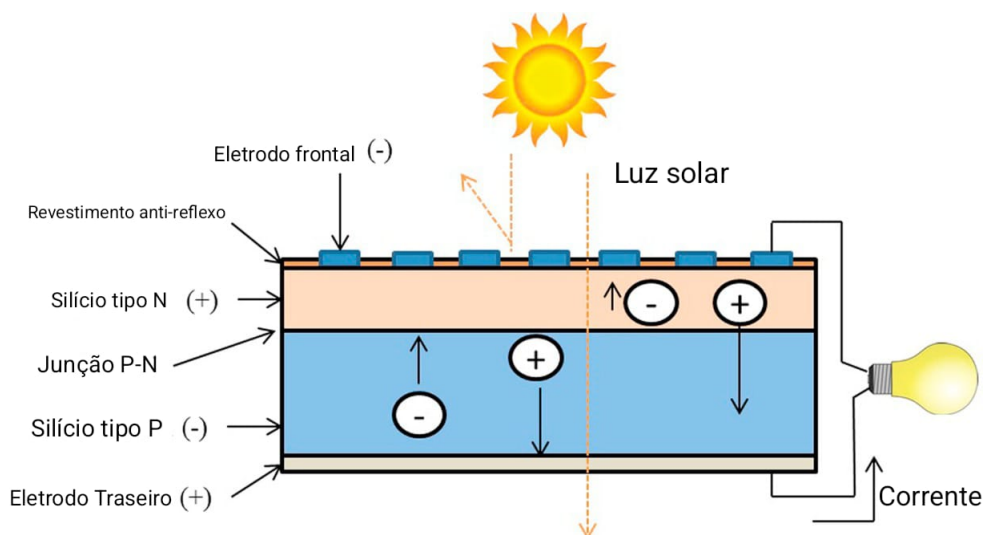


Figura 2.9: Célula fotovoltaica Fonte: (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017) Adaptado.

Uma única célula solar é insuficiente para gerar altas potências, então os fabricantes combinam várias células e as encapsulam, deste modo são formados os módulos fotovoltaicos.

2.3.2 Eficiência

A eficiência das células solares é um dos principais parâmetros para estabelecer esta tecnologia no mercado. Essa eficiência varia de acordo com o material de fabricação da célula. Entre todos os outros materiais de células solares, aquelas feitas à base de silício cristalino têm a maior eficiência em comparação as demais. (TYAGI et al., 2013). No entanto, materiais baseados em filmes finos, células orgânicas e poliméricas e muitos outros materiais também vem sendo desenvolvidos, com o objetivo de reduzir os custos de produção e serem mais ecológicos do que os materiais convencionais. Todavia, até o momento eles ainda possuem a eficiência menor do que as comumente usadas. Uma relação entre o material e a eficiência dos módulos fotovoltaicos pode ser observado na Figura 2.10.

Fatores ambientais como temperatura, umidade e poeira também são responsáveis por reduzir eficiência de módulos fotovoltaicos. A temperatura pode afetar seriamente a eficiência das células, deste modo, pesquisas tem se concentrado em diminuir a temperatura da placa solar extraindo o calor para depois utiliza-lo para aquecer a água ou o ar (TYAGI et al., 2013)

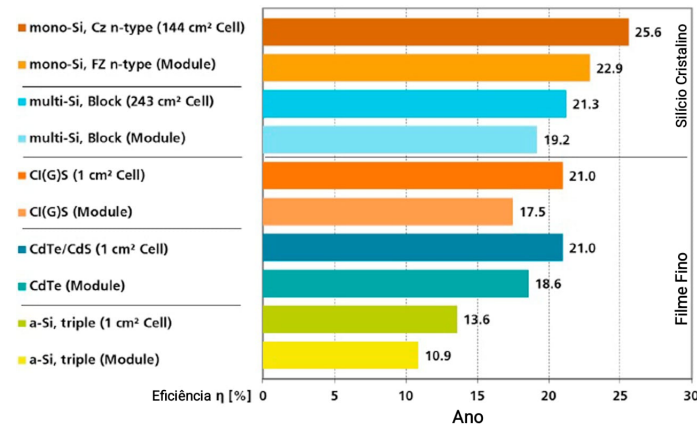


Figura 2.10: Eficiência das células. Fonte: (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017), Adaptado.

À medida que a irradiância solar aumenta, a eficiência do módulo fotovoltaico também aumenta devido ao alto número de fótons que atingem o módulo (TYAGI et al., 2013). Deste modo, a poeira também pode ser um grande fator de redução da eficiência desses módulos, pois ela auxilia no bloqueio da irradiância solar na superfície fotovoltaica. Resultados experimentais (SAIDAN et al., 2016) mostram que o acúmulo de pó reduz consideravelmente a corrente máxima de 6,9% a 16,4% dependendo do período de exposição à essas condições. Como uma forma de contornar este problema é recomendável que a superfície da placa solar seja limpa com frequência em ambientes de alta exposição a poeira (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Já foi discutido em seções anteriores sobre a atenuação da radiação solar através de aerossóis. Mas um fator notório é que essa atenuação pode diminuir a eficiência de módulos fotovoltaicos.

Segundo (CALINOIU et al., 2013) resultados estimando a perda de energia demonstram que ela pode chegar a mais de 20% do valor calculado na ausência de poluição por aerossóis. Outros estudos (DRAME et al., 2012) também apresentam reduções no potencial solar causado pela presença de altos índices de partículas de aerossol que afetaram o local ao longo do ano.

Capítulo 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa se concentrou em três locais da cidade de Cuiabá (Fig. 3.1), sendo na Fazenda Miranda localizada há 20km a SE da região urbanizada de Cuiabá, onde está localizado o radiômetro espectral da rede AERONET. No prédio da pós graduação em Física Ambiental, dentro da Universidade Federal de Mato Grosso, campus Cuiabá, onde foi instalado o módulo fotovoltaico e também em uma zona residencial, localizada a cerca de 9km da região central de Cuiabá, onde está localizado o painel solar fotovoltaico também utilizado neste trabalho.

Cuiabá é a capital do estado de Mato Grosso, possui uma população de cerca de seiscentos mil habitantes segundo estimativas feitas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2021. Localizada no centro-oeste do Brasil, em uma região ao sul da Amazônia. Geograficamente Cuiabá possui uma extensão territorial de $3.224,68\text{km}^2$, sendo $251,94\text{km}^2$ de área urbana e $2.972,74\text{km}^2$ de área rural e encontra-se localizada entre as coordenadas $15^{\circ}10'$ a $15^{\circ}50'$ S de latitude e $54^{\circ}50'$ a $58^{\circ}10'$ W (SANTOS, 2013).

Cuiabá está situada em uma zona de vegetação tipicamente de Cerrado. Segundo a classificação de Köppen possui um clima savana tropical (Aw) com estações bem definidas, sendo uma estação úmida, entre os meses de outubro e abril e uma estação seca, entre maio e setembro (NOVAIS et al., 2017).

A estação seca cuiabana representa uma forte influência da massa de ar seca que aliada ao fenômeno continental, impede a formação de umidade na área. Consequentemente, Cuiabá apresenta uma umidade relativa muito baixa nesse período, o que também favorece a ignição de incêndios.

A precipitação anual total é de cerca de 1350 mm, concentrando-se no período de final de setembro à maio, atingindo seus maiores índices durante o verão (SANTOS, 2013).

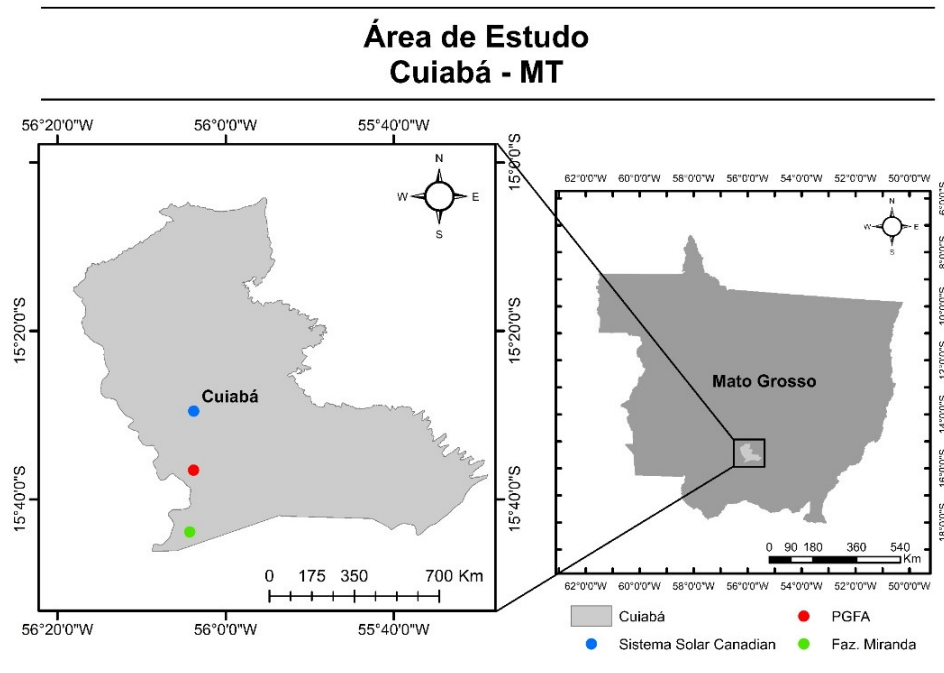


Figura 3.1: Mapa da área de estudos. Fonte: (Elaborado pela autora).

3.2 Coleta de dados

3.2.1 AERONET

Para adquirir os dados de profundidade óptica dos aerossóis (AOD) utilizou-se o AERONET (Aerosol Robotic Network) disponíveis no site (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

O Aerosol Robotic Network (AERONET) consiste em uma rede de monitoramento de aerossóis de sensoriamento remoto iniciada pela NASA, desenvolvida para dar suporte aos sistemas de satélites terrestres da NASA, CNES e NASDA sob o nome de AERONET e expandida por colaboração nacional e internacional (HOLBEN et al., 1998).

O projeto começou na década de 1990 para monitorar as propriedades ópticas dos aerossóis do solo e validar imagens de satélite das propriedades ópticas do aerossol (TOLEDANO et al., 2007). O AERONET consiste em uma rede de radiômetros solares robóticos e idênticos (Figura (3.2)) que estão globalmente distribuídos, como pode ser observado na Figura (3.3). Cada instrumento mede a luz solar e a intensidade do céu ao longo do dia, do ultravioleta ao infravermelho.

O radiômetro espectral CIMEL Electronique 318A fabricado em Paris, França, é um radiômetro espectral do céu e Sol apontado roboticamente resistente ao clima e movido a energia solar. Este instrumento tem aproximadamente um campo de visão de ângulo total de $1,2^\circ$ e dois detectores para medição de sol direto, auréola e radiância do céu. (HOLBEN et al., 1998)

Os dados são transmitidos da memória do fotômetro solar através do sistema de



Figura 3.2: radiômetro espectral CE318 (Cimel Electronique, França) da rede AERONET. Fonte: AERONET NASA, disponível em: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em 13 de outubro de 2022.

aquisição de dados para os satélites geoestacionários GOES-E, GOES-W ou METEOSAT e enviados de volta para as estações receptoras terrestres correspondentes. Os dados podem ser recuperado para processamento por meio de um Modem ou através de conexão com a internet, portanto, podem ser recuperados quase em tempo real de qualquer lugar da Terra, exceto na região dos pólos de 80° de latitude.

O programa fornece um banco de dados público de longo prazo, contínuo e acessível de propriedades ópticas, microfísicas e radiativas de aerossóis para pesquisa de aerossóis, incluindo caracterização de aerossóis, validação de resultados de satélites e previsões de modelos e sinergia com outros bancos de dados. Os dados são coletados em sete comprimentos de onda da radiação solar (340, 380, 440, 500, 670, 875, 1020 nm). (HOLBEN et al., 1998)

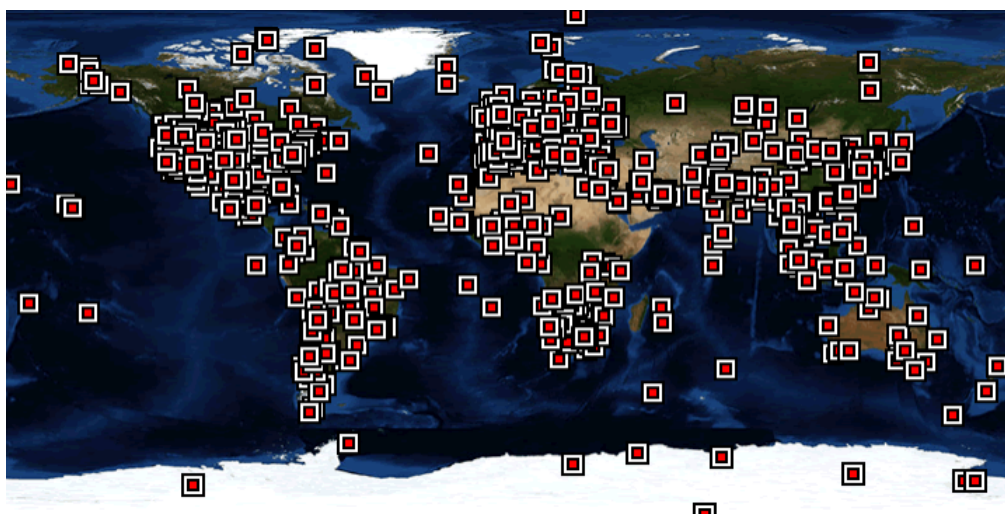


Figura 3.3: Rede de radiômetros AERONET espalhadas pelo globo terrestre. Fonte: AERONET NASA, disponível em: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em 13 de outubro de 2022.

Os dados de profundidade ótica (AOD) possuem três níveis de qualidade: nível 1.0 (dados brutos), nível 1.5 (nuvens com qualidade controlada) e por fim nível 2.0 (qualidade garantida) cujo a qualidade é certificada pela rede pois passam por um processo de tratamento pós campo. Além dos dados de AOD, os dados de água precipitável também passam por controle de qualidade garantidos pela rede AERONET (HOLBEN et al., 1998).

Utilizou-se os dados do sensor CUIABÁ-MT (MIRANDA) localizado em Mato Grosso, na Fazenda Miranda (Fig. 3.4) com coordenadas $15^{\circ}43'44''S$ de latitude e $56^{\circ}01'15''W$ de longitude. A fazenda Miranda está localizada há 20km a SE da região urbanizada da capital e ao Sul da Amazônia. Dessa forma fez-se uma caracterização sazonal da profundidade ótica de aerossóis (AOD), utilizando dados de 20 anos (2001 à 2021) da rede, afim de caracterizar o regime de aerossóis nesta região, além de verificar quais os comprimentos de onda estão em maior atividade na localização.



Figura 3.4: Vista do fotômetro solar com: Ojeda à esquerda e Dr. José de Souza Nogueira “Paraná” à direita (*in memoriam*). Fonte: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/> .

O AERONET também fornece dados como o albedo simples (ω_o), expoente de Ångström (α) que juntamente com os dados de AOD serão utilizados para caracterização da atenuação da radiação solar através de aerossóis atmosféricos. Para esse estudo utilizou-se os dados de nível 2.0 da rede, com exceção do ano de 2022, em que utilizou-se dados de nível 1.5, pois os de nível 2.0 não estavam disponíveis.

3.2.2 Instalação do Módulo Solar Fotovoltaico

Os dados de energia solar foram coletados através da instalação de um módulo solar no bloco de Pós-graduação em Física Ambiental (PPGFA) com coordenadas $15^{\circ}36'31.8''S$ de latitude e $56^{\circ}03'48.0''W$ de longitude, cujo a localização pode ser observada na Figura (3.1).

Utilizou-se um módulo solar de silício cristalino da fabricante BP Solar, modelo SX420M (Fig. 3.5). Esse tipo de célula solar possui eficiência por volta de 18% a 14%. O



Figura 3.5: Módulo solar utilizado para instalação. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

painel fotovoltaico foi instalado sobre uma haste na área de serviço do PPGFA, voltado para a direção Norte e com inclinação de 15 graus para otimizar a captação de energia solar. (TORSONI et al., 2019) Na figura 3.6 é possível ver o processo de instalação do módulo.



Figura 3.6: Instalação da Placa Solar. Fonte: Arquivo pessoal da Autora.

As especificações do módulo fotovoltaico podem ser encontradas na Tabela (3.1) abaixo:

Utilizou-se o módulo INA219 para fazer as medidas de tensão e corrente da placa solar (Fig. 3.7). O módulo INA219 é um sensor de corrente e tensão projetado para monitoramento e usa um resistor shunt para realizar as medições necessárias. O sensor realiza medições de 0 a 26 VDC e o limite máximo de corrente depende do resistor shunt, a placa possui um resistor shunt de $100m\Omega$ e a corrente máxima permitida é de 3,2 A. Uma fonte de 3 ou 5 V deve ser utilizada para alimentar a fonte de alimentação do sensor. (FAUZI et al., 2021)

Tabela 3.1: Especificações Módulo Fotovoltaico.

Especificações Módulo Fotovoltaico	
Fabricante Bp Solar Modelo: SX420M	
Dimensões	245 x 235 x 22,6 mm
Pico de Potência (Pmax)	20W
Tolerância máxima de produção de Pmax	+/- 10%
Corrente de curto-circuito	1,29A
Corrente Pmax (Impp)	1,19A
Tensão elétrica Pmax (Vmpp)	16,8V

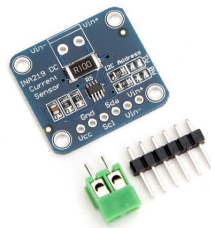


Figura 3.7: Módulo INA219 utilizado para captar os dados de corrente elétrica e tensão do módulo fotovoltaico. Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-corrente-dc-ina219-i2c/>.

3.2.2.1 Limpeza do módulo fotovoltaico

Como já discutido no capítulo de fundamentação teórica, o acúmulo de pó reduz consideravelmente a eficiência de módulos fotovoltaicos. Estudos como (SAIDAN et al., 2016) indicam que a limpeza programada é a melhor solução para minimizar o impacto da poeira nos painéis solares fotovoltaicos. Desta forma, optou-se por fazer uma limpeza semanal no módulo fotovoltaico instalado.

A limpeza manual utilizando água e sabão neutro é uma ótima alternativa para reduzir o acúmulo de poeira sobre o módulo fotovoltaico. Assim como descrito em Kazem et al. (2020) é necessário utilizar um objeto macio para evitar arranhões na superfície da placa. Portanto optou-se pelo uso de um pano de microfibra descartável sobre as cerdas da escova (macia) para a realização da limpeza. Algumas imagens do processo de limpeza semanal realizado no módulo fotovoltaico podem ser observadas na Figura (3.8).

Um detalhe importante é que a limpeza é sempre feita um tempo após o pôr-do-sol, essa medida é necessária evitar que ocorra choque térmico da superfície quente da placa com a água (em temperatura ambiente). Dessa forma evitando o aparecimento de microfissuras no módulo, o que consequentemente reduziria sua eficiência.



Figura 3.8: Limpeza do módulo fotovoltaico referente aos dias 8/10/22 e 22/10/22. Fonte: Arquivo Pessoal da Autora.

3.2.3 Sistema Fotovoltaico Residencial

Como uma segunda fonte de dados de energia solar, utilizou-se um sistema solar fotovoltaico (off-grid) instalado em uma residência localizada na Cidade de Cuiabá ($15^{\circ}29'31''\text{Sul } 56^{\circ}3'47''\text{Oeste}$). Esse sistema é formado por 20 módulos fotovoltaicos de 330W da marca Canadian (Fig.3.9). Cada módulo possui massa de cerca de 22kg e possui dimensões de 1960 x 992 x 40 (mm). Além disso, suas células são feitas de silício policristalino e apresentam eficiência de cerca de 16% a 17%. Foram obtidos dados de média diária de energia gerada pelo sistema (kWh) durante o ano de 2022.



Figura 3.9: Representação de um Módulo Solar da marca Canadian. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/>. Acesso: 22 de janeiro de 2023.

Para a obtenção dos dados de potência elétrica geradas pelo sistema, utilizou-se um processo de conversão de kWh (quilo watt-hora) em kW (quilowatts). Para isso foi

necessário utilizar dados de HSP (Horas de Sol Pleno) para estimar por quanto tempo o módulo fotovoltaico produziu energia diariamente.

A HSP (Horas de Sol Pleno) consiste em uma variável que indica o número de horas por dia que a irradiância solar alcança um valor de $1000W/m^2$ (Este é um valor de referência, que representa uma potência máxima hipotética). Essa variável é largamente utilizada na indústria de energia solar para estimar o potencial energético solar de cada região e pode ser representada pela equação:

$$HSP = \frac{H}{G_o} \quad (3.1)$$

Conceitualmente a HSP é a quantidade de tempo (Δt) em horas que a irradiância solar (H') está disponível em um local considerando a constante de irradiância solar (G_o) igual a $1.000W/m^2$, que é equivalente a quantidade de irradiação solar (H) que estará disponível ao final do dia naquele local. (FERREIRA, 2020)

Para encontrar a HSP utilizou-se a plataforma do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB). Para obter esses dados basta inserir as coordenadas geográficas do local, que a plataforma disponibiliza a irradiação solar do local, tanto de forma direta, como com inclinações características das placas solares. Neste caso, utilizou-se dados de irradiância com inclinação 15° , já que é a inclinação recomendada para a instalação de módulos fotovoltaicos nesta região. Esses dados são provenientes do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

3.3 Métodos

A estatística descritiva, busca sintetizar um conjunto de dados de mesma natureza a fim de proporcionar um panorama geral do comportamento desses dados, além de organizá-los e classificá-los por meio de gráficos, tabelas e medidas descritivas (SILVESTRE, 2007). Sendo assim, buscou-se descrever os dados de AOD e Albedo de espalhamento simples, utilizando dados de 2001 à 2021 para caracterizar anual e sazonalmente as variações da profundidade ótica no cerrado mato-grossense.

Para realização dos testes estatísticos e elaboração dos gráficos utilizou-se as bibliotecas de software Pandas, Numpy e Matplotlib através da linguagem de programação Python. Também foi utilizado o software Origin para a construção gráfica.

3.3.1 Correlação estatística

Um coeficiente de correlação é um método estatístico usado para medir a relação entre variáveis. A correlação tenta entender como uma variável se comporta em cenários onde outra variável muda e determina se existe uma relação entre as duas variáveis.

Para fazer a análise de correlação utiliza-se geralmente o teste de correlação de Pearson, que consiste em um teste paramétrico, onde os níveis de correlação são avaliados de acordo com os valores da variável r . O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis. Sua fórmula é a seguinte:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \frac{x_i - \bar{X}}{s_x} \frac{y_i - \bar{Y}}{s_y} \quad (3.2)$$

O coeficiente de correlação de Pearson (r) varia de -1 a 1. O sinal indica a direção positiva ou negativa da relação e o valor indica a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o valor de uma variável pode ser determinado exatamente pelo conhecimento do valor da outra variável. Por outro lado, um valor de correlação igual a zero indica que não há relação linear entre as variáveis.

No entanto, valores extremos (0 ou 1) raramente são encontrados, dessa forma existem classificações de níveis de correlação, de acordo com o valor do coeficiente. Em Cohen (1992) encontra-se uma classificação em que valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos, entre 0,30 e 0,49 pode ser considerados médios e por fim valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Para a aplicação desse teste de correlação a amostra precisa apresentar algumas características, como por exemplo uma distribuição normal e variância homogênea.

Nos casos em que a amostra não atende aos pressupostos de um teste paramétrico é necessário utilizar testes não paramétrico, como por exemplo o teste de correlação de Spearman.

O teste de Spearman utiliza um coeficiente de ρ para descrever a relação entre as variáveis. Semelhante ao r de Pearson, o ρ de Spearman também varia de -1 a +1. De acordo com Cohen (1992) o valor de ρ é classificado da seguinte maneira:

- $\rho = 0,10$ (correlação fraca);
- $\rho = 0,30$ (correlação moderada);
- $\rho = 0,5$ (correlação forte);

Um outro detalhe importante é o nível de significância do resultado obtido, para isso, utiliza-se o conceito de hipótese nula (H_0). Este H_0 assume que o resultado obtido foi devido o acaso, e não através de uma verdadeira correlação entre as variáveis, considera-se que o resultado é proveniente de flutuações probabilísticas. Outra hipótese também é levada em consideração, a esta nomeia-se como Hipótese Alternativa (H_A) que por sua vez, assume que o resultado foi obtido por conta de uma real similaridade entre as variáveis, dessa forma, considera-se que essa correlação é estatisticamente significativa.

Para medir a probabilidade dessas hipóteses, denomina-se uma variável chamada valor-p. A avaliação das hipóteses ocorre através da comparação do valor-p com o nível

de significância da amostra, conhecido como (α) , que geralmente possui valor igual a 0,05. Ou seja, um valor-p menor que 0,05 indica que a correlação é estatisticamente significativa.

Para verificar se as amostras possuem uma distribuição normal utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk. O teste de Shapiro-Wilk visa avaliar se uma distribuição se assemelha a uma distribuição normal, também chamada de gaussiana. Como resultado, o teste retorna a estatística W , que é dada pela Equação (3.3).

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.3)$$

Sendo $X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq \dots X_n$ são os valores ordenados de uma amostra, já $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ e a_i são coeficientes dados por:

$$a_i, \dots, a_n = \frac{m^T V^{-1}}{C} \quad (3.4)$$

Sendo C a norma de um vetor. A estatística W possui um valor de significância associada, que é dada pelo valor-p. Neste caso, considera-se uma que uma distribuição é normal quando o valor-p possui um valor maior que 0,05 (HANUSZ et al., 2016).

Para investigar a existência de correlação entre as variáveis medidas no módulo fotovoltaico (corrente elétrica, potência e energia) com a profundidade ótica de aerossóis (AOD) utilizou-se a linguagem de programação R.

No caso da análise com os dados do módulo fotovoltaico instalado, as amostras de Corrente elétrica e Potência utilizadas são do período de setembro à novembro de 2022, pois consiste no período em que o módulo fotovoltaico começou a fazer sua coleta de dados. Como a rede AERONET possui muitas falhas de continuidade nos dados, foram selecionados dados de média diária de ambas as variáveis para os dias em que o sensor fez coleta no período citado, utilizando amostras de nível 1.5, devido a indisponibilidade das amostras de nível 2.0.

Para as análises com os dados do Sistema Fotovoltaico Residencial (Potência elétrica e Energia gerada), utilizou-se os dados do ano de 2022, e também dados de nível 1.5 da rede AERONET, para a profundidade ótica.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 Caracterização de propriedades ópticas de aerossóis no cerrado mato-grossense

Através dos dados de média mensal dos aerossóis de cinco comprimentos de onda (1640nm, 1020nm, 870nm, 675nm e 500nm) pode-se fazer uma caracterização da AOD do cerrado mato-grossense, dessa forma, através do gráfico da Figura 4.1 observou-se uma variação sazonal nos níveis de aerossóis, com aumento nos níveis de AOD durante os meses de agosto, setembro e outubro. Este aumento é perceptível em todos os comprimentos de onda, entretanto observa-se que quanto menor o comprimento de onda, mais significativo é o aumento da AOD, com maiores índices em 500nm. Esse padrão também pode ser observado em trabalhos como o de Bet et al. (2022).

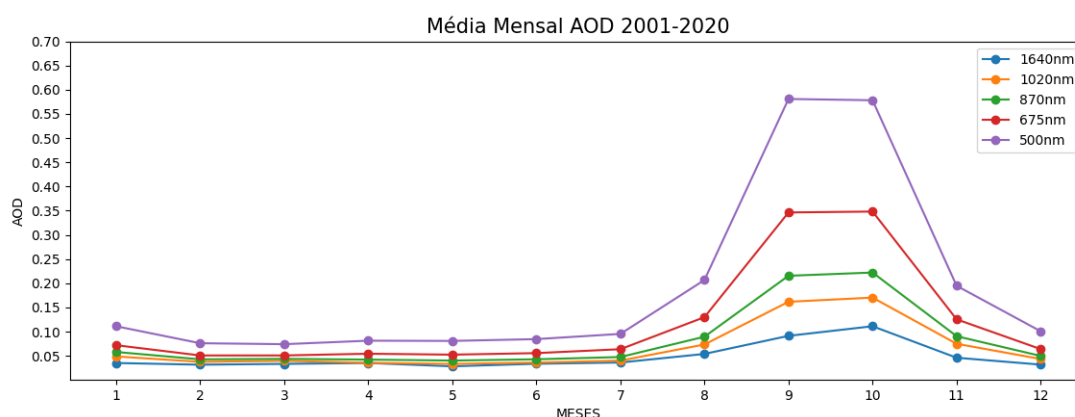


Figura 4.1: Variação das médias mensais de AOD nos comprimentos de onda 1640, 1020, 870, 675 e 500nm no período de 2001 à 2021. Fonte: elaborado pela autora.

Segundo Toledano et al. (2007) o crescimento da AOD nestes comprimentos de onda mais curtos indica que há uma maior concentração de aerossóis de moda fina ($MP_{2.5}$), estes provavelmente são provenientes de queimadas. Eventos esses que aumentam consideravelmente durante o período da seca, assim como pode ser observado no gráfico

(Fig. 4.2).

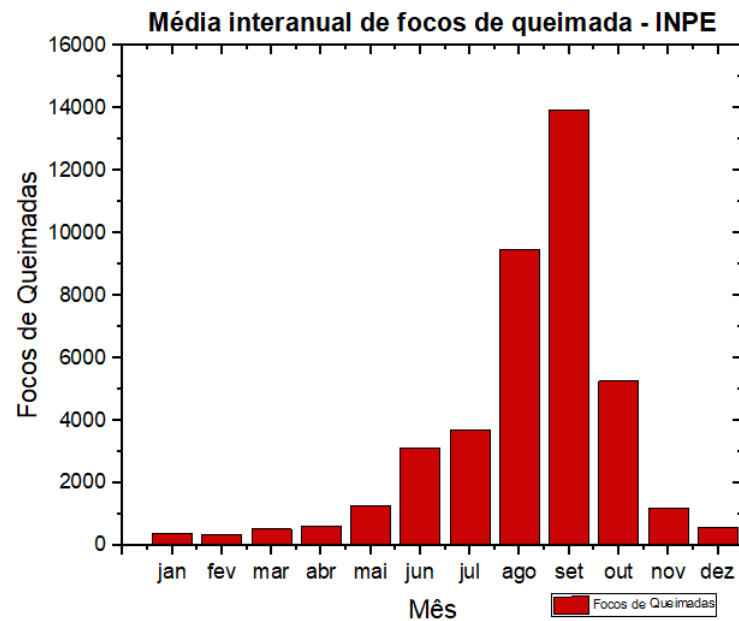


Figura 4.2: Média dos Focos de Queimadas de 2001 à 2021 para o estado de Mato Grosso. Dados retirados do Programa Queimadas - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Disponível em <<https://queimadas.dgi.inpe.br>>). Fonte: elaborado pela autora.

De acordo com Novais et al. (2017) que também realizou pesquisas na mesma região, os aumentos durante o período da seca mostram forte sazonalidade associada à queima de biomassa no Hemisfério Sul, sugerindo que as partículas de queimadas são transportadas pelos ventos alísios da Namíbia e de Angola.

Ao analisar a Tabela (4.1) vemos que 80% dos anos analisados apresentam seu valor máximo durante o período da seca. Com o ano de 2007 possuindo o maior valor de AOD_{500nm} entre os valores máximos (6,81). Este ano também apresentou recorde em número de focos de queimada no mês de setembro (com 37.231 focos) segundo o programa de monitoramento de queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (INPE, 2022)

Também é possível observar que o ano de 2005 possui a maior média e mediana entre os anos analisados (Fig. 4.3) com o valor de (0,822) bem acima da média total (0,31). Este ano bastante atípico, em que 25% dos dados são menores ou iguais a 0,311 (percentil 25) e 75% dos dados menores ou iguais a 1,00 (percentil 75) possuindo também uma grande dispersão dos dados. Nota-se também que a média anual teve redução nos últimos 3 anos analisados, (com valores abaixo de 0,09).

Tabela 4.1: Análise de Parâmetros estatísticos multianual de AOD_{500nm} (2001 à 2021). (n*: quantidade de dados disponíveis ; N: número de meses com dados válidos; Média; Std: desvio padrão; Mediana; P25: Percentil 25, P75: Percentil 75; Dia Min.: Dia com valor mínimo; Dia Max: Dia com valor máximo.)

Anos	n*	N**	Média	Std	Mediana	P25	P75	Min	Max	Dia Min	Dia Max
2001	4268	9	0,318	0,314	0,19	0,12	0,394	0,022	2,625	89	175
2002	616	9	0,813	0,818	0,29	0,151	1,63	0,053	3,485	144	263
2003	2128	7	0,269	0,265	0,195	0,129	0,316	0,06	2,875	153	154
2004	1603	10	0,296	0,366	0,148	0,09	0,35	0,038	2,381	336	283
2005	1829	9	0,822	0,847	0,497	0,311	1,009	0,046	4,891	337	266
2006	3138	11	0,327	0,458	0,156	0,119	0,26	0,041	3,315	79	263
2007	4489	9	0,382	0,739	0,121	0,089	0,222	0,042	6,814	123	276
2008	5313	10	0,211	0,21	0,11	0,08	0,268	0,027	1,514	357	287
2009	2895	12	0,108	0,063	0,093	0,068	0,127	0,025	0,76	154	251
2010	3297	10	0,725	0,753	0,47	0,133	1,128	0,043	4,285	356	267
2011	6693	12	0,166	0,152	0,11	0,078	0,184	0,029	1,378	52	266
2012	5342	12	0,2	0,251	0,103	0,07	0,19	0,022	1,807	60	256
2013	1866	10	0,104	0,061	0,087	0,068	0,12	0,029	0,805	33	270
2014	3114	11	0,197	0,222	0,085	0,051	0,292	0,0004	1,297	147	291
2015	3416	12	0,313	0,276	0,235	0,088	0,463	0,034	1,694	127	266
2016	55	11	0,1	0,072	0,077	0,067	0,09	0,045	0,428	121	251
2017	5331	12	0,189	0,197	0,096	0,068	0,217	0,023	1,24	48	266
2018	28	8	0,091	0,048	0,077	0,068	0,097	0,026	0,254	247	243
2019	98	9	0,09	0,067	0,075	0,065	0,088	0,043	0,521	168	246
2020	89	6	0,09	0,038	0,081	0,07	0,095	0,056	0,327	215	238
2021	29	3	0,075	0,022	0,071	0,062	0,085	0,044	0,143	60	31

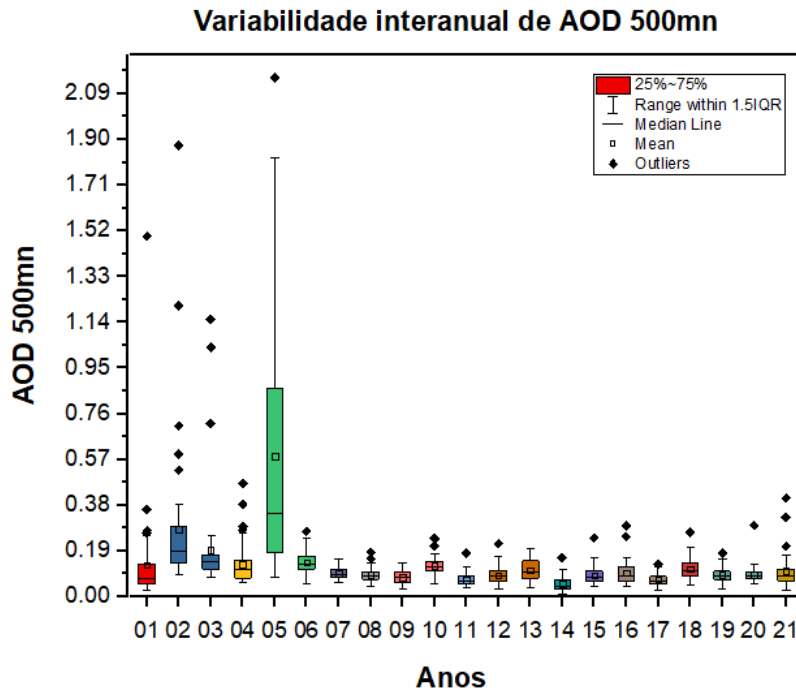


Figura 4.3: Variação anual de AOD_{500nm} (2001 à 2021). Fonte: elaborado pela autora.

Observando características sazonais do ano de 2005 (Fig. 4.4), é possível ver a diferença na distribuição de AOD_{500nm} entre as épocas seca e úmida do ano demonstrando

contrastes marcantes entre a atmosfera mato-grossense nas duas épocas (BET et al., 2022). Outros estudos na atmosfera mato-grossense, como o de Palácios et al. (2014) também observaram essa diferença sazonal no comportamento dos dados de profundidade ótica.

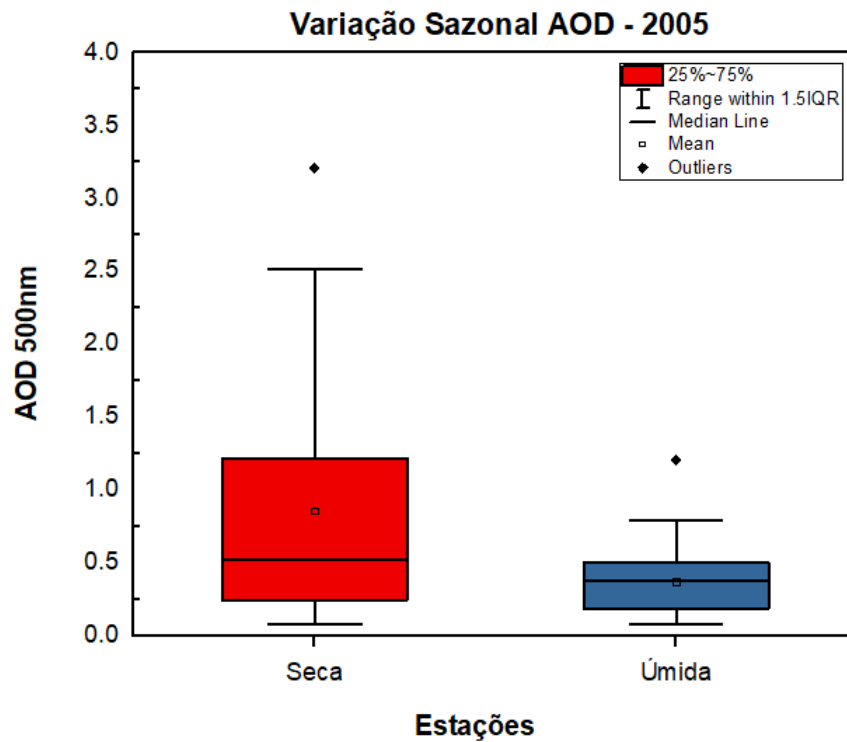


Figura 4.4: Variação dos dados de AOD_{500nm} nas estações seca e úmida. Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura (4.5) é possível ver o histograma das amostras de AOD observadas neste estudo. Observa-se que a maior frequência de AOD_{500nm} é aproximadamente igual a 0,2.

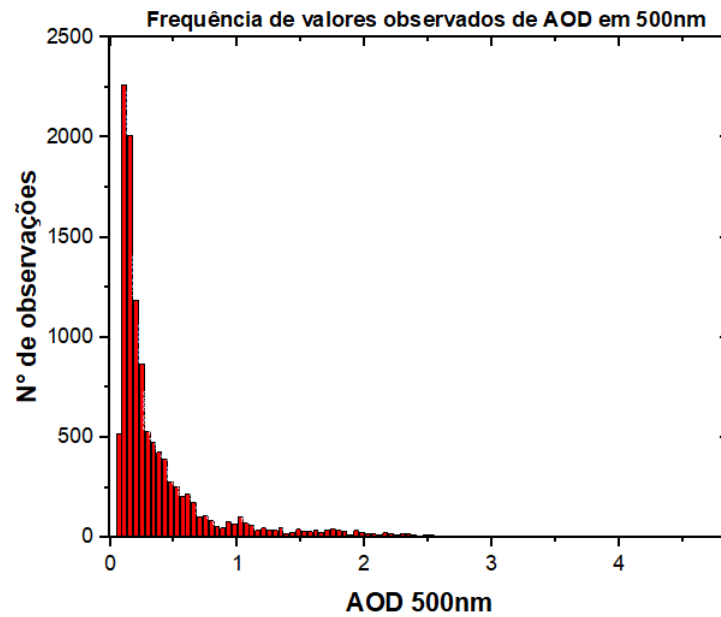


Figura 4.5: Histograma de frequência de valores observados de AOD em 500 nm no cerrado mato-grossense no o período entre 2001 à 2021. Fonte: elaborado pela autora.

Como já discutido no capítulo de fundamentação teórica, através do albedo de espalhamento simples (ω_o) é possível estimar as características dos aerossóis da região. Ele é capaz de indicar se as partículas são do tipo espalhadoras ou absorvedoras. Através da tabela (4.2) podemos observar que os aerossóis possuem características mais absorvedoras em todos os comprimentos de onda analisados, ao contrário do que foi encontrado por Bet et al. (2022) em seu estudo na região de São Paulo.

Tabela 4.2: Variação do Albedo de Espalhamento Simples nos comprimentos de onda 440 nm, 675nm, 870nm e 1020nm.

	Min	P25	Média	Mediana	Std	P75	Max
ω_o440	0,027	0,036	0,043	0,042	0,008	0,049	0,066
ω_o675	0,053	0,071	0,083	0,083	0,015	0,095	0,125
ω_o870	0,248	0,269	0,297	0,292	0,034	0,317	0,431
ω_o1020	0,285	0,302	0,326	0,317	0,03	0,345	0,435

Na Fig.4.6 pode-se observar a variação característica do expoente de Ångström no estado de Mato Grosso. Segundo Oliveira e Mariano (2014) o expoente de Ångström relaciona o tamanho da partícula ao seu tipo. Portanto, o valor médio do expoente pode determinar os principais tipos de partículas presentes na atmosfera dentro de um determinado caminho óptico. O valor do expoente Ångström varia entre 0 e 2. Na primeira imagem da Fig.4.6 a) observa-se a variação do ano característico do expoente de Ångström, nota-se que durante os meses de agosto a outubro encontram-se os maiores expoentes, ficando acima de 1.5. Bet et al. (2022) afirma que aerossóis produzidos através de queima de biomassa e também aerossóis urbanos possuem valores entre $1 < \alpha < 2$, o que nos

mostra que existe a predominância de partículas de moda fina. Esse comportamento também pode ser observado nos Histogramas de Frequência (Fig.4.6), onde nota-se que a maior parte dos expoentes possuem valores acima de 1.0, em todos os comprimentos de onda analisados.

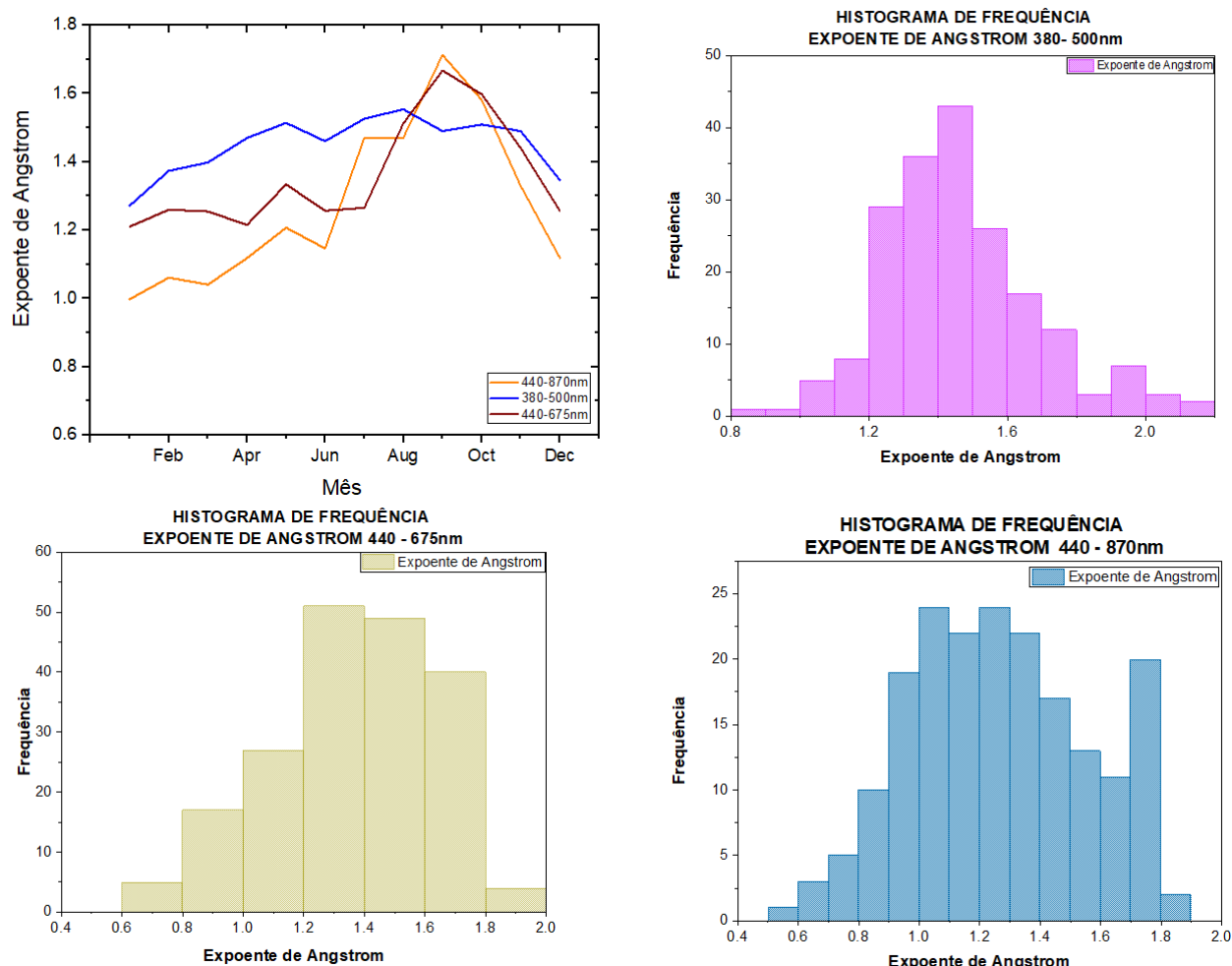


Figura 4.6: a) Ano característico do Expoente de Ångström em Mato Grosso, nos comprimentos de onda 380 à 500nm, 440 à 675nm e 440 à 870nm. b) Histograma de Frequência do Expoente de Ångström de comprimento de onda 380 à 500nm. c) Histograma de Frequência do Expoente de Ångström de comprimento de onda 440 à 675nm d) Histograma de Frequência do Expoente de Ångström de comprimento de onda 440 à 870nm.

Para o ano de 2022 (Fig. 4.7) encontrou-se os mesmos padrões já discutidos, com aumento significativo da AOD nos meses de agosto, setembro e outubro.

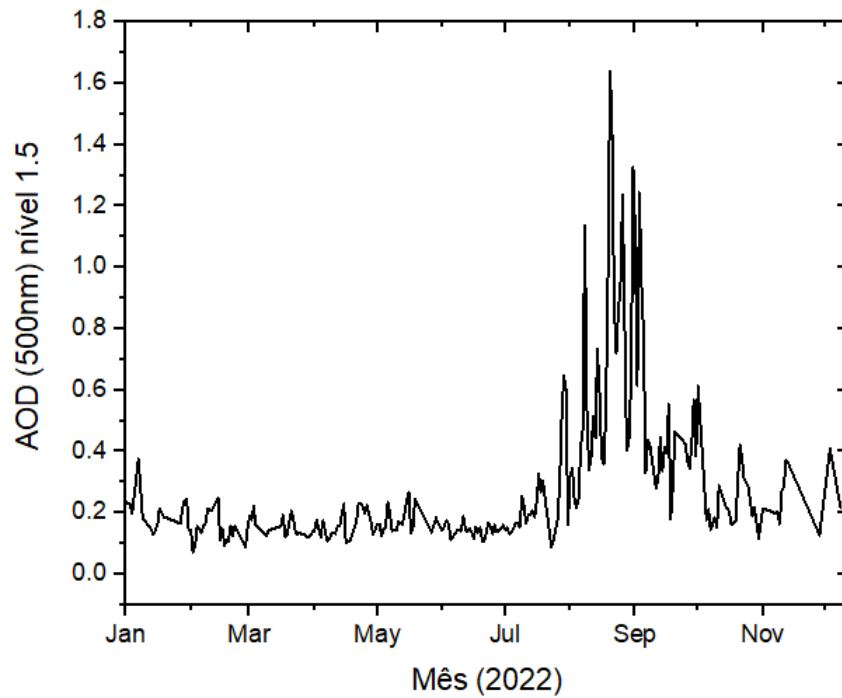


Figura 4.7: Dados AOD_{500nm} do ano de 2022 AERONET. Qualidade nível 1.5. Fonte: elaborado pela autora.

4.2 Dados de corrente elétrica e potência elétrica do módulo fotovoltaico

Os dados de corrente elétrica e potência elétrica obtidos através do sensor INA219 no período de 13 de setembro à 13 de outubro de 2022 podem ser observados nos gráficos da Figura (4.8).

Pode-se observar que os padrões de corrente elétrica e potencia elétrica são bem semelhantes, possuindo os mesmos mínimos e máximos.

4.2.1 Aplicação do teste de Correlação

4.2.1.1 Módulo Fotovoltaico

Aplicando o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Tabela 4.3) obteve-se um valor p igual a 0,21 e 0,22 para as variáveis potência e corrente elétrica respectivamente, indicando que ambas possuem uma distribuição normal ($p > 0,5$).

Já a variável AOD obteve um valor de $1,29 \times 10^{-6}$ o que indica que esta variável não possui uma distribuição normal.

Dessa forma, foi necessário aplicar um teste não paramétrico para as variáveis. Portanto calculou-se o coeficiente de correlação de Spearman (tabela 4.4) para as variáveis AOD x potência elétrica e AOD x corrente elétrica.

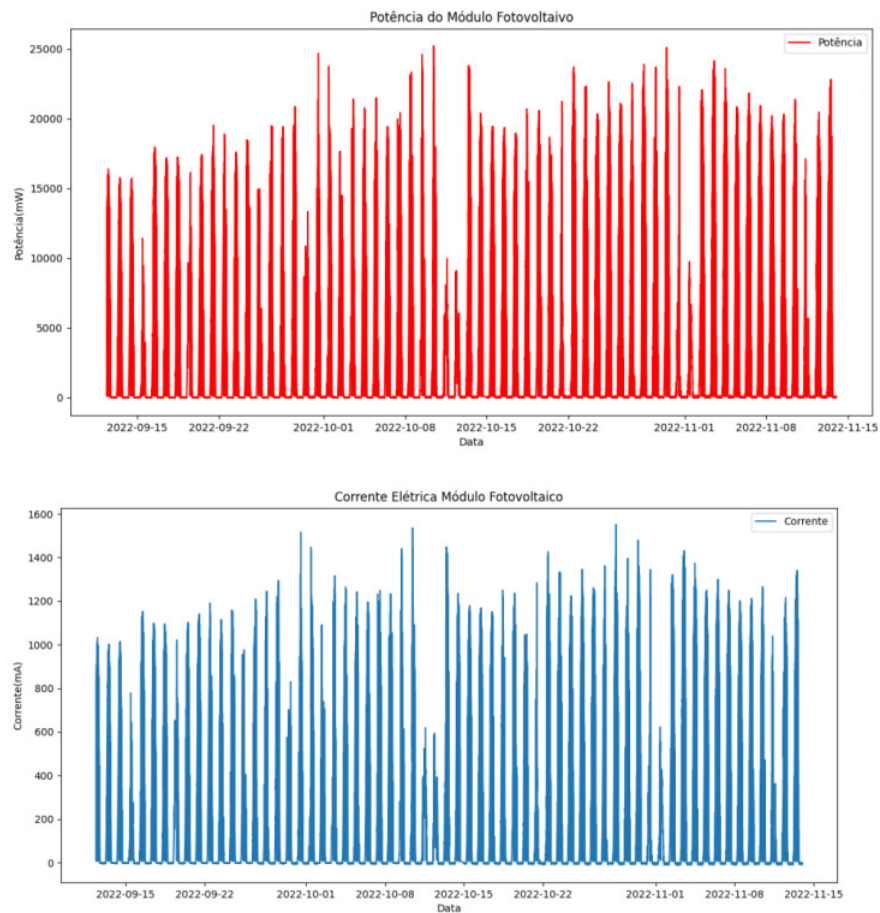


Figura 4.8: Potência elétrica (em vermelho) e Corrente elétrica (em azul) do Módulo Fotovoltaico. Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 4.3: Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk com os dados do Módulo Fotovoltaico

Variáveis	Valor-p
Potência elétrica	0,21
corrente elétrica	0,22
AOD	$1,29 \times 10^{-6}$

Tabela 4.4: Resultado do cálculo do coeficiente de Correlação de Spearman com dados do Módulo Fotovoltaico

Variáveis	ρ	Valor-p
Potencia e AOD	0,33	0,02
Corrente e AOD	0,54	0,0001

Para a correlação entre as variáveis Potência e AOD o coeficiente de correlação de Spearman apresentou um valor de 0,33, que segundo a classificação de Cohen (1992) indica que as variáveis possuem uma correlação moderada. O valor-p apresentou o valor igual a 0,02 indicando que a correlação é estatisticamente significativa.

Já na aplicação da correlação entre os dados de corrente elétrica e AOD obteve-se um ρ igual a 0,54. Conforme a classificação de Cohen (1992) pode-se dizer que as variáveis possuem uma correlação forte. Com um valor-p de 0,0001 podemos afirmar que a correlação é estatisticamente significativa. Entretanto, o valor positivo de ambas as variáveis indicam que elas possuem uma relação diretamente proporcional, o que não era esperado ao calcular os coeficientes de correlação.

Esses resultados também podem ser observados nos diagramas de dispersão da Figura (4.9). Onde observa-se uma grande dispersão nos valores de AOD_{500nm} acima de 0,8 para ambos os casos. Esse resultado pode estar atrelado a pequena quantidade de dados disponíveis para a amostra, e também o uso dos dados de AOD de 1.5 já que não possuem uma qualidade alta como os de 2.0.

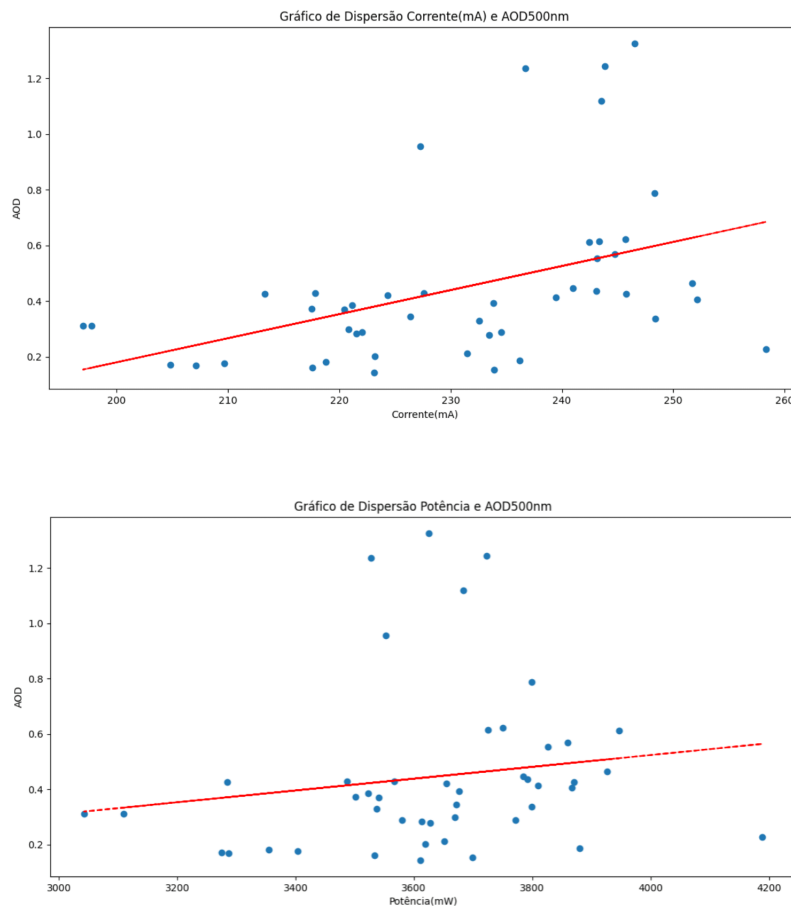


Figura 4.9: Diagrama de Dispersão de AOD e Corrente (acima) e AOD e Potência elétrica (abaixo).

4.2.1.2 Sistema Fotovoltaico Residencial

Obteve-se dados de um ano de um sistema fotovoltaico residencial localizado em Cuiabá, o gráfico de sua produção de energia e potência elétrica durante o ano de 2022 podem ser observados na Fig. (4.10). Esses dados passaram por um processo de filtragem, retirando valores inferiores a 30% da potência de pico sistema, como forma de amenizar o efeito das nuvens sobre as análises. Nota-se uma queda de produção do sistema fotovoltaico durante o período de maio à setembro, durante o período da seca.

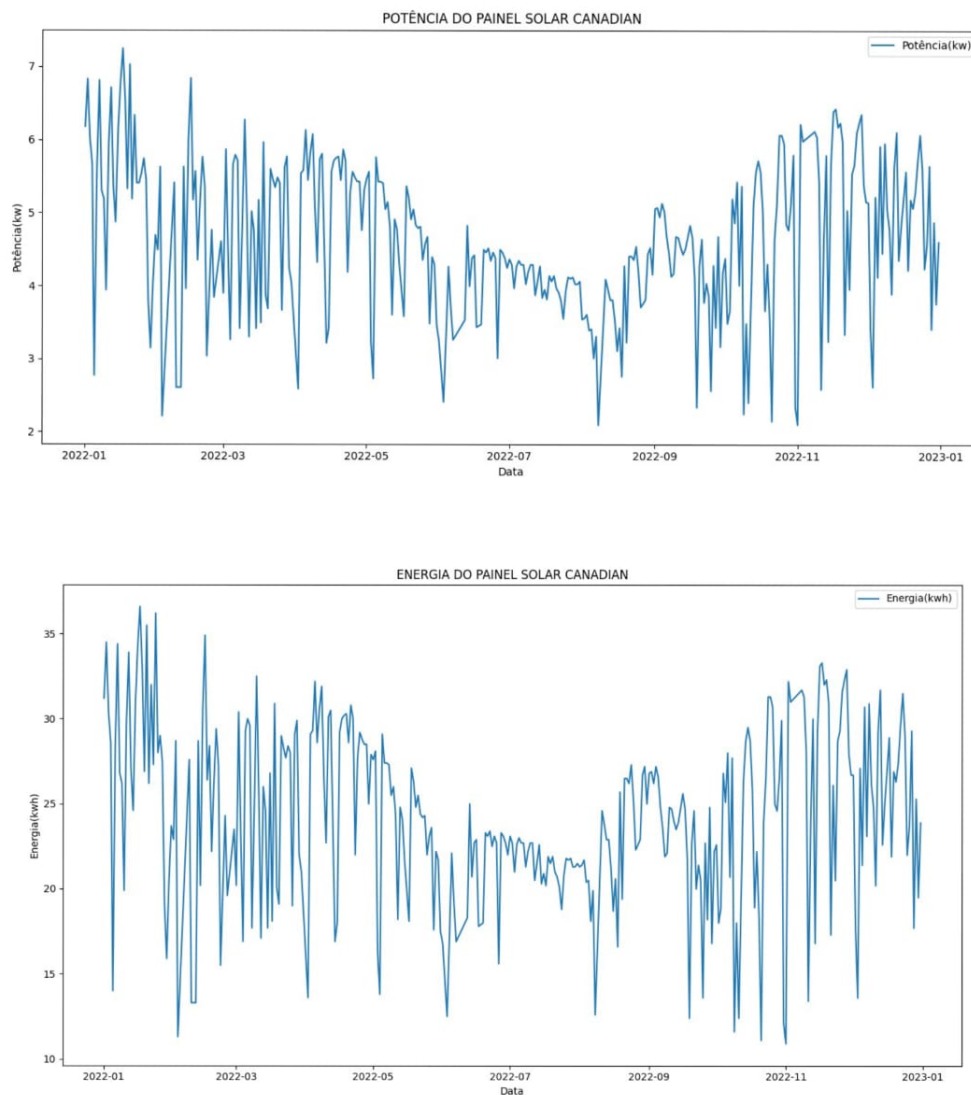


Figura 4.10: Potência elétrica e energia gerada pelo Sistema Fotovoltaico Residencial durante o ano de 2022.

Ao aplicar o teste de normalidade (Tabela 4.5), obteve-se um valor-p de 0.05 e 0.21 para potência elétrica e energia, respectivamente. O que indica que ambas as amostras possuem uma distribuição normal.

Tabela 4.5: Resultado do Teste de normalidade de Shapiro-Wilk com dados do Sistema Fotovoltaico Residencial.

Variáveis	Valor-p
Potência elétrica	0.05
Energia	0.21
AOD	2.10^{-16}

Já a AOD obteve um valor igual a 2.10^{-16} o que indica que a amostra de profundidade óptica não possui uma distribuição normal, logo, não atende aos requisitos de aplicação de um teste paramétrico. Dessa forma optou-se pela aplicação do teste de Spearman para a verificação da correlação entre as variáveis.

Tabela 4.6: Resultado do Teste correlação de Spearman com dados do Sistema Fotovoltaico Residencial.

Variáveis	ρ	Valor-p
Potência e AOD	-0.13	0.03
Energia e AOD	-0.10	0.15

O teste de correlação de Spearman, apresentou um valor de ρ igual a -0.13 para a correlação entre potência e AOD e -0.10 para a correlação entre energia e AOD. O sinal negativo indica que existe uma correlação negativa entre as variáveis, ou seja, elas são inversamente proporcionais. Entretanto, o valor igual a 0.13 e 0.10 representam uma correlação fraca segundo a classificação de Cohen (1992).

O nível de significância das variáveis é representado pelo valor-p, no caso da correlação entre Potência e AOD a correlação pode ser interpretada como estatisticamente significativa, pois apresenta um valor-p $< \alpha$ ou seja, (*valor-p* < 0.05). No caso da correlação de Energia e AOD o valor-p não pode ser considerado estatisticamente significativo.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao caracterizar os aerossóis atmosféricos, identificou-se que os valores de AOD aumentam a medida que o comprimento de onda diminui. Esse resultado indica um aumento na concentração de aerossóis de moda fina, que em sua grande maioria são proveniente de queima de biomassa. Pode-se observar também um aumento considerável nos níveis de AOD durante o período da seca, principalmente nos meses de agosto, setembro e outubro.

Através da instalação do módulo fotovoltaico obteve-se medidas de corrente elétrica, potência e tensão. Onde foi possível observar que as variações de corrente e potência são muito similares.

Os resultados dados de AOD, potência e corrente elétrica foram utilizados para uma análise de correlação. A fim de verificar se as variáveis AOD e corrente apresentam algum tipo de relação. No caso do módulo fotovoltaico instalado na UFMT, os resultados indicam correlação entre as variáveis AOD x potência e AOD x corrente elétrica, entretanto apresentam um valor positivo, o que indica que as variáveis são diretamente proporcionais, ao contrário do que se esperava, ao considerarmos que os aerossóis diminuem a incidência de radiação solar. É possível que este resultado se dê em decorrência da pequena quantidade de amostras disponíveis do AERONET durante o período de funcionamento do módulo solar.

Já no caso do Sistema Fotovoltaico Residencial encontrou-se uma fraca correlação entre as variáveis Potência elétrica x AOD e Energia gerada x AOD, dessa vez o sinal negativo foi encontrado, indicando que apesar de pequena, existe uma relação inversa entre elas. É importante salientar que no caso do Sistema Fotovoltaico Residencial não teve suas condições de limpeza e funcionamento monitoradas durante a pesquisa, diferente do Módulo Fotovoltaico localizado na UFMT.

Vale salientar que a aplicação do teste de correlação demonstra apenas o comportamento de duas amostras, sem indicar qualquer relação de causa e efeito entre elas.

Diante disso, conclui-se que ainda são necessárias mais investigações acerca da influência das partículas atmosféricas na redução da produção de energia solar fotovoltaica. Em trabalhos futuros pretende-se realizar a aplicação de modelos de transferência radi-

ativa e cálculo do fator espectral, assim como tem sido feito em alguns outros trabalhos como o de Bet et al. (2022) e Hoyo et al. (2020).

REFERÊNCIAS

- ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 28, p. 859–870, 2005.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. *Atmosfera, tempo e clima*. [S.l.]: Bookman Editora, 2009.
- BET, L. G.; ROSARIO, N. M. É. do; MARTINS, F. R.; ZILLES, R. Estudo sobre o impacto dos aerossóis atmosféricos no fator espectral de módulos fotovoltaicos em são paulo. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–10.
- CALINOIU, D.; PAULESCU, M.; IONEL, I.; STEFU, N.; POP, N.; BOATA, R.; PACURAR, A.; GRAVILA, P.; PAULESCU, E.; TRIF-TORDAI, G. Influence of aerosols pollution on the amount of collectable solar energy. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 70, p. 76–82, 2013.
- CARVALHO, P. S. L. d.; MESQUITA, P. P. D.; ROCIO, M. A. R. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2014.
- COHEN, J. Statistical power analysis. *Current directions in psychological science*, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 1, n. 3, p. 98–101, 1992.
- COSTA, A. A.; JUNIOR, T. M. P.; SOUZA, E. P. d.; MARTINS, J. A.; YAMASOE, M. A.; ANDRADE, M. d. F.; BARBOSA, H. d. M. J. Aerossóis atmosféricos e nuvens. *Base científica das mudanças climáticas: v. 1-primeiro relatório de avaliação nacional*, 2014.
- DRAME, M.; BILAL, B. O.; CAMARA, M.; SAMBOU, V.; GAYE, A. Impacts of aerosols on available solar energy at mbour, senegal. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, American Institute of Physics, v. 4, n. 1, p. 013105, 2012.
- DUARTE, R. N. C. et al. Um modelo para a transmissão de doenças em interiores via aerossóis respiratórios. Florianópolis, SC, 2003.
- FAUZI, I.; WIDODO, N. S. et al. Monitoring power usage on humanoid robot wirelessly using the ina219 sensor. *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, v. 3, n. 1, p. 82–92, 2021.
- FERREIRA, J. P. J. A energia solar e o conceito de horas de sol pleno. 2020.
- FILHO, V. S. d. A.; ARTAXO, P.; HACON, S.; CARMO, C. N. d.; CIRINO, G. Aerossóis de queimadas e doenças respiratórias em crianças, manaus, brasil. *Revista de Saúde Pública*, SciELO Brasil, v. 47, p. 239–247, 2013.

- FRANCO, M. A. d. M.; NETTO, P. E. A. Transporte vertical, processos de crescimento e caracterização de aerossóis na amazônia. 2021.
- GOETZBERGER, A.; HEBLING, C.; SCHOCK, H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials science and engineering: R: Reports*, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 1–46, 2003.
- GÜNEY, T. Solar energy, governance and co2 emissions. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 184, p. 791–798, 2022.
- HANUSZ, Z.; TARASINSKA, J.; ZIELINSKI, W. Shapiro–wilk test with known mean. *REVSTAT-Statistical Journal*, v. 14, n. 1, p. 89–100, 2016.
- HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; SLUTSKER, I. a.; TANRE, D.; BUIS, J.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y.; NAKAJIMA, T. et al. Aeronet—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, Elsevier, v. 66, n. 1, p. 1–16, 1998.
- HOYO, M. D.; RONDANELLI, R.; ESCOBAR, R. Significant decrease of photovoltaic power production by aerosols. the case of santiago de chile. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 148, p. 1137–1149, 2020.
- INPE. *Programa Queimadas-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*. 2022. Disponível em <https://queimadas.dgi.inpe.br>.
- KABIR, E.; KUMAR, P.; KUMAR, S.; ADELODUN, A. A.; KIM, K.-H. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 82, 2018.
- KAZEM, H. A.; CHAICHAN, M. T.; AL-WAELI, A. H.; SOPIAN, K. A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 276, p. 123187, 2020.
- KHALIL, S. A.; SHAFFIE, A. Attenuation of the solar energy by aerosol particles: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 54, p. 363–375, 2016.
- KOMP, R. J. *Practical photovoltaics: electricity from solar cells*. [S.l.]: aatec publications Ann Arbor, MI, 1995.
- LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C.; SANTO, O. C. do E.; SACRAMENTO, T. C. B.; BRAZ, K. T. M. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. *Engenharias On-line*, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2015.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. d.; RÜTHER, R.; ABREU, S. d. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. d. Atlas brasileiro de energia solar 2. Inpe, 2017.
- MCMURRY, P. H. A review of atmospheric aerosol measurements. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 34, n. 12-14, p. 1959–1999, 2000.
- MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. [S.l.]: Academic Press, 2013.

NOVAIS, J. W. Z.; SANTANNA, F. B.; ARRUDA, P. H. Z. de; PEREIRA, O. A.; DUTRA, R. Relação entre profundidade óptica de aerossóis e radiação fotossinteticamente ativa e global no cerrado mato-grossense. *Revista Estudo & Debate*, v. 24, n. 1, 2017.

OLIVEIRA, A. M. de; MARIANO, G. L. Identificação de entrada de plumas queimada e principais áreas afetadas na região sul do brasil. *Ciência e Natura*, v. 36, n. 2, p. 241–249, 2014.

OLMEDA, C. T. *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación "El Arenosillo" de la red AERONET*. Tese (Doutorado) — Universidad de Valladolid, 2005.

PALÁCIOS, R. da S.; SALLO, F. da S.; PRADO, M. J. do; MUSIS, C. R. de; NOGUEIRA, J. de S. Análise da profundidade ótica de aerossóis e coeficiente de angstrom no cerrado mato-grossense. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 14, 2014.

PENG, K.-Q.; LEE, S.-T. Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion. *Advanced Materials*, Wiley Online Library, v. 23, n. 2, p. 198–215, 2011.

POKHREL, R. P.; WAGNER, N. L.; LANGRIDGE, J. M.; LACK, D. A.; JAYARATHNE, T.; STONE, E. A.; STOCKWELL, C. E.; YOKELSON, R. J.; MURPHY, S. M. Parameterization of single-scattering albedo (ssa) and absorption ångström exponent (aae) with ec/oc for aerosol emissions from biomass burning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, v. 16, n. 15, p. 9549–9561, 2016.

PRADO, N. V.; COELHO, S. M. S. Estudo da variabilidade temporal da profundidade óptica do aerossol utilizando dados de sensoriamento remoto sobre a região de transição entre a floresta amazônica e o cerrado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 32, p. 649–658, 2017.

RABAIA, M. K. H.; ABDELKAREEM, M. A.; SAYED, E. T.; ELSAID, K.; CHAE, K.-J.; WILBERFORCE, T.; OLABI, A. Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 754, p. 141989, 2021.

SAIDAN, M.; ALBAALI, A. G.; ALASIS, E.; KALDELLIS, J. K. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 92, p. 499–505, 2016.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 74, p. 590–601, 2017.

SANTOS, A. C. A.; FINGER, A.; NOGUEIRA, J. d. S.; CURADO, L. F. A.; PALÁCIOS, R. d. S.; PEREIRA, V. M. R. Análise da concentração e composição de aerossóis de queimadas no pantanal mato-grosso. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 39, p. 919–924, 2016.

SANTOS, F. M. de M. Clima urbano de cuiabá-mt-brasil: ocupação do solo e suas influências. *Revista Monografias Ambientais*, p. 2749–2763, 2013.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. From air pollution to climate change. *Atmospheric chemistry and physics*, John Wiley & Sons New York, v. 1326, 2006.

- SEVERINO, M.; OLIVEIRA, M. F. Tecnologias de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas. *Energia, Economia, Rotas Tecnológicas: textos selecionados, Palmas, ano*, v. 1, p. 265–322, 2010.
- SILVA, H. M. F. da; ARAÚJO, F. J. C. Energia solar fotovoltaica no brasil: Uma revisão bibliográfica. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022.
- SILVESTRE, A. *Análise de dados e estatística descritiva*. [S.l.]: Escolar editora, 2007.
- SOUZA, R. D. Os sistemas de energia solar fotovoltaica: livro digital de introdução aos sistemas solares. *BlueSol Energia Solar*, 2016.
- TOLEDANO, C.; CACHORRO, V.; BERJON, A.; FRUTOS, A. D.; SORRIBAS, M.; MORENA, B. De la; GOLOUB, P. Aerosol optical depth and ångström exponent climatology at el arenosillo aeronet site (huelva, spain). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, Wiley Online Library, v. 133, n. 624, p. 795–807, 2007.
- TORSONI, G. B.; MIRANDA, J. K.; APARECIDO, L. O. Influência da direção de placa solar na geração de energia. *Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)*, v. 3, n. 1, 2019.
- TYAGI, V.; RAHIM, N. A.; RAHIM, N.; JEYRAJ, A.; SELVARAJ, L. Progress in solar pv technology: Research and achievement. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 20, p. 443–461, 2013.
- VAREJÃO, S. M. A. *Meteorologia e climatologia: versão digital 2*. [S.l.: s.n.], 2006.
- XIAO, Z.-m.; ZHANG, Y.-f.; HONG, S.-m.; BI, X.-h.; JIAO, L.; FENG, Y.-c.; WANG, Y.-q. et al. Estimation of the main factors influencing haze, based on a long-term monitoring campaign in hangzhou, china. *Aerosol and Air Quality Research*, Taiwan Association for Aerosol Research, v. 11, n. 7, p. 873–882, 2011.

Apêndice A -

Apêndice B -