

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CARLA SILVA DAGOSTIN

**ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR PARA
CONVERSÃO FOTOVOLTAICA EM PORTO ALEGRE**

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2021

CARLA SILVA DAGOSTIN

**ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR PARA
CONVERSÃO FOTOVOLTAICA EM PORTO ALEGRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Porto Alegre
Março de 2021

CARLA SILVA DAGOSTIN

**ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR
PARA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA EM PORTO ALEGRE**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Coordenador do PPGE3M:-Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca examinadora:

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (UFSC)

Prof. Dr. João Batista Dias (UNISINOS)

Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me permitir seguir com esse trabalho em meio a tantas adversidades, em um momento crítico de pandemia em que todos estamos enfrentando. Aos meus familiares, principalmente ao meu filho Felipe Dagostin de Araújo que apesar dos seus cinco anos de idade, soube compreender os momentos de estudo. Ao meu professor Arno Krenzinger por ter muita paciência e dedicação ao longo desse período. A universidade UFRGS pela estrutura, ao LABSOL e sua equipe que me auxiliaram no que foi preciso e por fim ao PPGE3M que sempre prestou suporte necessário durante a realização do mestrado.

RESUMO

Nesta dissertação será abordada a caracterização mensal da distribuição espectral da irradiância solar sobre a região de Porto Alegre/RS, através de dados obtidos através da plataforma Giovanni e pela compilação dos dados de aproximadamente dez anos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e processados pela secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul para o desenvolvimento do Atlas Solar do Rio Grande do Sul. Para alcançar o objetivo foi avaliado o valor efetivo da Massa de Ar (AM) que impacta de forma significativa a distribuição espectral da radiação solar de uma região. O modelo computacional de transferência radiativa na atmosfera SMARTS2 foi utilizado como padrão para gerar os espectros efetivos mensais na região de interesse para dias de céu limpo, visto que o software possui uma melhor confiabilidade nesses períodos, bem como, para o espectro padrão ASTM G-173. A dissertação apresenta uma metodologia para considerar a AM efetiva selecionando as horas com índice de limpidez horária acima de 0,6 e considerando um intervalo de AM que abranja 80% da conversão de energia, e com estas condições buscando o valor médio com ponderação na conversão fotovoltaica. Na comparação dos valores médios anuais, com um AM de 1,5, não houve uma diferença muito significativa na distribuição espectral, apresentando maior irradiância espectral do que o padrão para comprimentos de onda menores que 630 nm. Mesmo ao ser adotado para a região de Porto Alegre o valor médio efetivo de AM de 1,3 esta característica persiste. Além disso, as irradiâncias espectrais mensais também apresentaram uma diferença em relação ao padrão, sendo que, para os meses de inverno a distribuição espectral foi mais próxima àquela adotada pela ASTM. No verão o aumento de irradiância espectral para comprimentos de onda menores do que 630 nm foi bem mais acentuado. Como aplicação imediata dos espectros encontrados foi determinado o impacto destas diferenças espectrais em módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias, tendo-se encontrado que as novas versões dos módulos de telureto de cádmio são mais beneficiadas com a distribuição espectral de Porto Alegre, principalmente nos meses de verão.

Palavras-chave: Irradiação solar, energia solar fotovoltaica, distribuição espectral da radiação solar.

ABSTRACT

In this dissertation, the monthly characterization of the spectral distribution of the solar irradiance over the region of Porto Alegre / RS will be addressed, through data obtained through the Giovanni platform and by the compilation of the data of approximately ten years provided by the National Institute of Meteorology (INMET) and processed by the Secretary of Mines and Energy of Rio Grande do Sul for the development of the Solar Atlas of Rio Grande do Sul. To achieve the objective, the effective value of the Mass of Air (AM) was evaluated, which significantly impacts the spectral distribution of solar radiation of a region. The computational model of radioactive transfer in the SMARTS2 atmosphere was used as a standard to generate the effective monthly spectra in the region of interest for clear days, since the software has a better reliability in these periods, as well as, for the standard spectrum ASTM G- 173. The dissertation presents a methodology to consider AM effective by selecting the hours with hourly cleanness index above 0.6 and considering an AM interval that covers 80% of the energy conversion, and with these conditions seeking the average value with weighting in the photovoltaic conversion. When comparing the annual mean values, with an AM of 1.5, there was not a very significant difference in the spectral distribution, showing greater spectral irradiance than the standard for wavelengths less than 630 nm. Even when the effective average AM value of 1.3 was adopted for the Porto Alegre region, this characteristic persists. In addition, the monthly spectral irradiance also showed a difference in relation to the standard, being that, for the winter months, the spectral distribution was closer to that adopted by ASTM. In the summer, the increase in spectral irradiance for wavelengths less than 630 nm was much more pronounced. As an immediate application of the found spectra, the impact of these spectral differences on photovoltaic modules of different technologies was determined, and it was found that the new versions of cadmium telluride modules are most benefited by the spectral distribution of Porto Alegre, especially in the summer months.

Keywords: Solar irradiation, photovoltaic energy, spectral distribution of solar radiation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Capacidade Fotovoltaica Mundial Instalada em (MW)	12
Figura 2 Potência instalada no Brasil.....	13
Figura 3 A matriz elétrica brasileira.	13
Figura 4 Estrutura solar.....	16
Figura 5 Espectro Solar e do Corpo Negro.	17
Figura 6 Órbita da Terra em torno do Sol indicando as estações do ano.....	18
Figura 7 Componentes da radiação solar.	20
Figura 8 A influência da profundidade óptica de aerossóis (550nm) no espectro.	21
Figura 9 Exemplo da influência do vapor de água no espectro.....	22
Figura 10 Exemplo da influência do Ozônio no espectro.	23
Figura 11 Relação do ângulo zenital com a massa de ar	25
Figura 12 Exemplo da influência da massa de ar no espectro.....	25
Figura 13 Estruturas de bandas dos materiais isolantes, semicondutores e condutores.	26
Figura 14 Estrutura típica de uma célula solar e seu princípio de funcionamento.	27
Figura 15 Divisão das Tecnologias Fotovoltaicas	29
Figura 16 Percentual Global de produção anual de energia fotovoltaica.....	29
Figura 17 Percentual Global da produção de Filmes finos	30
Figura 18 Produção Global para módulos de filmes finos	30
Figura 19 Eficiência Quântica externa para a First Solar Series 3, 4, e para 4V2, 4V3 e posterior.....	33
Figura 20 Curva I x V de uma célula solar fotovoltaica aonde são indicados os	36
Figura 21 Resposta Espectral de diferentes tecnologias de células.	39
Figura 22 Curvas I (mA) x V (mV) de células solares de Silício para diferentes intensidades de radiação.....	39

Figura 23 Curvas I x V de células solares de Silício para diferentes intensidades de radiação.	40
Figura 24 Piranômetro MS-80.....	44
Figura 25 Espectrorradiômetro EPP-2000	44
Figura 26 Comparativo entre software SMARTS2 x EPP 2000, no horário das 10h00min para o dia 21/02/2020	45
Figura 27 Comparativo entre o espectro padrão e de Porto Alegre para valores característicos, com AM igual a 1,5	54
Figura 28 Comparativo entre o espectro padrão com AM de 1,5 e de Porto Alegre com massa média AM 1,3.....	54
Figura 29 Resultado para o mês de janeiro com AM médio de 1,13, comparado com a norma ASTM G-173.....	56
Figura 30 Resultado para o mês de fevereiro com AM médio de 1,18, comparado com a norma ASTM G-173.....	56
Figura 31 Resultado para o mês de março com AM médio de 1,26 comparado com a norma ASTM G-173.....	57
Figura 32 Resultado para o mês de abril com AM médio de 1,43, comparado com a norma ASTM G-173.....	57
Figura 33 Resultado para maio com AM médio de 1,63, comparado com a ASTM G-173....	58
Figura 34 Resultado para o mês de junho com AM médio de 1,82, comparado com a norma ASTM G-173.....	58
Figura 35 Resultado para julho com AM médio de 1,73, comparado com a ASTM G-173. ..	59
Figura 36 Resultado para o mês de agosto com AM médio de 1,49, comparado com a norma ASTM G-173.....	59
Figura 37 Resultado para o mês de setembro com AM médio de 1,31, comparado com a norma ASTM G-173.....	60
Figura 38 Resultado para o mês de outubro com AM médio de 1,20, comparado com a norma ASTM G-173.....	60

Figura 39 Resultado para o mês de novembro com AM médio de 1,14, comparado com a norma ASTM G-173.....	61
Figura 40 Resultado para o mês de dezembro com AM médio de 1,12, comparado com a norma ASTM G-173.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Dados fornecidos pelo site Nasa para entrada do SMARTS2.....	43
Tabela 2 Dados atmosféricos utilizados para gerar o espectro padrão ASTM G-173.....	46
Tabela 3 Dados atmosféricos para PORTO ALEGRE	47
Tabela 4 Informações (em base horária) disponibilizadas nas planilhas organizadas para cada uma das 33 estações meteorológicas automáticas selecionadas do RGS.....	47
Tabela 5 Energia percentual produzida E_{inj} para as faixas de kt (%)......	48
Tabela 6 Soma dos Índices de energia gerada em todas as horas em que $kt > 0,6$ para diferentes faixas de massa de ar. (W_h/W_p)	49
Tabela 7 Dados de energia percentual apresentados como fração do total mensal (%).	49
Tabela 8 Dados de AM selecionados para cada mês	50
Tabela 9 Módulos fotovoltaicos utilizados na dissertação.....	51
Tabela 10 Valores médios para as componentes e os desvios padrão (σ), que influenciam na distribuição espectral.....	53
Tabela 11 Valores de Fe mensal para módulos de simples junção.....	62
Tabela 12 Valores de Fe mensal para módulos de multijunção	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	ESPECTRO SOLAR.....	16
2.2	COMPONENTES DA ATMOSFERA TERRESTRE	19
2.2.1	Aerossóis	20
2.2.2	Água Precipitável.....	22
2.2.3	Ozônio	22
2.2.4	Dióxido de Carbono (CO₂)	23
2.2.5	Massa de Ar (AM).....	23
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	26
2.4	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS.....	28
2.4.1	Células de Silício Monocristalino	31
2.4.2	Células de Silício Policristalino	31
2.4.3	Células de Filmes Finos	32
2.4.4	Terceira Geração	34
2.5	CARACTERIZAÇÃO DOS MÓDULOS.....	36
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	O <i>SOFTWARE</i> SMARTS2	42
3.2	AQUISIÇÃO DE DADOS E VALIDAÇÃO.....	43
3.3	COMPILAÇÃO DOS DADOS.....	45
4	RESULTADOS	53
5	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

O crescimento mundial da população juntamente com o aumento do uso da eletricidade faz com que seja necessário ampliar a produção desta forma de energia. No Brasil a matriz elétrica é amplamente dominada pelo uso da hidroeletricidade, mas existe a necessidade de diversificar as fontes primárias de energia. Levando em consideração essas e outras questões, fez-se necessário a expansão da matriz elétrica brasileira na qual foi introduzida a energia solar fotovoltaica que representa uma tecnologia segura, limpa, robusta, eficiente, confiável e competitiva economicamente. A energia fotovoltaica consiste na conversão da energia emitida pelo Sol, diretamente em energia elétrica. Devido as vantagens encontradas no sistema fotovoltaico o seu uso está crescendo em todo o mundo, conforme pode-se observar por meio da figura 1.

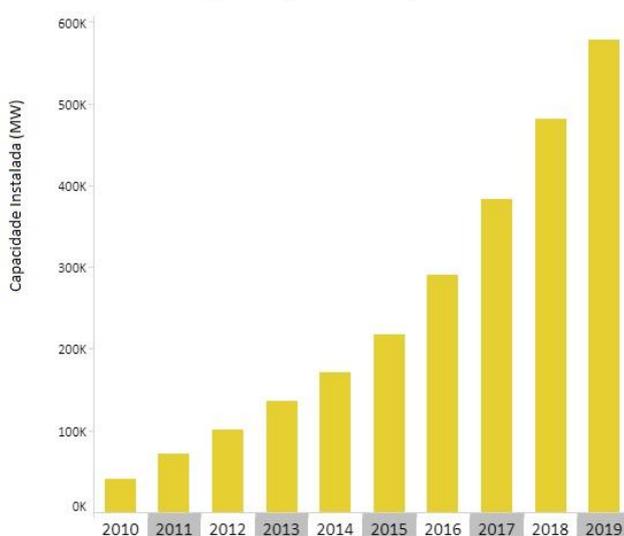


Figura 1 Capacidade Fotovoltaica Mundial Instalada em (MW)

Fonte: Adaptado de Irena, 2020

No Brasil, apesar da proporção muito mais modesta do que em países que lideram a capacidade instalada, houve um alto crescimento da implantação dessa energia, tanto em geração distribuída como centralizada, principalmente a partir de 2017, conforme mostra a figura 2. Pode-se notar por meio da figura 3 que a energia solar fotovoltaica representa 1,6 % da matriz elétrica atual do país

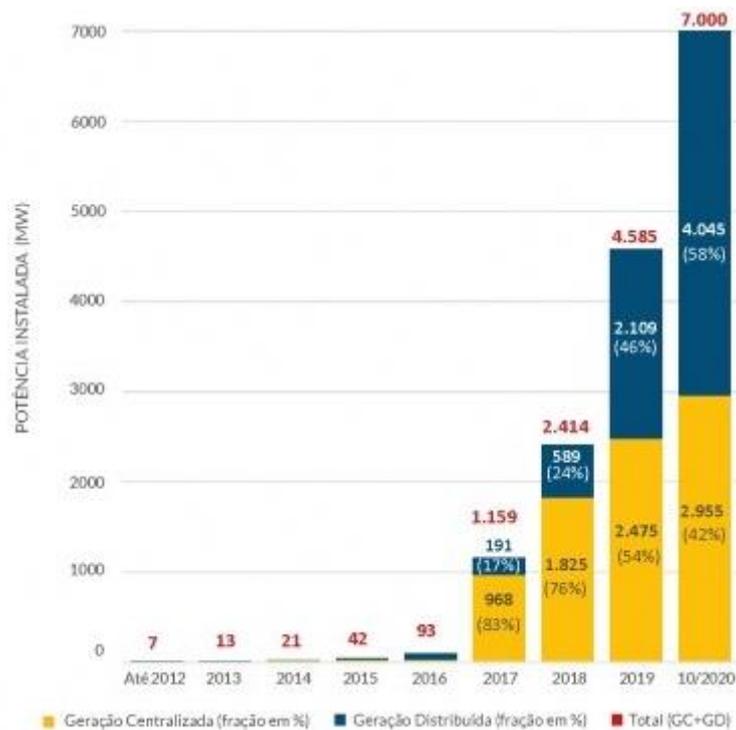


Figura 2 Potência instalada no Brasil.

Fonte: ANEEL / ABSOLAR, 2020.

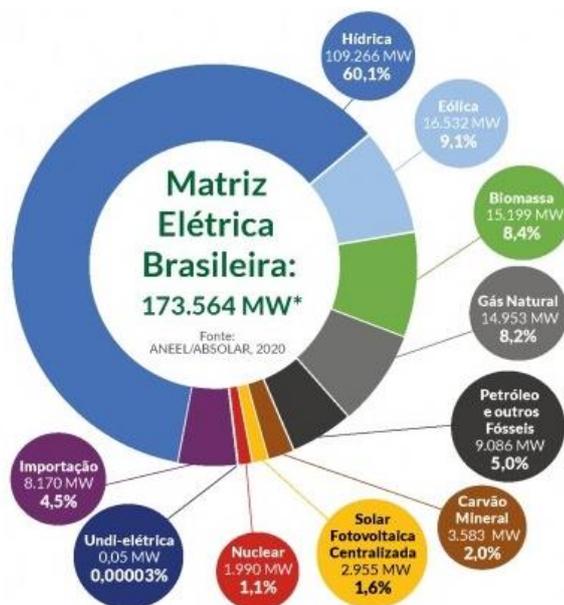


Figura 3 A matriz elétrica brasileira.

Fonte: ANEEL / ABSOLAR, 2020

A energia solar fotovoltaica agrega inúmeros benefícios para o Brasil, dentre eles: geração de empregos e renda, redução de impactos ambientais na geração, perdas na rede de distribuição e alívio do sistema em horários de pico, como nos meses de verão. Muitos estudos vêm sendo realizados no intuito de aproveitar ao máximo os recursos energéticos fornecidos pelo Sol e com base neste contexto que os trabalhos focados em determinar o espectro efetivo em uma determinada região são importantes. As condições climáticas e geográficas regionais influenciam no espectro da radiação solar, modificando significativamente a capacidade de conversão dos módulos solares (IEC 60904-3, 2008).

Atualmente, no mercado existem diferentes tecnologias para a conversão da energia solar em elétrica, as mais comumente utilizadas na fabricação de células para módulos fotovoltaicos são as de silício monocristalino (c-Si) e de silício policristalino ou multicristalino (mc-Si). Outras tecnologias envolvem filmes finos de silício amorfo (a-Si), filmes finos de silício microcristalino (μ c-Si), filmes finos de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS), já tiveram certa penetração há poucos anos atrás, mas estão em caminho de desaparecimento devido à predominância e maior competitividade comercial que os módulos de silício cristalino alcançaram. A tecnologia de telureto de cádmio (CdTe) é a única tecnologia de filmes finos que segue demonstrando competitividade com os módulos c-Si e mc-Si. Ainda estão em desenvolvimento células híbridas e de material orgânico, também conhecidos como “Módulos Fotovoltaicos Orgânicos” (OPVs).

Cada uma dessas tecnologias apresenta uma curva característica de produção de energia, que dependem da temperatura e da irradiância recebida pelo mesmo. Contudo, a radiação varia conforme as condições climáticas e geográficas do local e segundo Gasparin, et al.(2012), ocorre uma mudança na distribuição espectral ao longo do dia, o que pode ocasionar uma mudança da corrente de curto-circuito (I_{sc}) gerada pelo módulo fotovoltaico, como consequência da sua resposta espectral.

Para fins de normatização e comparação, entre diferentes módulos fotovoltaicos, foi criada uma distribuição espectral padrão, baseada em condições atmosféricas e de latitude compatíveis com valores típicos aplicáveis para certas regiões nos Estados Unidos da América. O assim chamado “espectro padrão” da norma ASTM G-173 (2012) é utilizado internacionalmente para apresentação da eficiência dos módulos comerciais, e os métodos de dimensionamento em geral não contemplam diferenças entre a distribuição espectral da radiação solar local e a distribuição espectral apresentada na norma. Deste fato surge a

motivação para investigar qual é o impacto das diferentes distribuições espectrais de um determinado local na produção de eletricidade. Adicionalmente o conhecimento do impacto da efetiva distribuição espectral em uma localidade auxilia na avaliação dos erros que podem ocorrer com o uso da radiação solar natural para avaliar as características de módulos fotovoltaicos.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar a variação da distribuição espectral da irradiância solar em Porto Alegre para todos os meses do ano, e estabelecer uma distribuição espectral que possa ser considerada como efetiva para cada mês, tecendo uma comparação quantitativa com o espectro padrão internacional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estabelecer uma metodologia para determinar a massa de ar efetiva considerando os momentos de maior produção de eletricidade por instalações fotovoltaicas.
- Analisar mês a mês a diferença entre os espectros efetivos e o espectro padrão.
- Avaliar o impacto da utilização de diferentes tecnologias de módulos nas condições de Porto Alegre.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESPECTRO SOLAR

Constituído basicamente por hidrogênio, o Sol possui um diâmetro de $13,9 \times 10^5$ km e está a aproximadamente $1,5 \times 10^8$ km da Terra, possui várias regiões em sua composição como o núcleo, zona convectiva entre outras conforme demonstrado na figura 4.

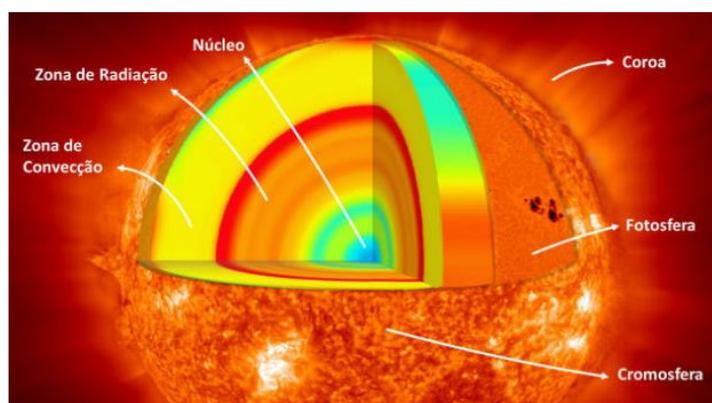


Figura 4 Estrutura solar.

Fonte: Toda Matéria (2020).

O Sol pode ser considerado uma fonte inesgotável de energia. Contudo, o aproveitamento dessa energia requer um entendimento sobre as variações da posição solar que ocorrem ao longo do ano. Além das variações provocadas pelo movimento de translação e rotação da Terra, a radiação solar que atinge a superfície terrestre, pode ser alterada de formas distintas, uma vez que, os raios solares interagem com os gases presentes na atmosfera. Além disso, a radiação solar pode ser modificada ao passar pelas nuvens, pelo vapor da água e a vegetação. Normalmente, a radiação é dividida em três partes (Duffie e Beckmann, 2013):

- **Radiação direta:** Recebida do sol e sem espalhamento provocado pela atmosfera;
- **Radiação difusa:** Recebida do sol após o espalhamento provocado pela atmosfera;
- **Radiação refletida** Radiação refletida pela superfície terrestre e/ou por objetos na superfície;

A soma destas três componentes é chamada de **radiação global**. Além disto, conforme designa se fluxo de potência ou energia se utilizam as denominações:

- **Irradiação:** É radiação em um dado intervalo de tempo específico, em horas ou em dias. Geralmente é apresentada em J/m^2 ou Wh/m^2 .
- **Irradiância:** É a taxa, na qual, a energia radiante incide sobre uma superfície por unidade de tempo e de área. Normalmente é representada pela letra G e a unidade é W/m^2 .

Na figura 5 pode-se observar o espectro de radiação solar no topo da atmosfera terrestre e no nível do mar. O Sol possui distribuição espectral semelhante à de um corpo negro na temperatura de 5778 K.. Conforme a radiação passa pela atmosfera, parte é absorvida por gases com bandas de absorção específicas e a radiação adicional é redistribuída pelo espalhamento de Raleigh, que é responsável pela cor azul da atmosfera.

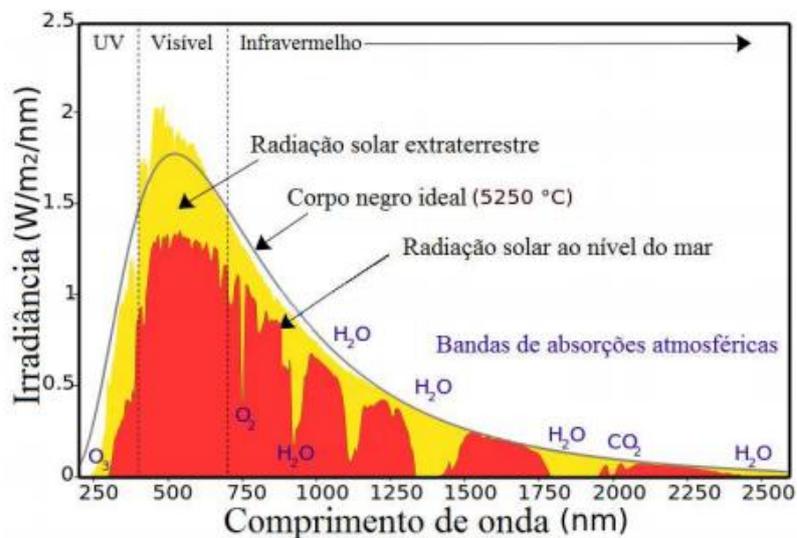


Figura 5 Espectro Solar e do Corpo Negro.

Fonte: Santos, F. H.; e t al. (2015).

A radiação extraterrestre tem sido monitorada por muito tempo e com isso obteve-se um valor médio $1367 W/m^2$, valor recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) em 1981, chamado de constante solar. A constante solar é a irradiância solar recebida em uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação, que esteja localizada à distância média entre Terra e Sol e fora da atmosfera (Duffie e Beckmann,

2013). A Irradiância Solar Extraterrestre Total (TSI) é obtida através da integral do espectro solar extraterrestre ao longo de todos os comprimentos de onda. A variação da TSI está relacionada à quantidade de manchas solares que aparecem na Fotosfera do Sol. Essa quantidade é variável e passa por períodos de máximos onde o número de manchas é grande, e mínimos, nos quais a ocorrência é baixa. A variação periódica na quantidade de manchas é conhecida como Ciclo das Manchas Solares (LIOU, 2002; HATHAWAY, 2010)

A trajetória elíptica na qual a Terra gira em torno do Sol (figura 6) com um ângulo de aproximadamente $23,45^\circ$ associada ao movimento de translação da Terra altera a quantidade de energia recebida do Sol em cada um dos hemisférios ao longo do ano. Essa diferença determina as estações do ano: primavera, verão, outono e inverno (PINHO; GALDINO, 2014).

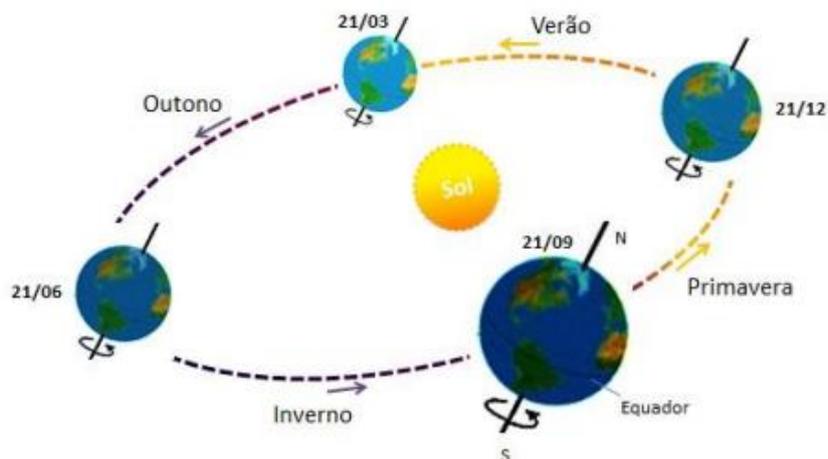


Figura 6 Órbita da Terra em torno do Sol indicando as estações do ano

Fonte: Pinho e Galdino (2014)

O ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano da órbita da Terra em torno do Sol é denominado declinação solar e pode ser calculado a partir da equação (1) Duffie e Beckman (2013)

$$\delta = \frac{180}{\pi} (0,006918 - 0,399912 \cos(B) + 0,070257 \sin(B) - 0,006758 \cos(2B) + 0,000907 \sin(2B) - 0,002697 \cos(3B) + 0,00148 \sin(3B)) \quad (1)$$

sendo B igual a,

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2)$$

onde, n é o dia juliano que varia de 1 a 365 dias, haja visto que anos bissextos não são contados.

Além das influências de localização, ainda existem as componentes da atmosfera terrestre como aerossóis, massa de ar, entre outros, que serão abordados a seguir.

2.2 COMPONENTES DA ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre é constituída por gases atmosféricos e aerossóis (particulados). A fração seca da atmosfera (sem vapor d'água) é formada por 78% de Nitrogênio (N₂), 21% de Oxigênio (O₂), 1% de Argônio (Ar) e outros gases. Os demais constituintes gasosos da atmosfera são os chamados gases-traço (CO₂, O₃, entre outros), que apesar de sua baixa concentração possuem papel importante nos processos radiativos (Wallace e Hobbs, 2006).

A radiação atmosférica é resultado da troca de energia dada pelo vapor de água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ozônio, metano (CH₄), entre outros na região do infravermelho. Esses gases representam 1% do volume da atmosfera e sem a sua absorção e emissão, a média da temperatura terrestre diminuiria aproximadamente 40°C. (MARKOSKI, 2015). Ainda, o mecanismo pelo qual o sistema Terra-Atmosfera interage e atenua a intensidade da radiação solar ao longo de um percurso até incidir na superfície terrestre é conhecido como transferência radiante (Pereira et al.2017).

A figura 7 representa a radiação solar e suas componentes. A radiação difusa, que provém de todas as direções em função das atenuações sofridas pelas condições atmosféricas existentes, apesar de parecer negativo do ponto de vista de aproveitamento energético, mostra-se extremamente essencial para proteção térmica da vida na Terra. Dentre todas as suas componentes as mais relevantes para a análise da distribuição espectral e que são levadas em consideração nas simulações pelo SMARTS2 são,

Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD), ozônio, dióxido de carbono (CO_2), água precipitável e serão abordadas resumidamente a seguir.



Figura 7 Componentes da radiação solar.

Fonte: Cassares (2017)

2.2.1 Aerossóis

Aerossóis nada mais são do que partículas sólidas, como a fumaça e a poeira, ou líquidas, (nuvens, neblina,), que estão suspensas em um meio gasoso. Originam-se através de processos naturais ou artificiais (emissões antropogênicas), resultantes da ação humana o que vem aumentando com o passar dos anos e causando impactos ambientais.

Os aerossóis variam muito de tamanho e segundo Haag e Krenzinger (2010), a determinação exata dos aerossóis é importante para determinar a distribuição espectral utilizando modelos paramétricos.

Partículas de aerossol têm uma influência significativa na distribuição espectral da radiação solar por meio de interações diretas, operando como dispersores ou absorvedores de radiação solar. À medida que a quantidade de aerossóis aumenta, há uma diminuição na intensidade da radiação, especialmente para comprimentos de onda menores (NEVES, 2016).

Por exemplo, durante a fase de queima nas regiões norte e centro-oeste do Brasil, há uma redução significativa da radiação solar direta e, ao mesmo tempo, um aumento na

quantidade de radiação difusa, principalmente na região visível e ultravioleta do espectro (HAAG,2012).

O sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA fornece informações diárias sobre aerossóis, desde sua concentração até o tamanho médio das partículas. Os mapas de mesoescala das concentrações e características de aerossóis foram processados a partir da análise obtida pelo sensor MODIS de dados qualificados em nível 3 (MOD08) que representam médias estatísticas(espacialmente em $1 \times 1^\circ$ e no tempo em 1 dia, 8 dias ou mensais) das propriedades obtidas no Nível 2, para todo o globo (King et al., 2003). Estes dados possuem um algoritmo de verificação e detecção de contaminação devido a existência de nuvens. O instrumento MODIS foi lançado a bordo do satélite TERRA em dezembro de 1999 (King et al., 2003) e em 2002, o mesmo sensor foi lançado a bordo do satélite AQUA (Parkinson, 2003) demonstrando que os dados diários fornecidos pelos sensores MODIS nos satélites TERRA e AQUA representam com grande confiabilidade e abundância as propriedades médias dos aerossóis ao longo do dia.

Essa confiabilidade dada pelos sensores MODIS nas medições da profundidade óptica de aerossóis (AOD), irão garantir resultados realísticos para determinação da Turbidez Atmosférica, parâmetro necessário para configuração do SMARTS2.

A figura 8 mostra um exemplo de como a variação de AOD na atmosfera pode influenciar no espectro solar.

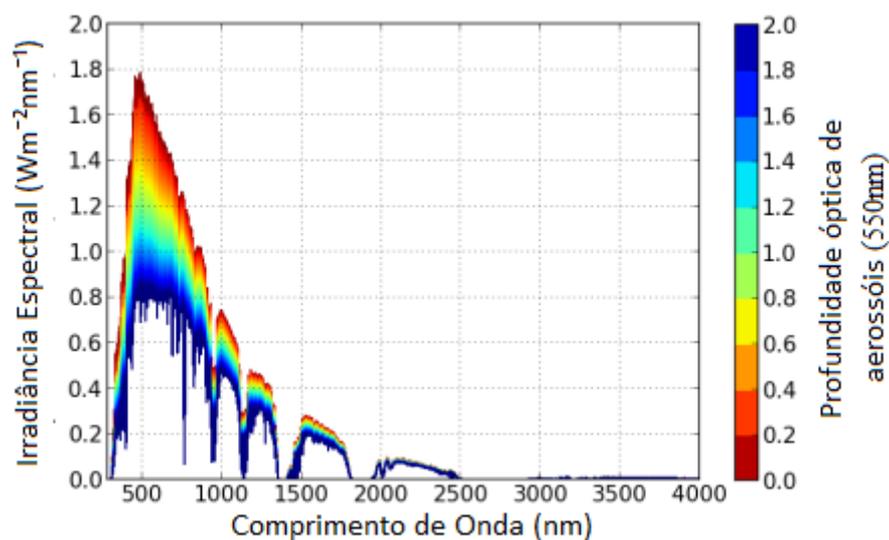


Figura 8 A influência da profundidade óptica de aerossóis (550nm) no espectro.

Fonte: Adaptado de Litens, G. (2013)

2.2.2 Água Precipitável

O vapor d'água é um dos constituintes cuja concentração apresenta grande variabilidade temporal e espacial. Nos trópicos, o vapor de água pode representar mais do que 4% do volume da baixa atmosfera, enquanto que sobre os desertos e regiões polares pode atingir concentrações da ordem de apenas 1%. O vapor d'água também tem grande capacidade de absorver a radiação eletromagnética, tanto na faixa espectral de onda longa (infravermelho) quanto algumas outras faixas do espectro solar (Yamasoe e Correa, 2016). Esse efeito pode ser observado muito bem na figura 9.

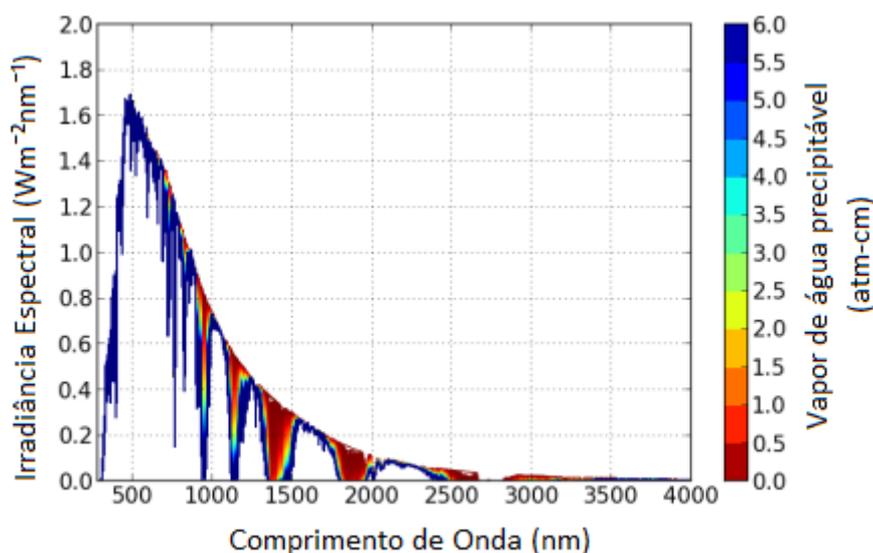


Figura 9 Exemplo da influência do vapor de água no espectro.

Fonte :Adaptado de Litens, G. (2013)

2.2.3 Ozônio

O ozônio concentra-se, entre 10 km e 50 km acima do nível do mar, na região da estratosfera. Sua distribuição pode variar principalmente com a latitude, estação do ano, horário e condições meteorológicas. Apesar de baixa concentração, sua presença é de extrema importância para a manutenção da vida no planeta. A camada de ozônio é resultado de processos que envolvem a absorção da radiação solar ultravioleta e dissociação do oxigênio molecular (O_2) em atômico (O). Ela absorve parte da radiação, na faixa do ultravioleta, evitando que cheguem à superfície. A resposta espectral das células fotovoltaicas é muito baixa para esta faixa de radiação, porém, junto com os efeitos a longo

prazo da temperatura, essa radiação acaba por degradar os módulos fotovoltaicos. A figura 10 é um exemplo de como o ozônio influencia diretamente o espectro.

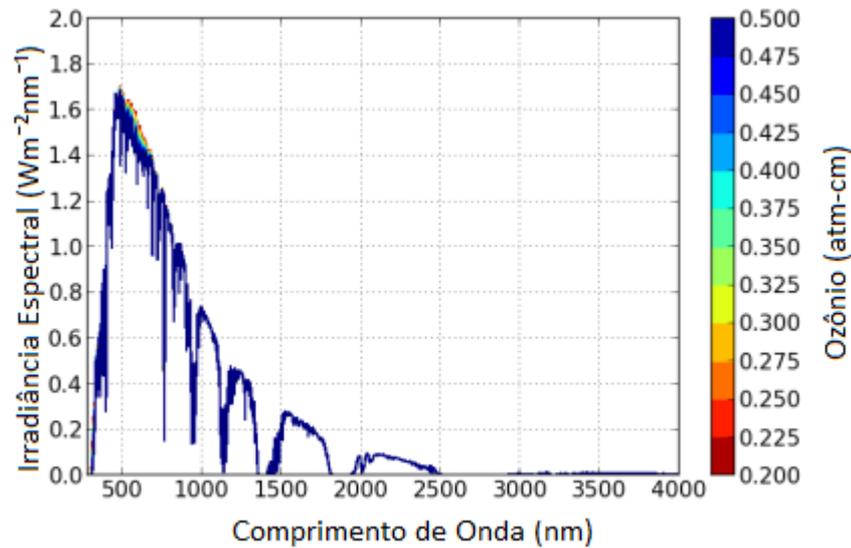


Figura 10 Exemplo da influência do Ozônio no espectro.

Fonte: Adaptado de Litens, G. (2013)

2.2.4 Dióxido de Carbono (CO_2)

O dióxido de carbono (CO_2), embora constitua cerca de 0,03% da atmosfera terrestre, desempenha papel importante por sua contribuição no efeito estufa, responsável pela estabilidade da temperatura média da superfície terrestre. Essa contribuição deve-se à capacidade do dióxido de carbono de absorver radiação infravermelha, mantendo parte da energia do sistema Terra-Atmosfera que seria perdida para o espaço. Entretanto, nas últimas décadas, tem sido observada a intensificação do efeito estufa devido ao crescimento do percentual de dióxido de carbono na atmosfera, causado principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis, pelo desflorestamento, pelas queimadas entre outras atividades que produzem emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2015)

2.2.5 Massa de Ar (AM)

Conforme o posicionamento do sol em relação a terra, pode haver um aumento ou diminuição da massa de ar e conseqüentemente a influência dos parâmetros atmosféricos no espectro. Essa distância também conhecida como massa de ar, varia com a latitude,

hora, dia por estar relacionada com o ângulo zenital conforme figura 11. O valor de AM pode ser obtido através da relação matemática dada pela Equação (3),

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

onde AM é a massa de ar, θ_z o ângulo de incidência do sol em uma superfície horizontal, também denominado de ângulo zenital, que pode ser obtido pela equação (4)

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \varphi \sin \omega \quad (4)$$

onde δ é a declinação solar definida na Equação (1), φ representa a latitude do local, ω é o ângulo horário que representa o deslocamento sol no sentido Leste-Oeste, conforme equação (5).

$$\omega = (hora\ local - 12)15^\circ \quad (5)$$

Pode-se definir também a hora solar que é baseada no movimento angular do Sol, sendo o meio-dia solar a hora na qual o sol atravessa o meridiano do observador. A hora solar é calculada a partir da hora local. O cálculo pode ser feito a partir da equação (6) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$hora\ solar = 4(L_{st} - L_{loc}) + E + hora\ local \quad (6)$$

sendo L_{st} a longitude padrão do fuso-horário, L_{loc} a longitude local e E é a equação do tempo, calculado, em minutos, a partir da equação (7).

$$E = 229,2 * (0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (7)$$

onde B é calculado pela equação (2).

A equação 3 não considera esfericidade do planeta Terra e assume que a atmosfera é totalmente homogênea e não refrativa. Devido a esses pressupostos, o seu erro é de 0,25% quando θ_z vale 60° e aumenta para 10% quando θ_z vale 85° . Deste modo, sua utilização fica restrita a valores mais baixos do ângulo zenital (IQBAL, 1983).

Ao longo do espectro representado na figura 12, ocorre uma redução na intensidade de irradiância conforme a massa de ar aumenta, além de demonstrar que quanto menor o comprimento de onda maior o impacto no espectro. Esse efeito é também conhecido como espalhamento de Rayleigh e ocorre devido à interação da radiação solar com partículas

esféricas que possuem diâmetros menores que $0,2\lambda$ e que espalham independentemente umas das outras (IQBAL, 1983; YAMASOE, 2006).

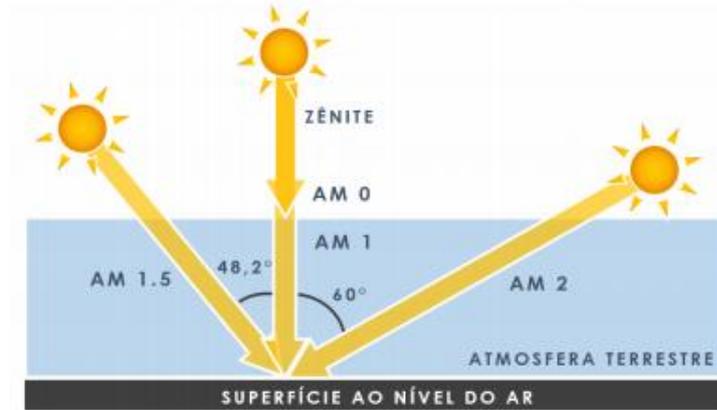


Figura 11 Relação do ângulo zenital com a massa de ar

Fonte: Neves M.G.

A intensidade espalhada da radiação pelas partículas do ar em uma direção específica de acordo com o modelo de Rayleigh pode ser expressa simbolicamente pela Equação (8).

$$G_{\lambda} = 1/\lambda^4 \quad (8)$$

De acordo com ela, a intensidade da radiação espalhada depende do comprimento de onda λ , dependência esta que leva a maiores níveis de espalhamento dos menores comprimentos de onda da radiação (LIOU, 2002).

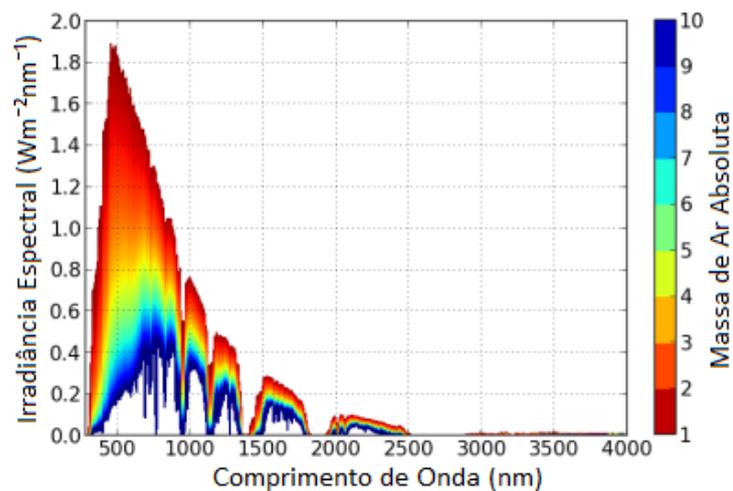


Figura 12 Exemplo da influência da massa de ar no espectro.

Fonte: Adaptado de Litens, G. (2013)

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Por definição, semicondutores são materiais que possuem sua banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução com ausência de elétrons sob temperatura de zero absoluto (0 K). Os semicondutores são materiais que não podem ser classificados como condutores nem como isolantes, pois necessitam de uma energia inferior a 3 eV (elétron-volt) para transportar um elétron da banda de valência para a banda de condução (energia de gap) e pela sua propriedade de condutividade que não está simplesmente relacionada ao “pulo” de elétrons para a camada de condução, mas também por apresentarem lacunas (vagas que foram criadas pela ausência de um elétron) que apresentam uma contribuição tão grande que as mesmas são tratadas como partículas com cargas positivas (Pinho e Galdino, 2014) conforme figura 13.

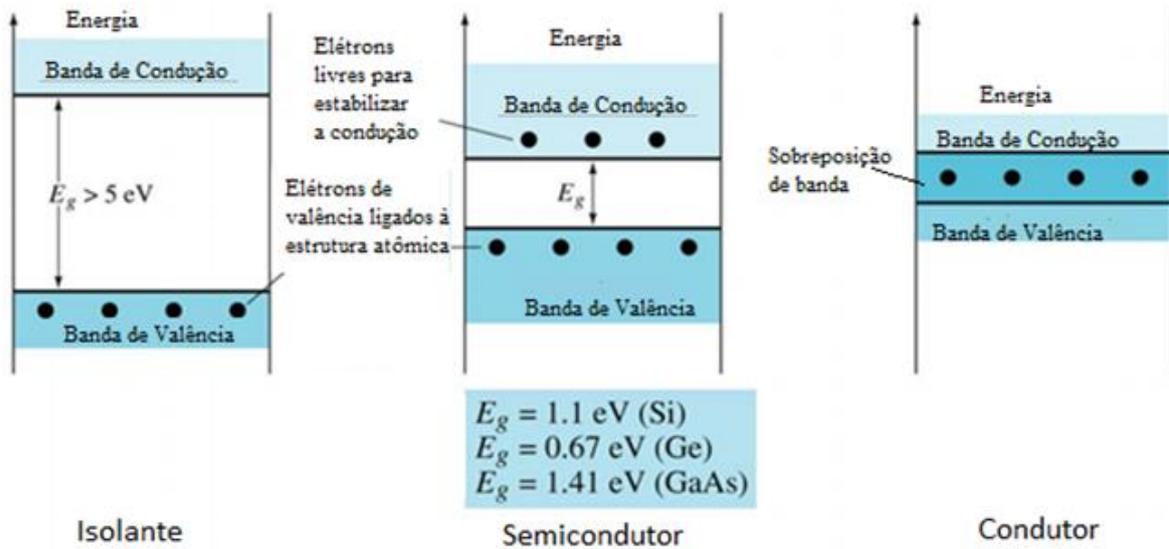


Figura 13 Estruturas de bandas dos materiais isolantes, semicondutores e condutores.

Fonte: Pinho e Galdino, 2014

Vários elementos como o carbono (C), o silício (Si), o germânio (Ge), o arsênio (As), o fósforo (P), o selênio (Se) e o telúrio (Te) apresentam essas características. Além de compostos binários, tais como arsenieto de gálio (GaAs) e nitreto de gálio (GaN), compostos ternários e quaternários como InGaAsP e o AlInGaN utilizados na fabricação de LEDs (Pinho e Galdino, 2014).

A unidade básica de conversão fotovoltaica é a célula solar, ou seja, um semicondutor preparado para que o fluxo de corrente possa ser extraído em um circuito externo. A seguir, a figura 14 mostra a estrutura convencional de uma célula solar, onde:

- Revestimento antirreflexo (AR): Serve para reduzir as perdas de reflexão da superfície;
- Contato metálico frontal: Projetado para melhorar a aquisição de corrente contra as perdas devido à resistência interna e permitir melhor desempenho do dispositivo;
- As camadas semicondutoras ativas, o emissor ou camada do tipo n e a base ou camada do tipo p, sendo que o emissor é muito menor que a base;
- O contato traseiro, que geralmente é feito em toda a superfície da célula.

Basicamente, a luz incide na superfície da célula, enquanto ela está conectada a uma carga, uma diferença de potencial elétrico é criada gerando um fluxo de corrente do terminal positivo para o terminal negativo da célula. Nem todos os fótons incidentes são capazes de gerar pares elétron-buraco, mas apenas aqueles que têm energia igual ou maior que o gap de material.

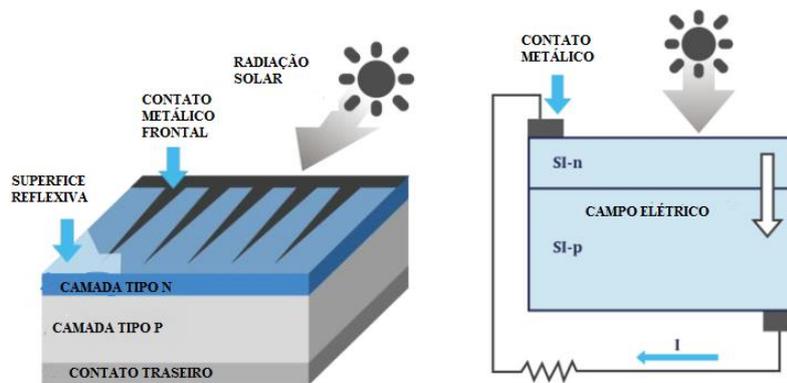


Figura 14 Estrutura típica de uma célula solar e seu princípio de funcionamento.

Fonte: Adaptado de: Alonso M.C, Garcia, F.S, Silva J.P. (2013)

Se os fótons da radiação solar fornecerem energia maior que a energia com um gap ($E_f > E_g$), elétrons da banda de valência libertar-se-ão das ligações químicas que o mantém nessa posição, ocorre então a foto geração de pares elétrons-lacunas que uma vez na região de carga espacial, serão separados pelo campo elétrico gerando um desequilíbrio ao acelerar os elétrons em direção ao lado “N” da junção e as lacunas para o lado “P”,

gerando uma corrente elétrica através da junção no sentido da região “N” para a região “P”. Se esses elétrons forem coletados por terminais metálicos posicionados um em cada lado dessa junção e havendo um circuito elétrico fechado ligado a esses terminais, esses elétrons circularão com a tendência de retornar para o terminal da camada N, gerando assim uma corrente elétrica. Caso não haja um circuito elétrico conectado aos terminais destas duas camadas, a corrente elétrica será nula. Porém, nessa situação, estará presente somente a diferença de potencial do campo elétrico formado na região de depleção (Pinho e Galdino, 2014).

Visto que a tensão e a corrente geradas por uma única célula não possuem valores significativos para que essa energia seja utilizada na prática são conectadas várias células formando um circuito misto. Parte em série com o intuito de aumentar a tensão de saída e parte em paralelo para produzir uma corrente elétrica mais elevada. Esse circuito misto de células é encapsulado em um equipamento conhecido como módulo fotovoltaico que prove, ainda, a resistência mecânica para as células (HECKTHEUER, 2001).

2.4 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS

Existem diferentes tipos de células fotovoltaicas no mercado que se diferenciam pelos materiais e estrutura de fabricação. Dentre eles estão as de silício policristalino (p-Si), de silício monocristalino (m-Si) e de filmes finos de telureto de cádmio (CdTe). Outras tecnologias de filmes finos pareciam promissoras e poderiam desbancar o silício cristalino, mas a grande redução de preço dos módulos c-Si e m-Si combinado com a degradação dos materiais com uso ao longo do tempo praticamente eliminou estes módulos do mercado. Estes são os módulos de filmes finos de silício amorfo (a-Si), de seleneto de cobre índio e gálio (CIGS) e de silício microcristalino (μ c-Si). Entre estes os módulos CIGS ainda apresentam uma produção anual perto de 1GW (Wilson et al., 2020). Ainda há tecnologias que nunca ocuparam grande parte do mercado, células baseadas em corantes (DSSC – Dye Sensitized Solar Cells) ou poliméricas, de composto orgânico (OPV), de arsenato de Gálio (GaAs), dentre outras conforme divisão apresentada na figura 15.

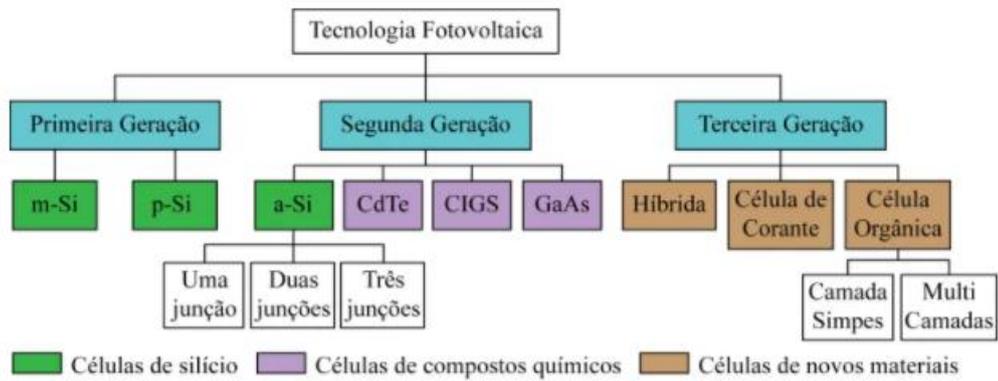


Figura 15 Divisão das Tecnologias Fotovoltaicas .

Fonte: Adaptado de Osarumen, O. et al (2016)

Já a figura 16 mostra o percentual global de produção anual de 1980 a 2019, onde houve uma oscilação das diferentes tecnologias, porém pode-se observar uma dominância da primeira geração ao longo do período.

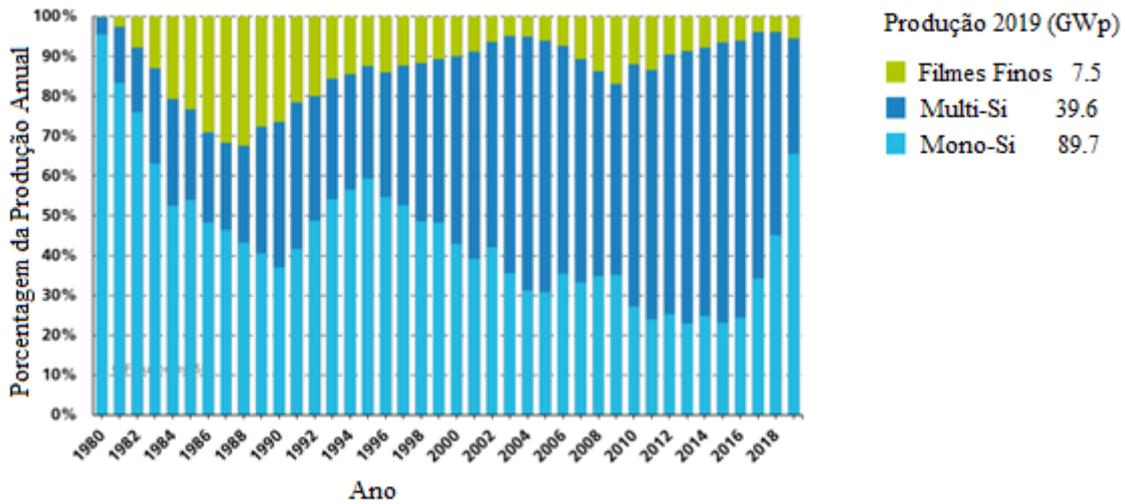


Figura 16 Percentual Global de produção anual de energia fotovoltaica

Fonte: Adaptado de Fraunhofer, 2020

A figura 17, por sua vez, demonstra que a produção de telureto de cádmio (CdTe) ainda possui um percentual mais significativo nas tecnologias de segunda geração, seguido do CIGS.

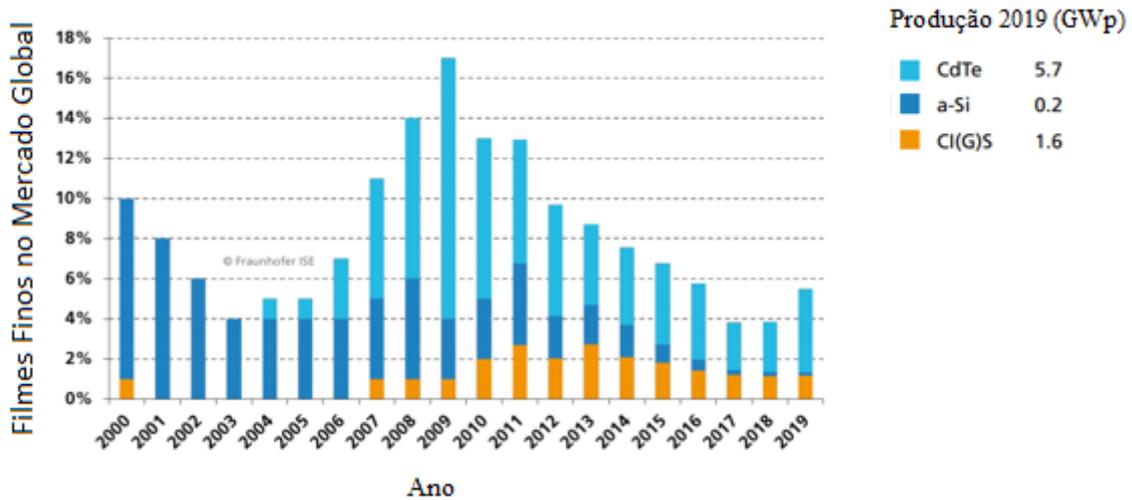


Figura 17 Percentual Global da produção de Filmes finos

Fonte: Adaptado de Fraunhofer, 2020

A figura 18 demonstra uma tendência de aumento para as os módulos de CdTe, já para as células de silício amorfo houve um decréscimo, o que indica sua desativação com o passar dos anos. First Solar é o fabricante principal da tecnologia CdTe com 95% do mercado, tendo fornecido em 2020 5,5 GW (Osborne, 2021). Isto indica que a previsão de crescimento em 2019 foi confirmada em 2020.

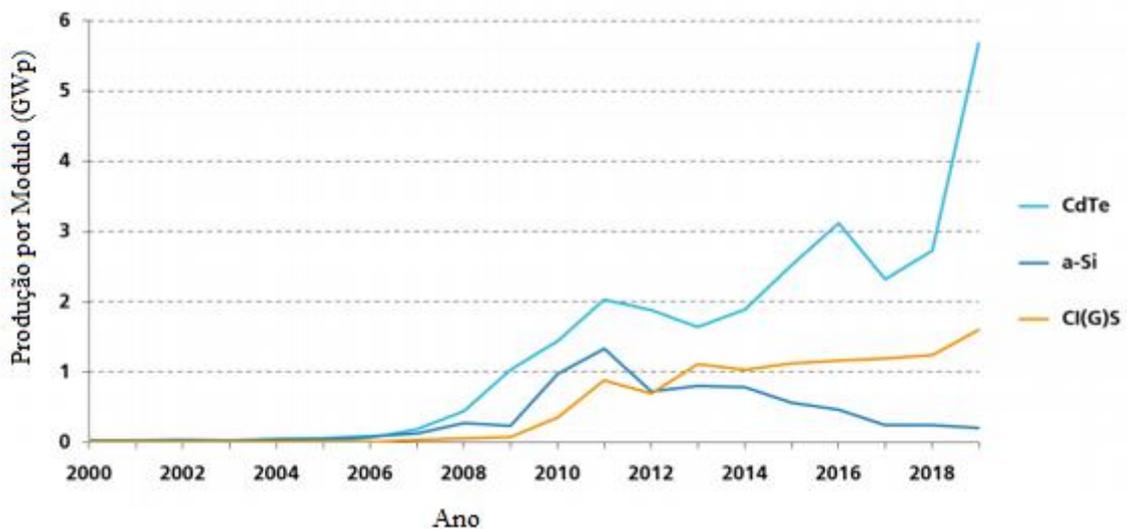


Figura 18 Produção Global para módulos de filmes finos

Fonte: Adaptado de Fraunhofer, 2020

2.4.1 Células de Silício Monocristalino

A fabricação dessas células parte da purificação do cristal de quartzo através do aquecimento sob altas temperaturas e submetidos a um processo de cultura de cristais conhecido como método de Czochralski, descoberto por Jan Czochralski em 1916, ou pela técnica de fusão zonal flutuante (Si-FZ, Float Zone - William Gardner Pfann), o que torna esse material cristalino, isento de defeitos e com elevada pureza (Pinho e Galdino, 2014) e (GHENSEV, 2006).

O lingote resultante desse processo apresenta um aspecto brilhante, devido à distribuição homogênea das suas moléculas. É, então, fatiado em “lâminas” e estes submetidos a processos físicos de dopagem, adquirindo assim propriedades para ser utilizado como células fotovoltaicas. A célula recebe ainda uma película metálica na camada tipo P, uma grade de conexões e um material antirreflexo na camada N (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Segundo um estudo realizado no Fraunhofer (2020), as células de silício monocristalinos, é a segunda tecnologia de conversão fotovoltaica mais utilizada no mercado mundial e apresentam maior eficiência em comparação com as demais, chegando a 26,7%.

2.4.2 Células de Silício Policristalino

As células fotovoltaicas policristalinas são fabricadas pelos métodos da solidificação direcional ou pelo método de carcaças eletromagnéticas semicontínuas (GHENSEV, 2006). O lingote ou bloco de silício policristalino proveniente desse método de purificação é formado por aglomerados de pequenos cristais, com tamanhos e orientações distintas. Sua coloração é escura, geralmente azulada, apresentando manchas em sua coloração. É então fatiado em “wafers” com aparência heterogênea. Sofrem o processo de “dopagem” para que adquiram as propriedades necessárias à conversão fotovoltaica da radiação, sendo que a célula acabada apresenta uma coloração azulada, podendo variar de acordo com o processo de aplicação do antirreflexo empregado (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Atualmente, com grãos menores, as células são mais conhecidas com o nome de multicristalinas (em vez de policristalinas). A tecnologia das células de silício multicristalino ainda é muito utilizada no mercado mundial por apresentar uma boa relação custo benefício, pois mesmo apresentando uma eficiência ligeiramente menor que o da tecnologia monocristalina, apresenta custo de fabricação menor que os métodos empregados para a fabricação de células monocristalinas. O maior rendimento obtido para uma célula fotovoltaica de silício policristalino é de 22,3% e para módulos até o ano 2019 foi de aproximadamente 19,9% (Fraunhofer, 2020).

2.4.3 Células de Filmes Finos

Filme fino é uma denominação dada a tecnologias fotovoltaicas que empregam materiais com espessuras da ordem de apenas 1 μm (aproximadamente 100 vezes menos espessa do que lâminas de silício cristalino). O processo de fabricação é muito diferente do silício cristalino, consistindo basicamente na deposição de uma ou mais camadas de filme fotossensível em um substrato, como o vidro, plástico, cerâmico ou metal (Fthenakis, V.M., 2004).

2.4.3.1 Telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS)

As células de telureto de cádmio (CdTe) e de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) são as que apresentam maior eficiência dentre as células de filmes finos, 21% para a célula e 19,0% para módulos de CdTe e 23,4% para célula e para o módulo de CIGS (Fraunhofer, 2020).

Os painéis fotovoltaicos de telureto de cádmio foram os únicos da tecnologia de filmes finos que ultrapassaram o custo/eficiência dos tradicionais módulos de silício cristalino em uma parte significativa do mercado mundial de módulos solares. Com a chegada da série 6 dos módulos de CdTe da empresa First Solar a eficiência de painéis solares comerciais com base na tecnologia de CdTe chegaram em 18%. (GALINDO e MELO, 2019).

A figura 19 mostra a eficiência quântica dos painéis da First Solar da série 4V2, 4V3, 5 e 6, esses dados podem ser obtidos através da curva da resposta espectral e é

definida como o número de pares de elétron-lacuna gerados em regime de curto circuito, relativos ao número de fótons incidentes sobre a célula (FONSECA, 1985).

O valor máximo da eficiência quântica externa se aproxima de 1, em toda a faixa de comprimentos de onda em que o material da célula é sensível, ao observar os dois casos apresentados fica evidente que os módulos da First Solar das série 4V2 e superior possuem uma eficiência quântica significativamente melhor na faixa de 350 nm a 550 nm do que os módulos das séries FS anteriores e consequentemente uma resposta espectral melhor.

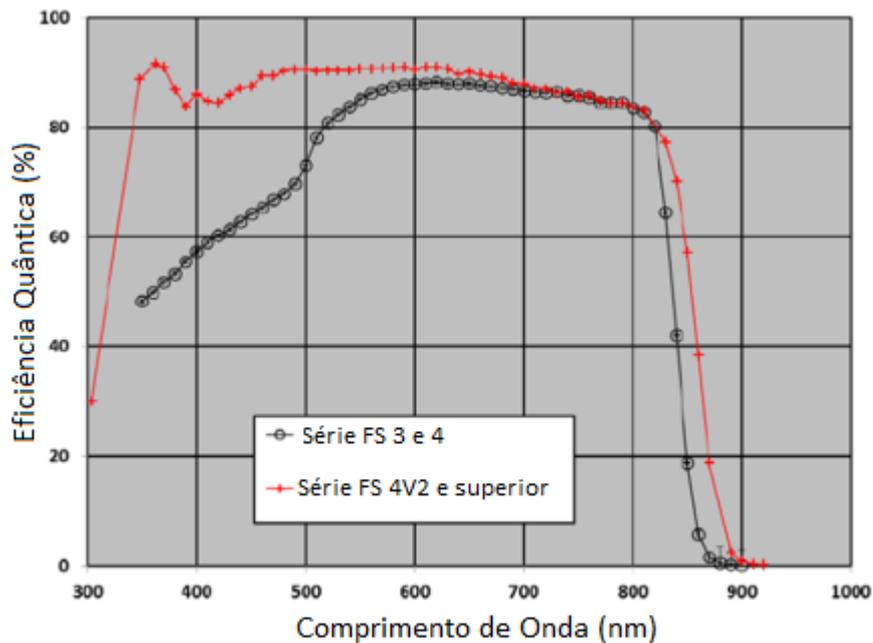


Figura 19 Eficiência Quântica externa para a First Solar Series 3, 4, e para 4V2, 4V3 e posterior.

Fonte: Adaptado de *First Solar*, 2017

2.4.3.2 Silício amorfo (a-Si)

A tecnologia de filmes finos de silício amorfo foi a primeira a ser desenvolvida (1974) com utilização desde 1980. Apresentava problemas de estabilidade no seu rendimento e geração de energia, o que foi corrigido com a adoção de células com múltiplas camadas. Apresenta um coeficiente de temperatura menor que as células cristalinas e menores perdas de eficiência em baixas irradiâncias (Pinho e Galdino, 2014).

Possui uma capacidade de absorver a radiação solar quarenta (40) vezes maior que a do silício monocristalino, o que permite a fabricação de módulos com um filme de apenas 1 µm de espessura. Porém, sua resposta espectral está localizada na região espectral da cor azul, o que o torna um bom absorvedor da radiação difusa (RAMPINELLI e BÜHLER, 2012). O rendimento desta tecnologia é muito baixo em comparação aos cristalinos, com um recorde de 10,2% para células e de 8% para módulos, até o ano 2014 (GREEN, EMERY, HISHIKAWA, WARTA, & DUNLOP, 2015) e apresenta uma degradação muito acelerada entre os 6 e 12 primeiros meses sob o efeito da radiação solar (Pinho e Galdino, 2014).

2.4.3.3 Silício microcristalino ($\mu\text{c-Si}$)

Essa tecnologia apresenta, simultaneamente, as características das células de silício cristalino com a versatilidade de fabricação dos filmes finos. Consiste na substituição da camada de silício amorfo, da tecnologia anterior, por uma camada microcristalino por processos de alta ou baixa temperatura. No processo de alta temperatura, de 900 a 1000°C, a camada microcristalina é depositada sobre o substrato e possui estrutura semelhante à célula policristalina. Já no processo de baixa temperatura, entre 200 e 500°C, ocorre deposição de estruturas microcristalinas muito finas e a baixa temperatura permite a utilização de substratos como vidro, plástico, etc. Possui eficiência estável de aproximadamente 8,5% (Pinho e Galdino, 2014)

2.4.4 Terceira Geração

As tecnologias que pertencem à terceira geração possuem como principal objetivo o aumento da eficiência de conversão, redução no custo de fabricação e adesão de características diferenciadas nas células e módulos para usos específicos. Pode-se considerar que células solares de terceira geração ainda estão em seus estágios iniciais de desenvolvimento (GROSSIORD, KROON, *et al.*, 2012).

Dentre elas está a células sensibilizadas por corante (CSSC), ou seja, um dispositivo composto, em geral, por um material semicondutor, duas faces de vidro condutor, um eletrólito, um contra eletrodo e o corante (sensibilizador). Em uma das faces do vidro condutor é depositado um filme de óxido semicondutor mesoporoso. Essa camada de óxido é sensibilizada por um corante. Na outra face de vidro condutor é depositada uma

fina camada de platina, que atua como contra eletrodo da célula. As duas partes são unidas e o eletrólito é inserido (Fernandes, S. L., 2016). Além dessa tem-se as células orgânicas (OSC) que correspondem a uma tecnologia que vem se desenvolvendo e ganhando popularidade como um material alternativo para células solares. Algumas propriedades interessantes das OSC são flexibilidade mecânica, baixo custo de material e produção, leves e semitransparentes. Também chamadas de células solares plásticas, são compostas por materiais orgânicos com espessura da ordem de 100 nm, como polímeros e pentaceno, ftalocianina de cobre, polifenileno vinileno e fulereno de carbono (Pandey, A., et al., 2016).

2.4.4.1 Tecnologia Híbrida ou Multijunção

Células híbridas ou de multijunção possuem como característica principal ter células de materiais diferentes sobrepostas, associadas em série. Cada junção produz uma corrente elétrica em um determinado comprimento de onda, se unir duas ou mais junções a faixa de comprimento de onda que a célula irá abranger será maior devido a resposta espectral de cada uma, e dessa forma gera um aumento da eficiência de conversão de energia da luz solar em energia elétrica. Porém a corrente total que circulará será definida pela célula de menor valor.

Uma representante desta tecnologia é a empresa Panasonic com a tecnologia HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) (hetero união com camada fina intrínseca) que correspondem a uma célula de silício monocristalino envolta por duas camadas ultrafinas de silício amorfo. Outro exemplo de tecnologia híbrida que tem conquistado espaço nos últimos anos são as células de silício microcristalino/amorfo ($\mu\text{c-Si/a-Si}$) e nano cristalino/amorfo (nc-Si/a-Si) também chamadas simplesmente de silício micromorfo ou nanomorfo. No caso das células HIT, eficiências consideravelmente altas são obtidas, tendo a melhor célula uma eficiência de 26,6% e o módulo mais eficiente 19,5 % (BUHLER e GABE, 2018).

Também pode ser considerada uma tecnologia mista, que está em fase desenvolvimento, as células solares de Perovskita (CSP), que teve origem através da descoberta do CaTiO_3 pelo mineralogista Russo Lev Perovski, com fórmula geral ABX_3 . Quando são utilizados em células solares, A é tipicamente um pequeno cátion molecular

orgânico inorgânico, B é um íon metálico tal como chumbo, estanho ou germânio e X é um halogênio tal como o iodo, bromo ou cloro. Essa tecnologia talvez seja a mais promissora dos últimos anos, já que em 2009 apresentava uma eficiência de apenas 3,81% e apenas 7 anos depois, em 2017 superava os 19% (Toshniwal, A., et al., 2017).

Estes materiais híbridos orgânico-inorgânico são particularmente promissores devido as suas excelentes propriedades físicas. Outra vantagem é que estes materiais podem ser preparados facilmente por meio de processos químicos, os quais possuem potencial para aplicação em larga escala devido ao baixo custo e baixa temperatura utilizada (Toshniwal, A., et al., 2017). Ocorre que algumas desvantagens das CSP precisam ser superadas, em especial a instabilidade das células. O Brasil possui alguns grupos trabalhando na elaboração de células de Perovskita. Como exemplo citam-se a Universidade de Campinas (Szostak, R., et al., 2017) e a UNESP (Fernandes, S. L., 2016).

2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MÓDULOS

A curva I x V, figura 20, traz uma série de informações importantes a respeito das células fotovoltaicas. Com ela informações de como as células ou módulos funcionam sob diferentes condições de irradiância, temperatura e carga podem ser obtidas. Seu formato depende da tecnologia de célula ou módulo utilizado e quanto mais quadrada ela for, maior será a eficiência (Pinho e Galdino, 2014).

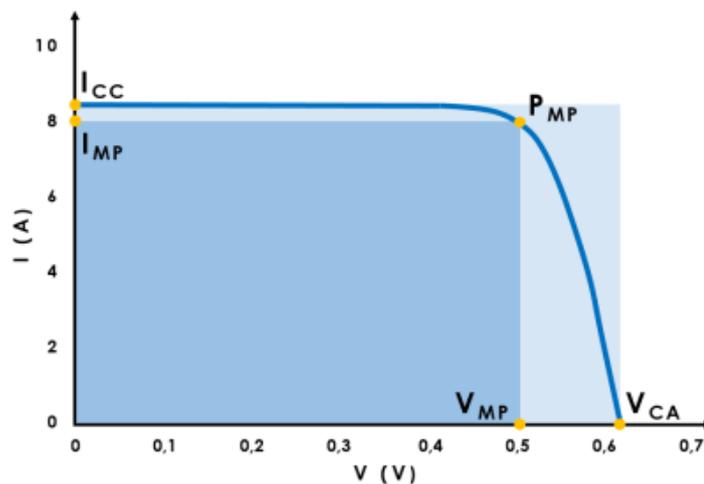


Figura 20 Curva I x V de uma célula solar fotovoltaica aonde são indicados os seus principais parâmetros

Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

Os principais parâmetros que podem ser extraídos da curva são:

A) Tensão de Circuito Aberto (V_{CA}): é tensão máxima gerada pela célula quando a corrente é zero. Pode ser medida com um voltímetro nos seus terminais.

$$V_{CA} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{FG}}{I_0} + 1 \right) \quad (9)$$

onde, V_{CA} é a Tensão de circuito aberto (V), k é a Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, T é a Temperatura (K), q é a carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C, I_{FG} é a Corrente Foto gerada (A) e I_0 Corrente de saturação (A).

B) Corrente de Curto Circuito (I_{CC}): é a máxima corrente gerada pela célula fotovoltaica e pode ser medida quando os terminais da célula se encontram em curto-circuito. Ela depende do fluxo de fótons que incidem sobre o dispositivo (que varia de acordo com o espectro solar), da área e das propriedades ópticas (características de absorção e reflexão) do mesmo. Caso as perdas ópticas e as perdas ocasionadas pelas resistências em série e em paralelo sejam pequenas, a corrente de curto circuito será muito próxima da foto gerada e poderá ser descrita pela Equação (10) (PVEDUCATION, 2015; LEE, 2010; PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_{CC} = I_{FG} = A \int_{\lambda A}^{\lambda B} G(\lambda) RE(\lambda) d(\lambda) \quad (10)$$

onde, A é a Área do dispositivo (m^2), $G(\lambda)$ é a Irradiância Espectral (W/m^2nm), $RE(\lambda)$ é a Resposta Espectral do dispositivo (A/Wnm) e λA e λB : Intervalo de comprimento de onda da Resposta Espectral (nm);

C) Fator de Forma (FF): é definido como a razão entre a máxima potência, em condição padrão, produzida pela célula e o produto entre a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto como descrito na Equação (11). (PINHO; GALDINO, 2014)

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{CA} I_{CC}} \quad (11)$$

onde FF é o Fator de forma, V_{MP} tensão de máxima potência (V), I_{MP} corrente de máxima potência (A), V_{CA} é a tensão de circuito aberto (V), e I_{CC} é a corrente de curto circuito (A).

D) Eficiência (η): ela indica o quão eficiente é o processo de conversão da energia solar em energia elétrica é definida como a razão entre a potência máxima produzida pela célula e a potência radiante que chega até ela (P_{IN}). A equação (12) mostra esta razão, e normalmente o resultado é dado em percentual da energia convertida. Seu valor depende de vários fatores como o tipo de semicondutor utilizado, o processo de fabricação, presença de defeitos e impurezas no semicondutor, etc. (PINHO; GALDINO, 2014)

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{IN}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{AG} \quad (12)$$

onde, η é a Eficiência, P_{MP} é a potência máxima produzida pelo módulo (W), P_{IN} é a Potência máxima que chega ao módulo (W), V_{MP} é a tensão de máxima potência (V), I_{MP} é a corrente de máxima potência (A), A é a Área do dispositivo fotovoltaico (m^2) e G é a irradiância incidente (W/m^2);

Outra curva importante para caracterização dos dispositivos é a da Resposta Espectral (RE), que é definida como a razão entre a corrente produzida pelo dispositivo fotovoltaico e a potência da radiação que incide sobre ele conforme mostra a Equação (13). (PVEDUCATION, 2015).

$$RE(\lambda) = \frac{I_{CC}(\lambda)}{G(\lambda)} \quad (13)$$

A figura 21 mostra que, conforme a tecnologia utilizada, a resposta espectral varia conforme o comprimento de onda, sendo assim, fica claro a importância que a distribuição espectral da irradiância incidente tem no desempenho dos módulos.

Os dispositivos fotovoltaicos são sensíveis ao espectro eletromagnético incidente e a toda variação que ele sofre. Isso ocorre porque tais dispositivos são seletivos espectralmente e somente as regiões espectrais que coincidirem com sua resposta espectral poderão ser aproveitadas. Fatores como reflexão, sombreamento e características internas do material também irão afetar esta sensibilidade (BETTS, 2004).

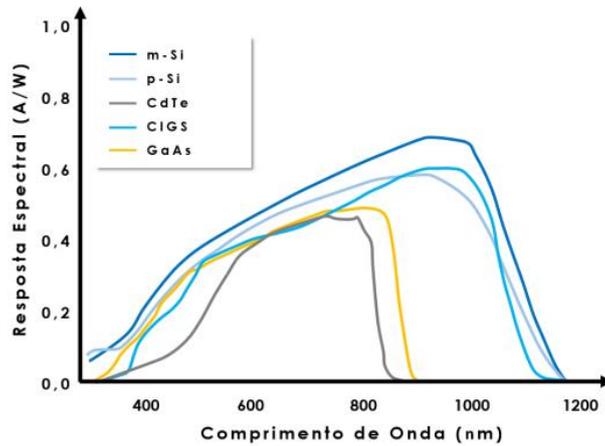


Figura 21 Resposta Espectral de diferentes tecnologias de células.

Fonte: Adaptado de PVPMC (2015) e Schultz (2012) citado por Kwarikunda et al (2013)

A figura 22 mostra como a irradiância influencia diretamente na potência gerada pelos dispositivos fotovoltaicos. A corrente de curto circuito é diretamente proporcional a ela, enquanto que a tensão de circuito aberto apresenta uma dependência em escala logarítmica quando a temperatura é mantida constante (PINHO; GALDINO, 2014)

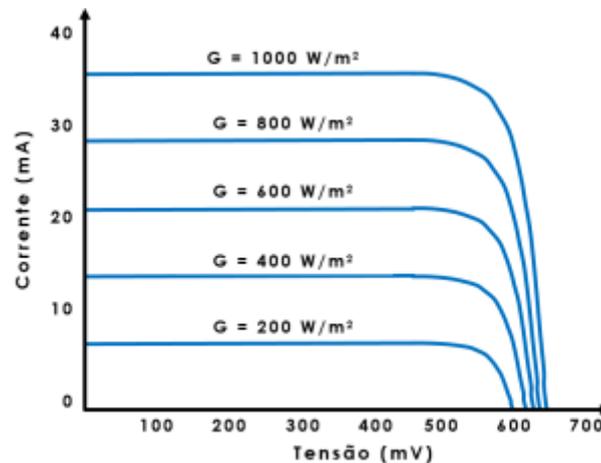


Figura 22 Curvas I (mA) x V (mV) de células solares de Silício para diferentes intensidades de radiação.

Fonte: Vilela (2010)

Já na figura 23 tem-se o efeito da temperatura na curva I - V dos dispositivos fotovoltaicos. Nele pode ser visto que a tensão de circuito aberto diminui proporcionalmente ao aumento da temperatura, enquanto que a corrente de curto circuito

sofre um leve acréscimo. As alterações destes parâmetros acabam levando a uma perda de potência por conta do decréscimo significativo no valor de V_{CA} (PINHO; GALDINO, 2014; VILELA, 2010).

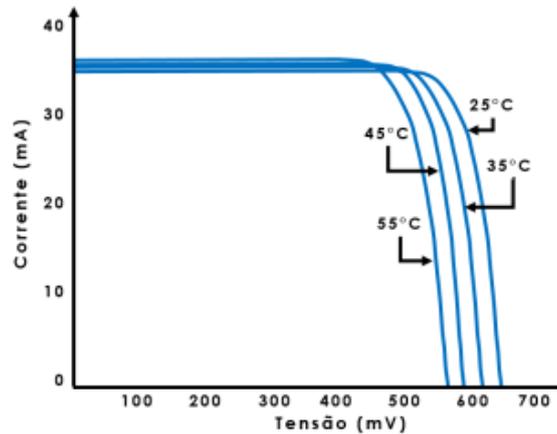


Figura 23 Curvas I x V de células solares de Silício para diferentes intensidades de radiação.

Fonte: Vilela (2010)

Diferentemente dos efeitos da temperatura e da irradiância, os efeitos da variação espectral da radiação solar não são ainda considerados em avaliações de performance de células solares em operação em campo e vem sendo alvo de muitas pesquisas ao redor do mundo na última década. Os resultados apresentados por estas pesquisas foram obtidos utilizando diferentes metodologias em regiões com climas distintos entre si em diferentes períodos de tempo e por isso há certas dificuldades para compará-los. Apesar disto, elas concordam no fato de que as influências das variações espectrais podem ser significativas dependendo da resposta espectral da célula solar utilizada. Conforme a tecnologia fotovoltaica adotada, observa-se que seu desempenho varia com a localização em termos de latitude e longitude, clima local, nível de poluição etc., levando a crer que o desempenho dos módulos fotovoltaicos podem variar de uma região para outra (BETTS, 2004; ISHII, et al, 2010; ALONSO-ABELLA, et al, 2014).

Para poder comparar diferentes módulos ao determinar sua eficiência, definiu-se um espectro padrão para a radiação solar, pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), que consta na norma ASTM G173-03. Este espectro padrão, no entanto, não

reflete a distribuição espectral mais significativa na conversão fotovoltaica (ou mesmo na conversão térmica da radiação solar) para qualquer lugar do mundo. Isto estimula a realização do presente trabalho: analisar qual a distribuição espectral que seria mais significativa para Porto Alegre, contudo, a metodologia aplicada para essa região poderá ser utilizada em outras regiões de interesse.

3 METODOLOGIA

3.1 O SOFTWARE SMARTS2

O *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine* (SMART2) é um software desenvolvido por Gueimard em 1995. Seu objetivo é caracterizar a irradiância solar de céu limpo, através do preenchimento de alguns parâmetros. O software SMARTS transforma algumas equações de transmitância propostas por LECKNER (1978) onde são escolhidos dez padrões atmosféricos que podem ser adotados como referências para a caracterização da distribuição vertical dos principais constituintes atmosféricos. Entre os dez modelos de referências contidos no modelo SMARTS, seis são usados na família de modelos Lowtran e Modtran (GUEIMARD, 1995).

O modelo SMARTS faz uso de dados específicos de perfis verticais de temperatura, pressão e concentrações dos principais gases presentes na atmosfera terrestre, a faixa de integração do comprimento de onda da distribuição do espectro pode compreender entre 280 a 4000 nm (MYERS e GUEYMARD, 2004).

SMARTS 2.9.2 é a base para os espectros de referência da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM G-173 e ASTM G-177) usados para testes de desempenho fotovoltaico e estudos de degradação de materiais. (NREL, 2020).

Os algoritmos usados pelo SMARTS foram desenvolvidos para corresponder à saída dos modelos de banda complexos MODTRAN com uma diferença de aproximadamente 2%. Os algoritmos são implementados em código FORTRAN compilado para plataformas Macintosh e PC. O código-fonte está disponível. Os algoritmos são usados em conjunto com arquivos para absorção atmosférica de componentes atmosféricos e funções de albedo espectral. A resolução espectral é de 0,5 nm para 280-400 nm, 1 nm para 400-1.750 nm e 10 nm para 1.750-4.000 nm (NREL, 2020).

Para poder gerar os espectros relativos ao local, no caso Porto Alegre, foram utilizados os dados atmosféricos disponíveis na plataforma Giovanni, um serviço desenvolvido pela NASA e centro de serviços de informação (GES DISC), baseado na web para a visualização e análise do conjunto de dados da composição atmosférica. A plataforma Giovanni permite a exploração interativa de dados, análise e download de

subconjuntos de dados de múltiplos sensores independentes do formato de arquivo subjacente. Atualmente, várias instâncias de Giovanni foram desenvolvidas para suportar dados de satélite dentre os quais pode-se citar o satélite Aura MLS (perfis de ozônio, gases traço, vapor de água, temperatura e altura geopotencial); o UARS HALOE (perfis de ozônio, gases residuais, água vapor, temperatura e extinção de aerossol), o TOMS e Aura OMI (coluna de ozônio, aerossol índice, refletividade de superfície efetiva), AIRS (coluna de ozônio e perfis verticais de água vapor, umidade relativa, temperatura, geopotencial altura, etc.) e o Aqua e Terra MODIS (aerossóis, nuvens e vapor d'água).

Tabela 1 Dados fornecidos pelo site Nasa para entrada do SMARTS2

Componente	Sensor
Aerosol Absorption optical Depth 500 nm (OMAERUVdv003)	OMI
Ozone Total Column (DOAS) (OMDOAO3e v003)	OMI
Ozone Total Column (TOMS IIKE) (OMTO3e v003)	OMI
Precipitable Water Vapor (IR Retrieval) Total Column: (MYD08_D3_V6.1)	MODIS-AQUA
Precipitable Water Vapor (IR Retrieval) Total Column: (MOD08_D3_V6.1)	MODIS-TERRA

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS e VALIDAÇÃO

Em um primeiro momento foram realizadas medições locais de hora em hora em alguns dias dos meses de fevereiro e março com a intenção de validar o software SMARTS2 que será utilizado neste trabalho. Para tal, foram utilizados um piranômetro (MS-80), figura 24, com uma sensibilidade de $11\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ e faixa espectral de 280 nm a 3000 nm e um espectrorradiômetro, figura 25, que possui uma faixa de sensibilidade espectral entre 300 e 1000 nm e resolução de 4 nm, e é acoplado com uma unidade de captação da radiação com difusor de teflon transferindo a mesma através de uma fibra óptica até o elemento dispensor e o arranjo de sensores.



Figura 24 Piranômetro MS-80



Figura 25 Espectrorradiômetro EPP-2000

Fonte: Haag, R. 2012.

Para validação do método foram utilizados os dados medidos localmente no dia 21/02/2020 às 10:00 hs, juntamente com os dados gerados pelo SMARTS2 para o mesmo dia e horário conforme apresentado na figura 26. Este dia e hora foi selecionado por apresentar um $k_t > 0,65$ o que pode ser considerado um dia de céu limpo, condição necessária para a utilização do *software*.

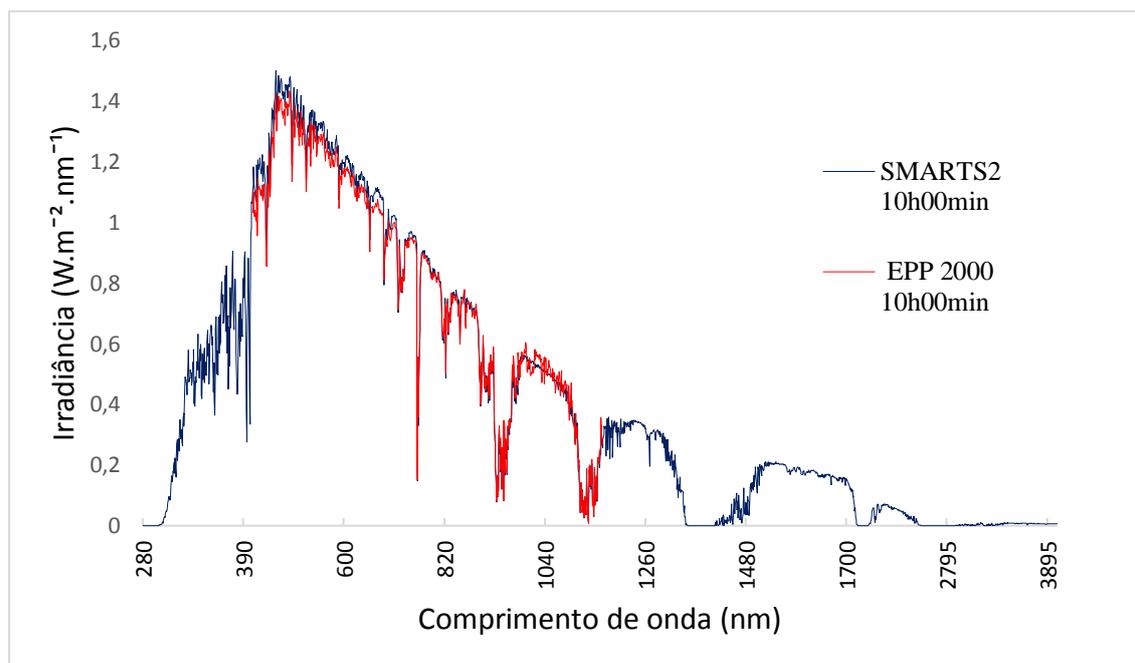


Figura 26 Comparativo entre software SMARTS2 x EPP 2000, no horário das 10h00min para o dia 21/02/2020

Os espectros gerados pelo SMARTS2 e os dados encontrados com o espectrorradiômetro são muito semelhantes, apresentando uma diferença máxima de 9% ao longo do espectro.

A variação encontrada foi calculada conforme a equação (14)

$$Var(\lambda) = \frac{VM(\lambda) - VS(\lambda)}{VS(\lambda)} * 100 \quad (14)$$

onde, Var é a variação para comprimento de onda, VM é o valor medido pelo espectrorradiômetro e VS é o valor simulado pelo SMARTS2.

3.3 COMPILAÇÃO DOS DADOS

O passo seguinte foi a compilação dos dados necessários para gerar o espectro padrão e os espectros anual e mensal para a região de Porto Alegre. No caso, o espectro de referência G173 -03, foi gerado através do software SMARTS2 (SMARTS2, 2020) e para isso, foram utilizados alguns componentes atmosféricos característicos, além da latitude da região, conforme indicado na tabela 2 (NREL, 2020). O valor de 1,5 para AM foi adotado,

baseando-se em uma média do ângulo zenital (θ_z) para 12 h local, escolhido como significativo para o território dos Estados Unidos da América. Contudo essas características são diferentes da região de Porto Alegre, e consequentemente a eficiência dos módulos que serão adotados na região podem variar. Desta forma, alguns elementos que influenciam no espectro precisam ser analisados individualmente para a região de interesse.

Tabela 2 Dados atmosféricos utilizados para gerar o espectro padrão ASTM G-173

	CO ₃ (UD)	Vapor d'água (cm)	AOD (-)	CO ₂ (ppmv)	AM	Latitude média
ASTM G-173	343,8	1,42	0,084	370	1,5	37°

Com esses dados em mãos, foi feita uma comparação entre os valores padrão da ASTM e pela compilação realizada para este trabalho, além de calcular o desvio padrão de forma a analisar quanto os valores se desviaram das suas médias, conforme a equação (15).

$$DP = \frac{\sum |x - \bar{x}|}{N} \quad (15)$$

onde, X são todos os elementos a serem analisados, \bar{X} é média dos elementos e N é o número de dados da população.

Em seguida foi feita a média dos dados mensais de vários anos, para região de Porto Alegre, fornecidos pela plataforma Giovanni NASA (n.d), ESRL (ESRL, 2020) e pelo INMET, dados esses que podem ser verificados na tabela 3. Com estes valores disponíveis e sabendo que o local de interesse possui um clima subtropical úmido (Cfa, escala de Koppen) Cardia (2010), a 46 m do nível do mar e latitude de 30° foi possível gerar os espectros mensais para o local e comparar suas variações em relação ao padronizado pela norma ASTM.

Durante a elaboração do Atlas Solar do Rio Grande do Sul (Back et al., 2018), com a participação de professores do LABSOL-UFRGS entre outros, a metodologia utilizada para definir a produtividade fotovoltaica exigiu o cálculo para cada hora em Porto Alegre, ao longo dos anos de 2000 a 2018, de um conjunto de grandezas que foram aproveitadas nesta dissertação.

Tabela 3 Dados atmosféricos para PORTO ALEGRE

PORTO ALEGRE	pressão (hPa) INMET (1981 a 2018)	dióxido de carbono (ppm) ESRL (1959 a 2020)	Ozônio (DU) 2004 a 2020	Vapor d'água (cm) 2004 a 2020	AOD (500 nm) (adimensional) 2004 -2020
JAN	1011,20	355,63	264,11	3,36	0,0139
FEV	1012,50	356,39	261,09	3,43	0,0121
MAR	1012,90	357,26	261,43	2,93	0,0098
ABR	1013,80	358,53	260,04	2,46	0,0095
MAI	1015,90	359,12	267,44	2,06	0,0100
JUN	1018,10	358,53	272,51	1,86	0,0110
JUL	1019,40	357,02	281,39	1,69	0,0099
AGO	1018,30	354,99	288,18	1,80	0,0105
SET	1017,00	353,44	293,09	1,92	0,0113
OUT	1014,40	353,49	285,45	2,14	0,0134
NOV	1012,90	354,84	283,39	2,33	0,0138
DEZ	1011,40	355,20	273,07	2,80	0,0134

O INMET disponibilizou dados horários de irradiação solar horizontal medidos ao longo do período citado. A partir destas informações, foram calculadas para cada hora as grandezas que constam na Tabela 4

Tabela 4 Informações (em base horária) disponibilizadas nas planilhas organizadas para cada uma das 33 estações meteorológicas automáticas selecionadas do RGS

Tipo de variável	Informações disponibilizadas nas colunas da planilha para cada hora				
Tempo	<i>ano</i>	<i>mes</i>	<i>dia</i>	<i>Hora GMT</i>	<i>Hora Solar</i>
Geometria	$I_0(Wh/m^2)$	θ_z	AM		
Irradiação horizontal	$I(Wh/m^2)$	$I_d(Wh/m^2)$	$I_b(Wh/m^2)$	k_T	k_D
Irradiação inclinada $\beta=20^\circ$	$I_{\beta}(20^\circ)$	$I_{b\beta}(20^\circ)$	$I_{d\beta}(20^\circ)$	$I_{\rho\beta}(20^\circ)$	$\theta_s(\beta=20^\circ)$
Irradiação inclinada $\beta=45^\circ$	$I_{\beta}(45^\circ)$	$I_{b\beta}(45^\circ)$	$I_{d\beta}(45^\circ)$	$I_{\rho\beta}(45^\circ)$	$\theta_s(\beta=45^\circ)$
Irradiação Efetiva	$I_{ef}(\beta=0^\circ)$	$I_{ef}(\beta=20^\circ)$	$I_{ef}(\beta=45^\circ)$		
Energia Injetada	$E_{INJ}(\beta=0^\circ)$	$E_{INJ}(\beta=20^\circ)$	$E_{INJ}(\beta=45^\circ)$		
Meteorologia	T_{min}	T_{med}	T_{max}	V_{vento}	

Fonte: Krenzinger et al. (2020).

Para a metodologia desta dissertação as planilhas oferecem os valores previamente calculados de massa de ar (AM), índice de limpidez horária (k_t), definido na equação (16) e o índice de energia elétrica produzida, isto é, a eletricidade produzida por um sistema fotovoltaico típico instalado na orientação norte com ângulo de inclinação de 20° , por

unidade de potência pico, (E_{inj}). Todos os valores das planilhas são calculados para cada hora do dia, inclusive o índice de energia elétrica produzida naquela hora em Wh/Wp.

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (16)$$

onde I é a irradiação solar horária horizontal e I_o é a irradiação extraterrestre horária.

Foi escolhido o k_t maior ou igual a 0,6 para selecionar apenas os momentos em que o céu pode ser considerado próximo da configuração de céu limpo exigida pelo modelo SMARTS2.

Tabela 5 Energia percentual produzida E_{inj} para as faixas de k_t (%)

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABRIL	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
$k_t < 0,6$	36	37	37	35	41	41	35	37	34	37	32	34
$k_t > 0,5$	79	78	78	79	73	74	79	76	77	75	80	79
$k_t > 0,55$	72	71	72	72	67	68	72	71	72	70	75	73
$k_t > 0,6$	64	63	63	65	59	59	65	63	66	63	68	66
$k_t > 0,65$	53	52	52	55	48	47	53	53	56	53	59	56
$k_t > 0,7$	38	35	34	36	27	26	31	34	40	40	46	42
$k_t > 0,75$	12	8	8	7	4	3	4	9	15	17	18	15
$k_t > 0,8$	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0

Uma análise da distribuição da conversão fotovoltaica para todos os meses, conforme tabela 5, mostra que as horas em que $k_t > 0,6$ correspondem a uma conversão fotovoltaica da energia solar da ordem de 60% a 65% para todos os meses, sendo este o valor adotado por este estudo para selecionar as horas a considerar na análise. Tendo definido o valor de k_t , o próximo passo seria selecionar o valor da massa de ar (AM), como critério para calcular a diferença dos espectros anuais e mensais efetivos em relação ao espectro padrão e o impacto que possa representar ao utilizar módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias.

Na tabela 6 podem-se notar os valores obtidos pela soma dos índices de energia ao longo de todas as horas em que a condição de $k_t > 0,6$ e o intervalo de AM são cumpridos., valores esses que demonstram a participação significativa que a massa de ar tem nas parcelas de energia.

Tabela 6 Soma dos Índices de energia gerada em todas as horas em que $k_t > 0,6$ para diferentes faixas de massa de ar. (Wh/Wp)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
AM <1,3	954,1	832,1	703,6	151,5	0,0	0,0	0,0	19,9	474,4	744,7	1083,1	1104,7
AM <1,4	1238,7	919,0	866,5	378,1	0,0	0,0	0,0	195,6	610,0	871,9	1083,1	1233,9
AM <1,5	1238,7	1067,8	905,1	595,4	78,1	0,0	0,6	393,2	727,4	902,1	1180,5	1245,0
AM <1,6	1238,7	1085,9	1006,6	689,5	241,0	0,0	112,3	533,3	767,6	958,0	1298,9	1320,7
AM <1,7	1337,6	1085,9	1097,1	739,3	378,1	135,3	315,0	611,1	801,0	1030,8	1321,1	1363,0
AM <1,8	1406,1	1132,9	1134,6	790,9	452,2	342,8	413,0	668,6	866,4	1055,2	1321,1	1422,8
AM <1,9	1427,1	1179,2	1134,6	849,9	519,5	342,8	500,4	688,9	898,3	1072,8	1332,7	1453,5
AM <2,0	1427,1	1224,3	1141,2	889,3	551,6	404,8	606,7	724,2	916,6	1081,4	1365,8	1453,5
AM <2,1	1427,1	1246,2	1159,8	915,2	569,1	525,8	637,8	745,7	929,7	1081,4	1393,1	1453,5
AM <2,2	1427,1	1246,2	1192,7	929,3	578,7	525,8	637,8	768,9	936,1	1096,3	1411,9	1456,3
AM <2,3	1427,1	1246,2	1223,2	943,8	589,2	525,8	637,8	784,6	943,2	1114,2	1447,6	1490,7
AM <2,4	1427,1	1246,2	1246,5	943,8	610,0	525,8	647,9	787,9	948,0	1131,2	1458,8	1507,3
AM <2,5	1446,4	1246,2	1262,4	944,8	625,8	528,1	668,6	787,9	957,2	1144,0	1458,8	1508,0
1,7<AM<3,0	161,2	184,6	172,6	243,6	277,4	458,2	410,2	184,7	197,6	130,1	138,3	175,9
AM >3	0,5	12,1	4,5	9,4	0,2	0,4	0,5	10,5	4,0	6,5	16,6	2,1

Os valores da tabela 6 são acumulativos com exceção da linha que mostra 1,7<AM<3,0 onde se vê o peso desta faixa com massa de ar excedente em relação ao padrão. Nesta linha se observa forte distinção ente os meses de inverno e verão.

Tabela 7 Dados de energia percentual apresentados como fração do total mensal (%).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
AM <1,3	64	65	55	15	0	0	0	2	47	64	73	72
AM <1,4	83	72	68	38	0	0	0	24	61	75	73	80
AM <1,5	83	83	71	60	12	0	0	49	73	77	80	81
AM <1,6	83	85	79	69	37	0	15	66	77	82	88	86
AM <1,7	89	85	86	75	58	23	43	76	80	88	90	88
AM <1,8	94	88	89	80	69	58	57	83	86	90	90	92
AM <1,9	95	92	89	86	79	58	69	85	90	92	90	94
AM <2,0	95	95	90	90	84	68	84	90	91	93	93	94
AM <2,1	95	97	91	92	87	89	88	92	93	93	94	94
AM <2,2	95	97	94	94	88	89	88	95	93	94	96	95
AM <2,3	95	97	96	95	90	89	88	97	94	95	98	97
AM <2,4	95	97	98	95	93	89	89	98	95	97	99	98
AM <2,5	96	97	99	95	95	89	92	98	95	98	99	98
1,7<AM<3,0	11	14	14	25	42	77	57	23	20	11	9	11
AM >3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0

Com estes mesmos dados foi construída a tabela 7 mostrando os valores em percentual da energia citada na tabela 6, nas quais foram ressaltados os limites a considerar em AM para que se obtenha uma faixa de massa de ar representando 80% do total de energia.

Em seguida, para as demais análises, foram levadas em consideração todas as horas em que a faixa de massa de ar mensal representasse em torno de 80% do valor de energia total para $k_t > 0,6$ conforme marcado na tabela 7. Ao selecionar essas faixas, foi possível definir o valor médio da massa de ar efetiva (\overline{AM}), através da equação (17),

$$\overline{AM} = \frac{\sum_{cond} AM \cdot E_{inj}}{\sum_{cond} E_{inj}} \quad (17)$$

onde *cond* indica que o somatório é sobre todas as horas em que as condições são cumpridas, por exemplo, todas as horas em que $k_t > 0,6$ e $AM < 1,7$, E_{inj} é a energia que seria injetada na mesma hora por um sistema fotovoltaico típico. Ao realizar a média com esta ponderação energética, o valor encontrado se refere ao valor mais significativo para conversão fotovoltaica naquela faixa de condições citadas. A tabela 8 mostra os valores de \overline{AM} baseados nos cálculos anteriores e as faixas correspondentes para cada mês. Estes dados foram depois utilizados para gerar os espectros mensais correspondentes no *software* SMARTS2.

Tabela 8 Dados de AM selecionados para cada mês

	Faixa AM	AM
Jan.	AM <1,4	1,13
Fev.	AM <1,5	1,18
Mar.	AM <1,6	1,26
Abr.	AM <1,8	1,43
Mai.	AM <1,9	1,63
Jun.	AM <2,1	1,82
Jul.	AM <2	1,73
Ago.	AM <1,8	1,49
Set.	AM <1,7	1,31
Out.	AM <1,6	1,2
Nov.	AM <1,5	1,14
Dez.	AM <1,4	1,12

Uma última etapa foi avaliar a influência dos diferentes tipos de distribuição espectral em relação a resposta espectral de um módulo. Como visto ao longo do trabalho a massa de ar tem uma influência significativa na irradiância espectral e conseqüentemente afeta a corrente de curto-circuito que depende de uma combinação dessa distribuição com a resposta espectral. Para realizar esta análise foram escolhidos os módulos de telureto de cádmio FSversão3 (CdTe), telureto de cádmio FSversão5 (CdTe-2), Silício amorfo tripla junção (a-Si), Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e um de silício amorfo, uma dupla junção de Silício microcristalino (a-Si/ μ -Si), e uma de silício cristalino (c-Si) conforme a tabela 9.

Tabela 9 Módulos fotovoltaicos utilizados na dissertação

	modelo	fabricante
a-Si tripla junção	US-32	Unisolar
a-Si/ μ -Si	DA142-C1	Dupont Apollo
CdTe	FS-280	First Solar
CdTe-2	FS-5	First Solar
CIGS	TS-150C2	TSMC
c-Si	SI0004	-

Existem vários índices para quantificar os efeitos de diferentes distribuições espectrais da luz solar nas tecnologias FV. Alguns desses índices caracterizam a distribuição espectral da própria luz, como a fração de azul (*Blue Fraction* -BF) e APE (energia média de fótons), enquanto outros visam relacionar uma determinada distribuição espectral com o espectro padrão e uma resposta espectral específica (fator espectral, fração útil, etc.) ou até correlacionar os impactos espectrais relativos entre dois dispositivos FV (fator de descasamento espectral) (Rodrigo et al., 2017).

Neste trabalho será realizada a comparação das distribuições espectrais efetivas mensais de Porto Alegre com as definidas pela norma G-173, conforme Haag, 2012, esse processo pode ser descrito matematicamente através do Fator de Eficiência Espectral (Fe), um fator que relaciona a eficiência na conversão de energia para módulos de única junção, e pode ser encontrado através da equação (18).

$$Fe = \frac{E_P}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_f} Sr(\lambda)E_P(\lambda)d(\lambda)} * \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_f} Sr(\lambda)E_{men}(\lambda)d(\lambda)}{E_{men}} \quad (18)$$

onde, E_P e E_{men} são os valores integrados das irradiâncias na condição padrão e real. $Sr(\lambda)$ é a resposta espectral do dispositivo normalizada, as funções $E_{men}(\lambda)$ e $E_P(\lambda)$ fornecem os valores espectrais para as irradiâncias nos limites escolhidos.

Já os Fatores de Eficiência Espectral para os módulos com mais de uma junção poderão, conforme Haag (2012), ser definidos conforme a equação (19)

$$Fe = \frac{E_P * MIN(\int_{\lambda_i}^{\lambda_f} S1(\lambda) E_{men}(\lambda) d(\lambda), \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} S2(\lambda) E_{men}(\lambda) d(\lambda), \dots)}{MIN(\int_{\lambda_i}^{\lambda_f} S1(\lambda) E_P(\lambda) d(\lambda), \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} S2(\lambda) E_P(\lambda) d(\lambda), \dots) * E_{men}} \quad (19)$$

onde, E_P e E_{men} são os valores integrados das irradiâncias na condição padrão e real. $S1(\lambda)$, $S2(\lambda)$, ... são as respostas espectrais dos dispositivos normalizadas, as funções $E_{men}(\lambda)$ e $E_P(\lambda)$ fornecem os valores espectrais para as irradiâncias nos limites escolhidos e MIN é o menor valor encontrado dentre todas as junções.

4 RESULTADOS

Como primeiro resultado obteve-se a comparação entre os dados fornecidos pela ASTM, e por este trabalho como demonstrado na tabela 10.

Tabela 10 Valores médios para as componentes e os desvios padrão (σ), que influenciam na distribuição espectral

	Ozônio (σ) (atm-cm ²)	Vapor d'água (σ) (cm)	AOD (σ) (500 nm) (-)	CO ₂ (σ) (ppmv)
ASTM G-173	343,8	1,42	0,084	370
Porto Alegre (2004 a 2020)	274,3(11,69)	2,39(0,6)	0,012 (0,0017)	356

Pode-se observar que mesmo com uma alteração do período de aquisição de dados, os valores característicos para Porto Alegre possuem uma diferença em relação a norma, e outro ponto importante a ser analisado, é que em comparação aos dados obtidos por (Haag 2012) o valor médio de Ozônio e vapor d'água obtiveram uma diferença de 0,4% e 3,9% respectivamente, demonstrando assim, que obter uma distribuição espectral baseada apenas na média anual pode mascarar, um pouco, o resultado e por isso a análise mensal se torna interessante.

Na figura 27 é mostrado que ao simular um espectro com AM 1,5 para ambos os casos, percebe-se que a distribuição espectral para a região de interesse se assemelha ao adotado como padrão, demonstrando assim que as diferenças nas condições atmosféricas apresentadas na tabela 2 impactam no espectro, porém não de forma muito significativa.

Na figura 28, é apresentada a distribuição espectral para Porto Alegre com uma massa de ar média ponderada dos valores históricos fornecidos pelo INMET (Back et al.), em um período de 2000 a 2018, e calculada conforme equação (17).

Através da ponderação dos dados foi encontrado um valor médio de \overline{AM} igual a 1,3 para a região de Porto Alegre, considerando o ano todo.

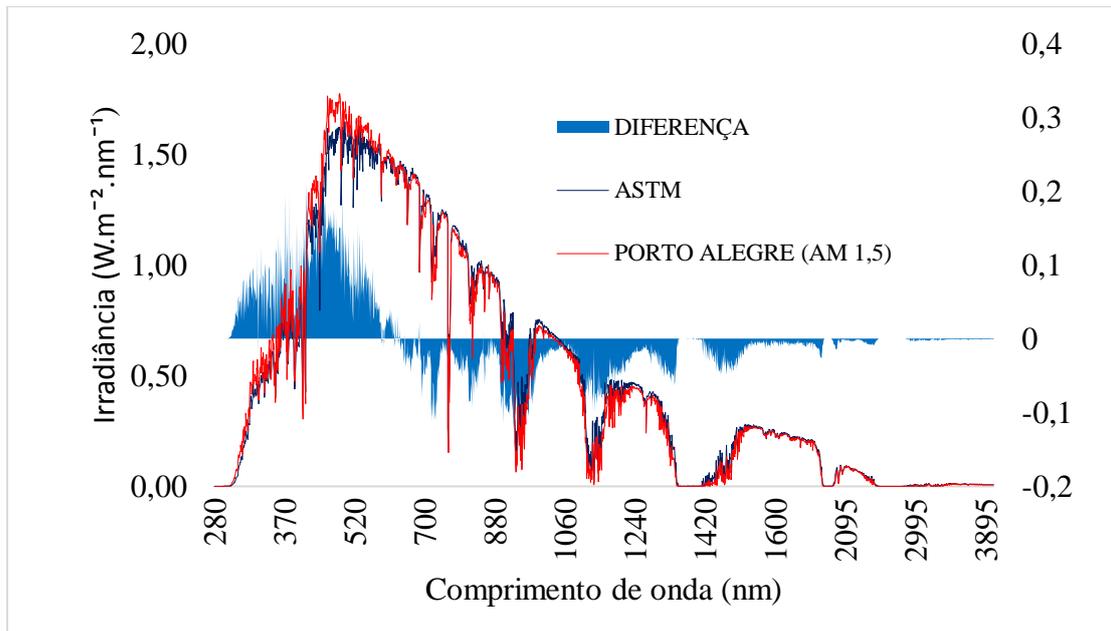


Figura 27 Comparativo entre o espectro padrão e de Porto Alegre para valores característicos, com AM igual a 1,5

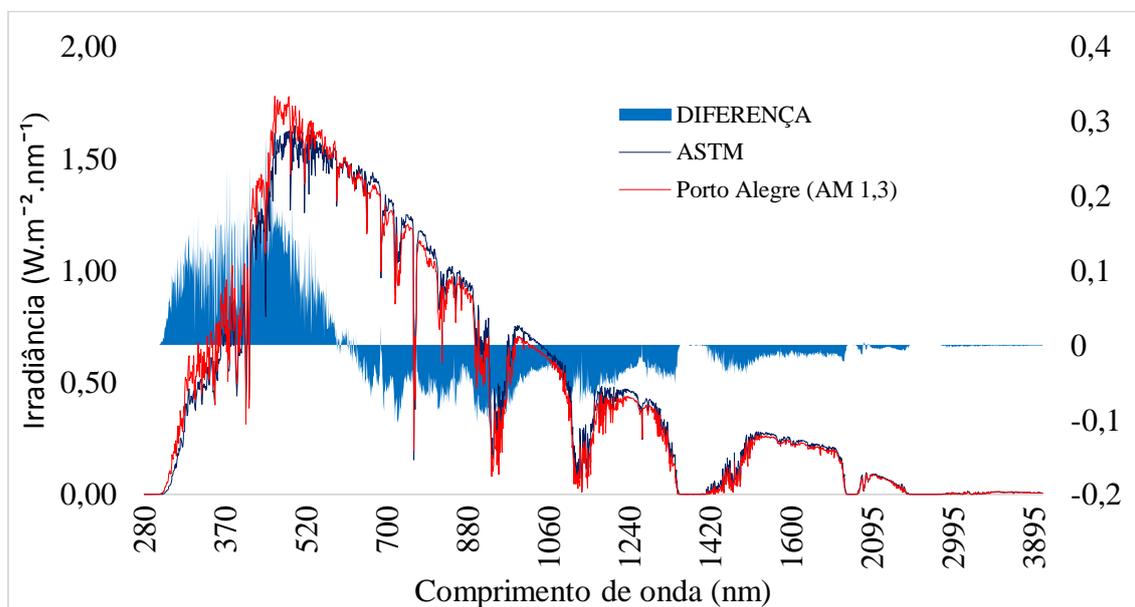


Figura 28 Comparativo entre o espectro padrão com AM de 1,5 e de Porto Alegre com massa média AM 1,3

Ao fazer uma comparação entre o resultado apresentado na figura 27 em relação a figura 28 pode-se notar que houve, em ambas, um aumento de irradiância para comprimentos de onda menores que 630 nm quando comparadas ao espectro padrão ASTM, revelando que este efeito não é apenas relacionado ao valor de AM, mas também devido à composição atmosférica da Porto Alegre Apesar de que AOD tenha valores menores para Porto Alegre do que o do espectro padrão, ambas as condições representam valores muito baixos de espessura de aerossóis. Foram realizadas comparações alterando apenas este parâmetro, comprovando que não é AOD responsável pelas diferenças espectrais. Trata-se portanto da combinação de todos os componentes, incluindo a maior quantidade de água precipitável em Porto Alegre e menor camada de ozônio. As figuras de 29 a 40 apresentam as irradiâncias espectrais mensais propostas em função da variação da massa de ar com os valores atmosféricos médios para cada mês conforme a tabela 8. Todos os espectros foram normalizados para integrar 1000 W/m^2 e o valor da diferença em relação ao espectro padrão ASTM aparece em gráfico superposto para permitir melhor visualização.

As figuras 29, 30, 31 e 38, 39, 40 correspondentes aos meses compreendidos entre outubro e março, representam os seis meses com valores efetivos de massa de ar menores do que o valor médio anual ($AM=1,3$). Baixos valores de AM implicam no desenvolvimento de distribuições espectrais com valores intensificados para comprimentos de onda menores do que 600 nm. Observam-se diferenças acima de $0,2 \text{ W/m}^2 \text{ nm}$ para essa faixa de comprimentos de onda.

As figuras 32 a 37 apresentam a irradiância espectral normalizada para os meses de abril a setembro, sendo que os valores efetivos de massa de ar variam entre 1,31 e 1,82. Especificamente nos meses de junho e julho, respectivamente figuras 34 e 35, os valores efetivos de AM para Porto Alegre (1,82 e 1,73) são nitidamente maiores que o de 1,5 utilizado pelo padrão ASTM, mas ainda assim as diferenças para a faixa de comprimentos de onda menores que 630 nm são positivas. Para estes meses, o valor de AM não justifica a diferença, mas sim o fato de que a água precipitável é bem maior gerando as diferenças negativas encaixadas nas regiões de absorção do vapor de água. As diferenças positivas aparecem parcialmente causadas pelo balanço da normalização dos espectros, pois a soma de todas as diferenças deve dar aproximadamente zero. Junho e julho são os únicos dois

meses que apresentam também diferenças positivas significativas para comprimentos de onda maiores que 630 nm.

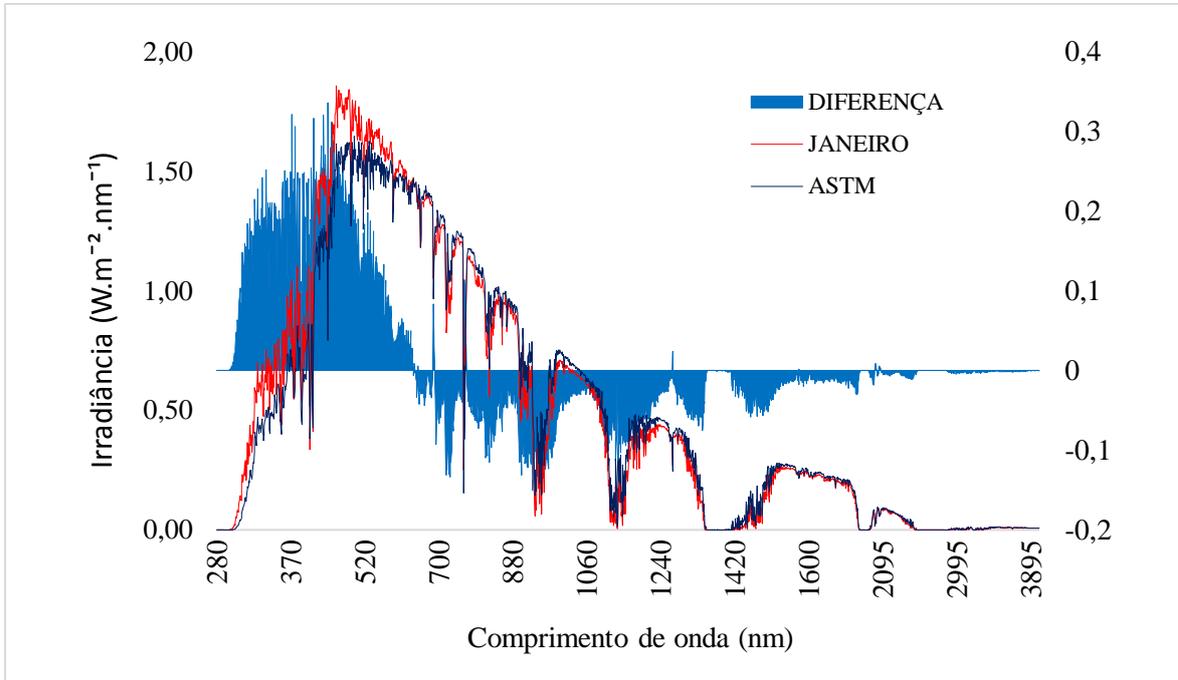


Figura 29 Resultado para o mês de janeiro com AM médio de 1,13, comparado com a norma ASTM G-173.

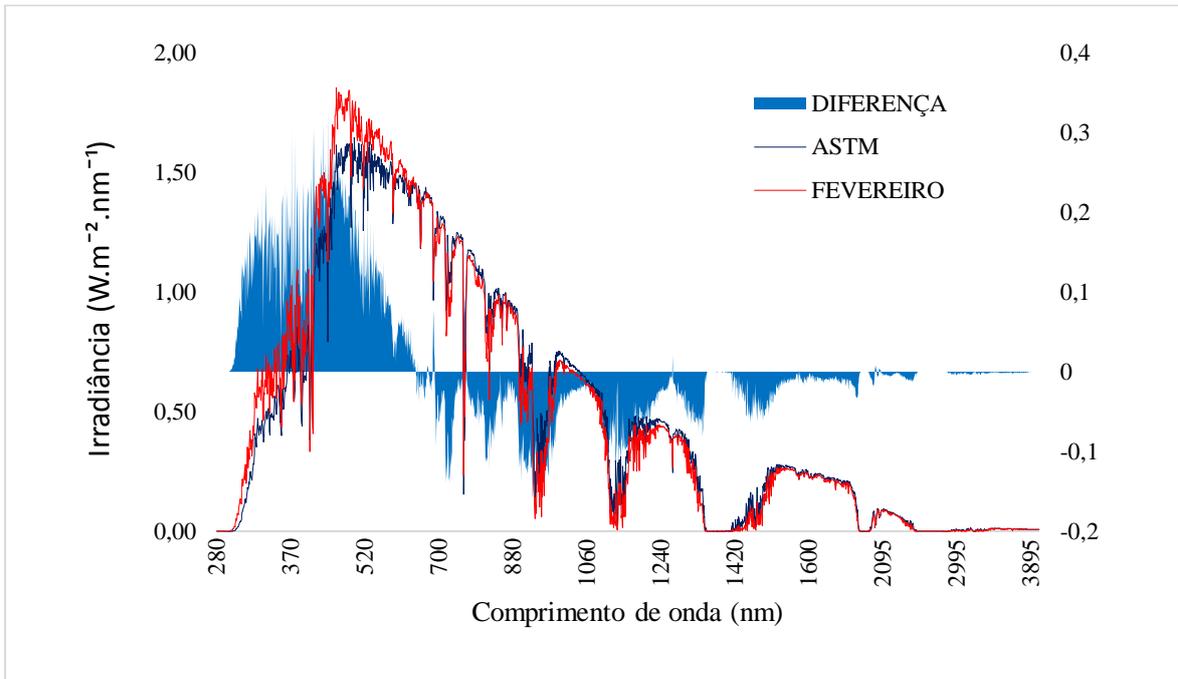


Figura 30 Resultado para o mês de fevereiro com AM médio de 1,18, comparado com a norma ASTM G-173.

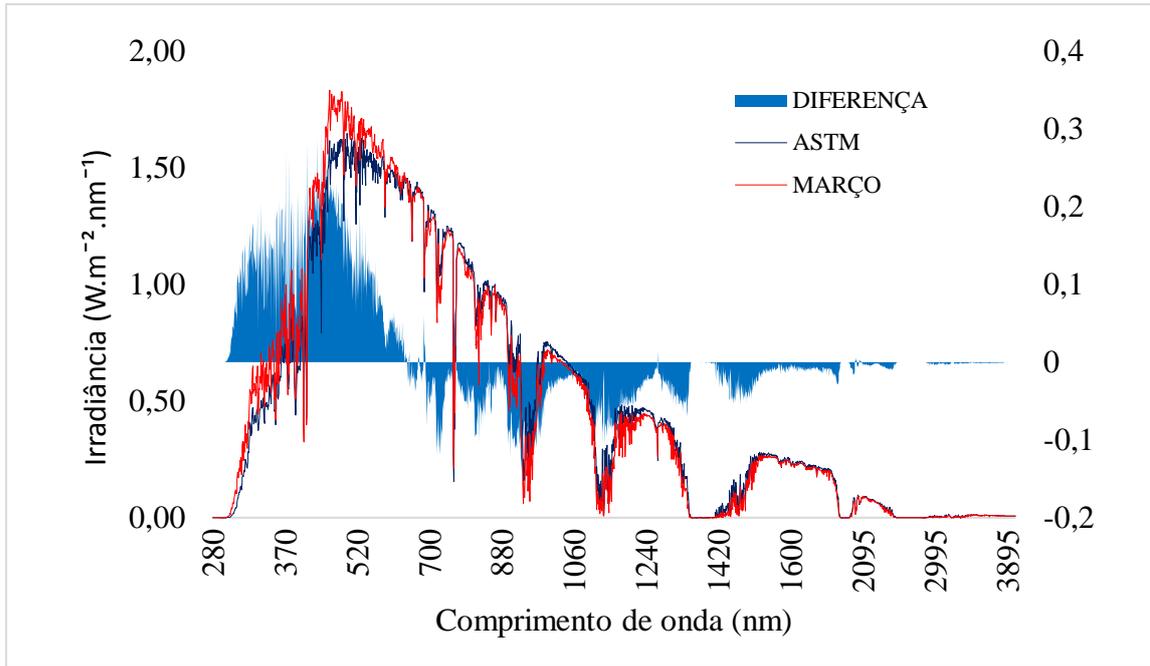


Figura 31 Resultado para o mês de março com AM médio de 1,26 comparado com a norma ASTM G-173.

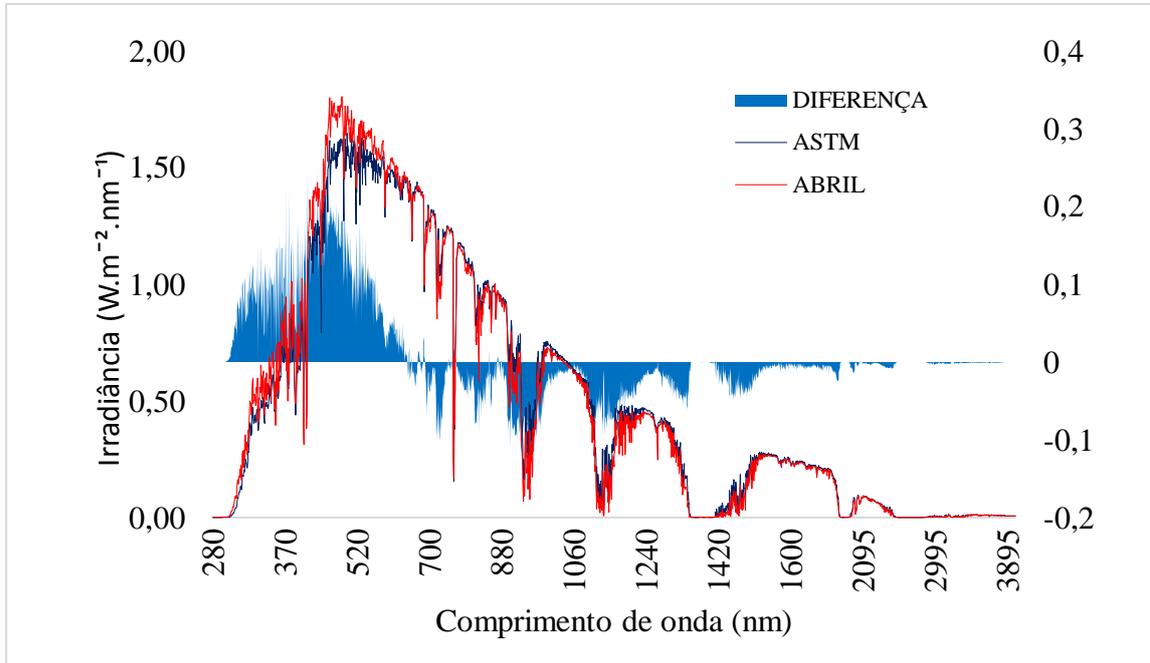


Figura 32 Resultado para o mês de abril com AM médio de 1,43, comparado com a norma ASTM G-173.

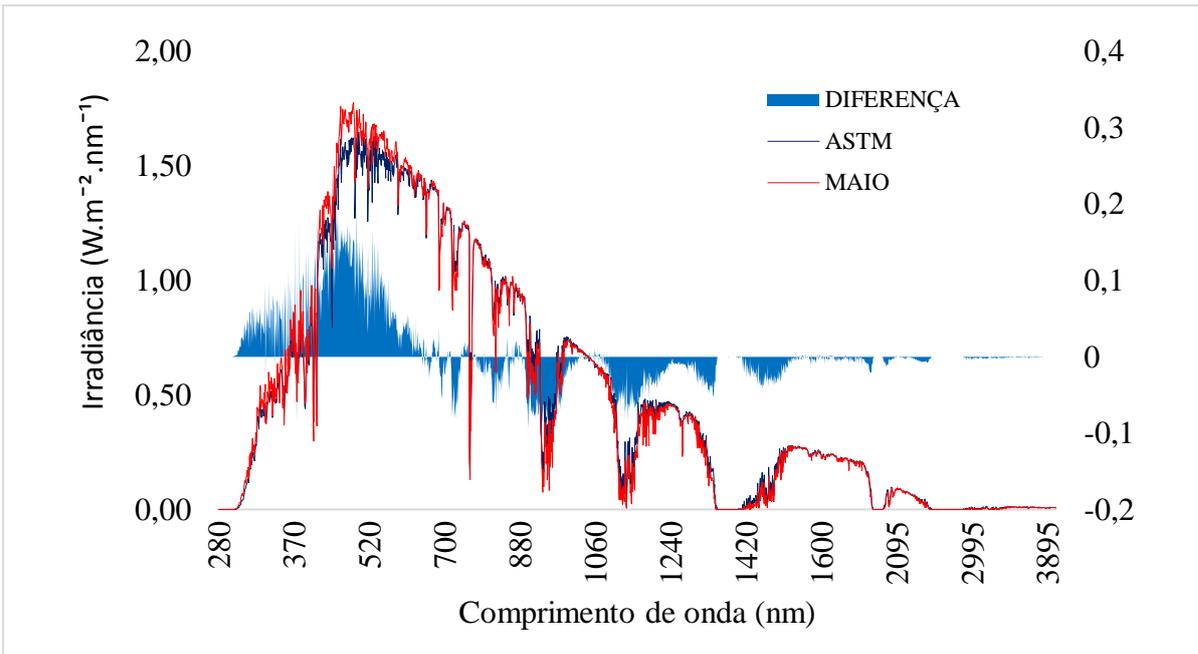


Figura 33 Resultado para maio com AM médio de 1,63, comparado com a ASTM G-173.

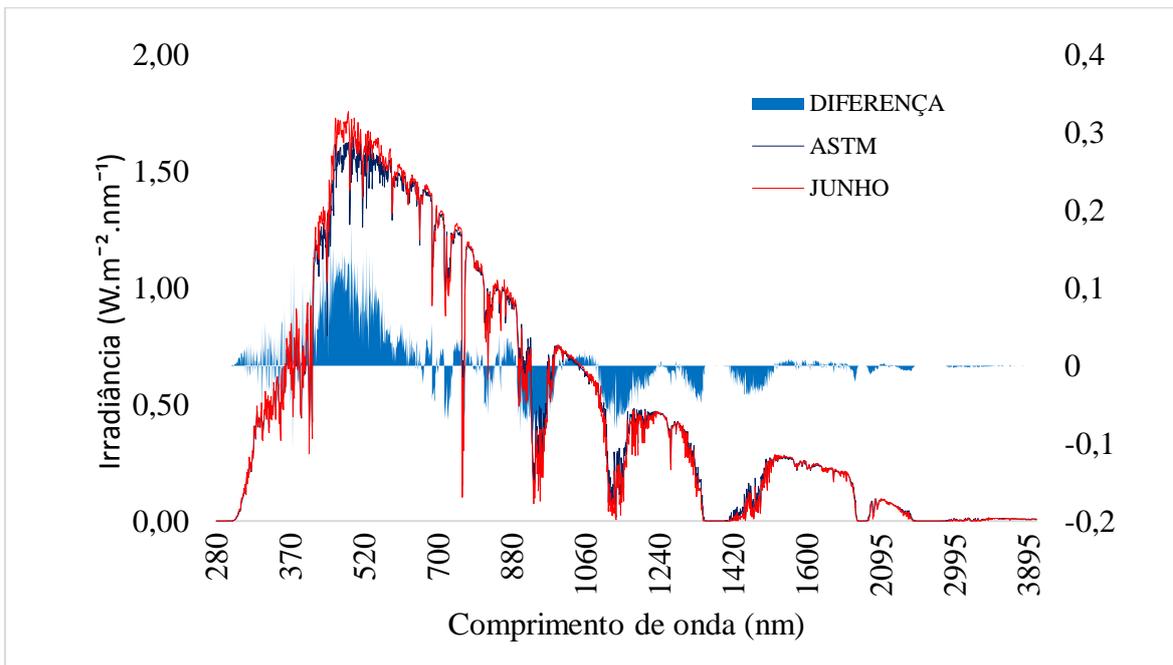


Figura 34 Resultado para o mês de junho com AM médio de 1,82, comparado com a norma ASTM G-173.

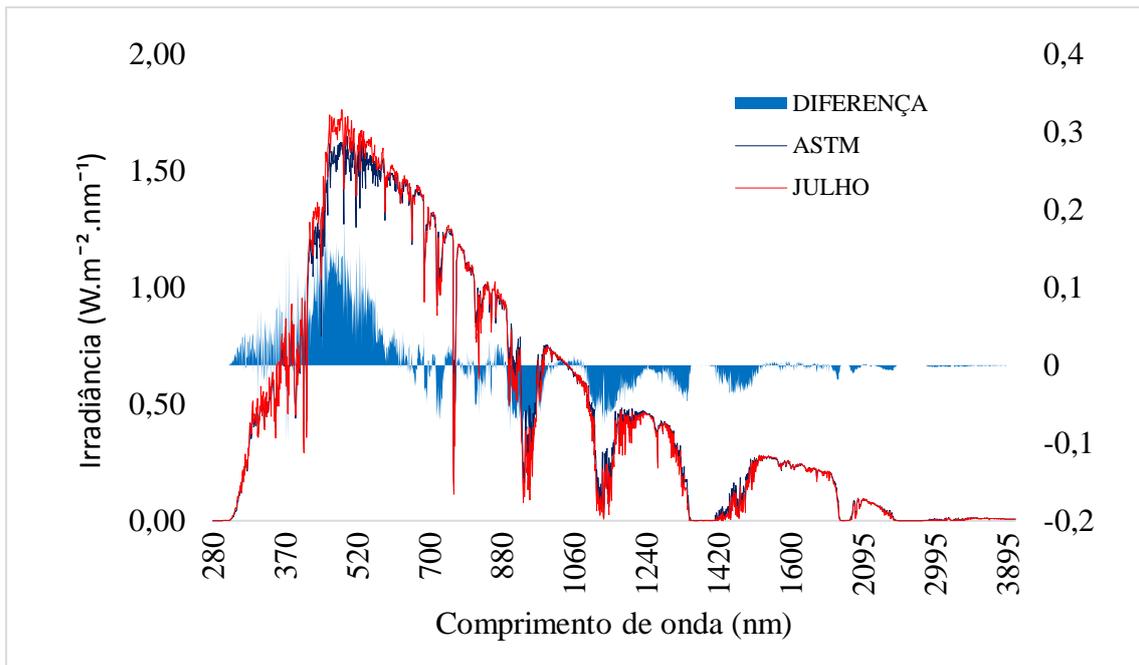


Figura 35 Resultado para julho com AM médio de 1,73, comparado com a ASTM G-173.

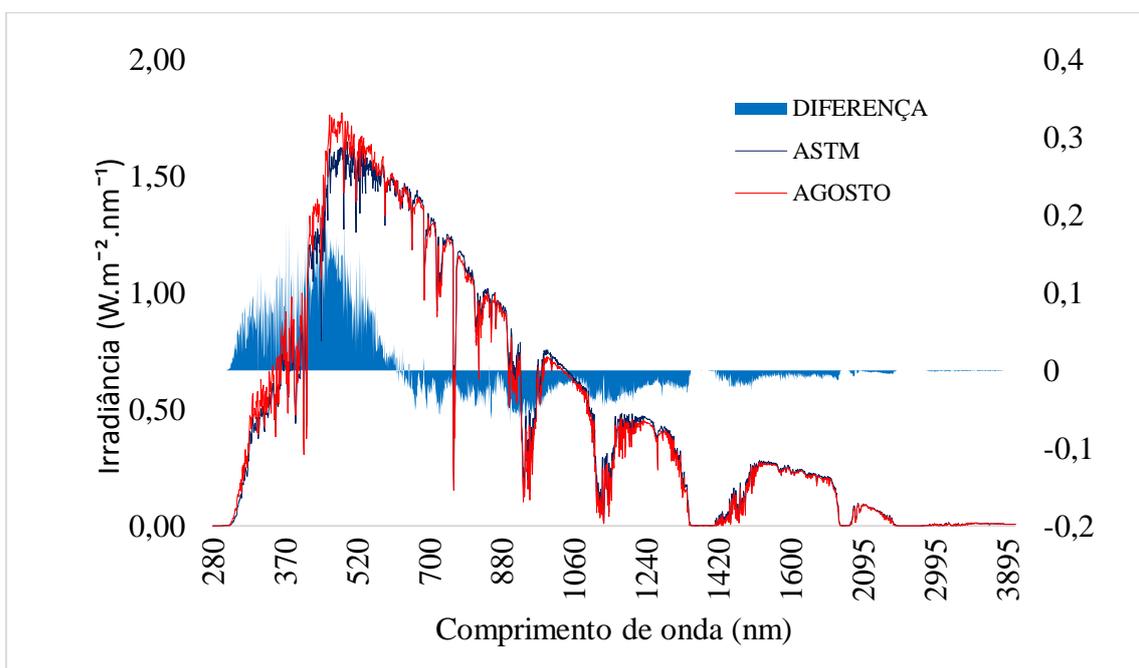


Figura 36 Resultado para o mês de agosto com AM médio de 1,49, comparado com a norma ASTM G-173.

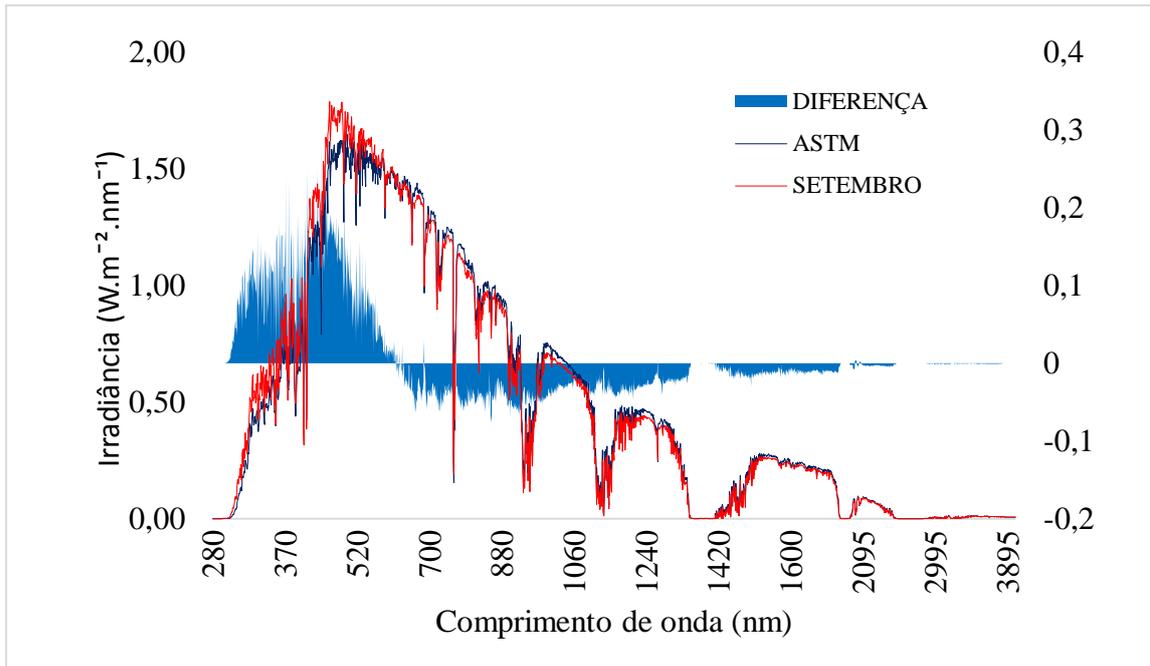


Figura 37 Resultado para o mês de setembro com AM médio de 1,31, comparado com a norma ASTM G-173.

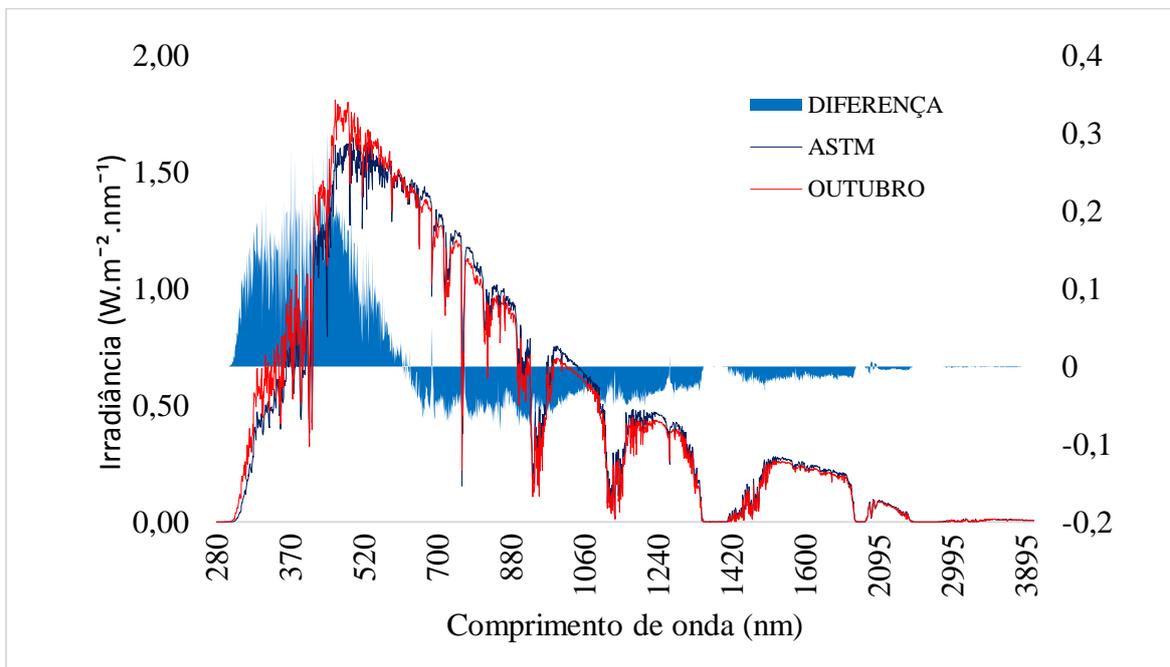


Figura 38 Resultado para o mês de outubro com AM médio de 1,20, comparado com a norma ASTM G-173.

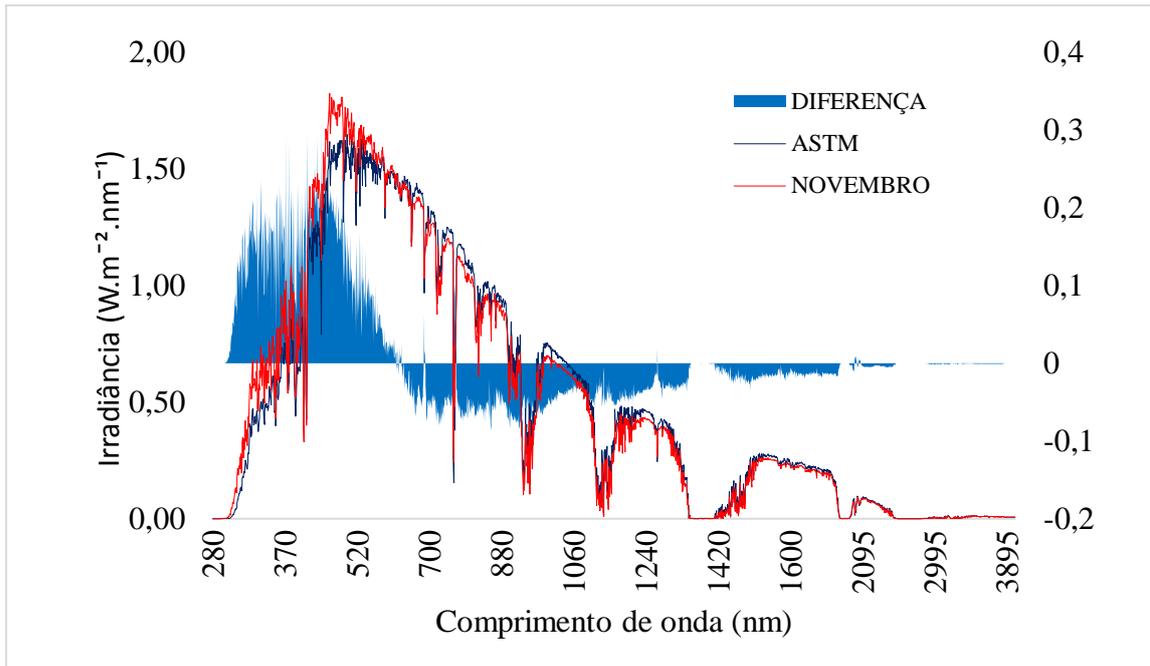


Figura 39 Resultado para o mês de novembro com AM médio de 1,14, comparado com a norma ASTM G-173.

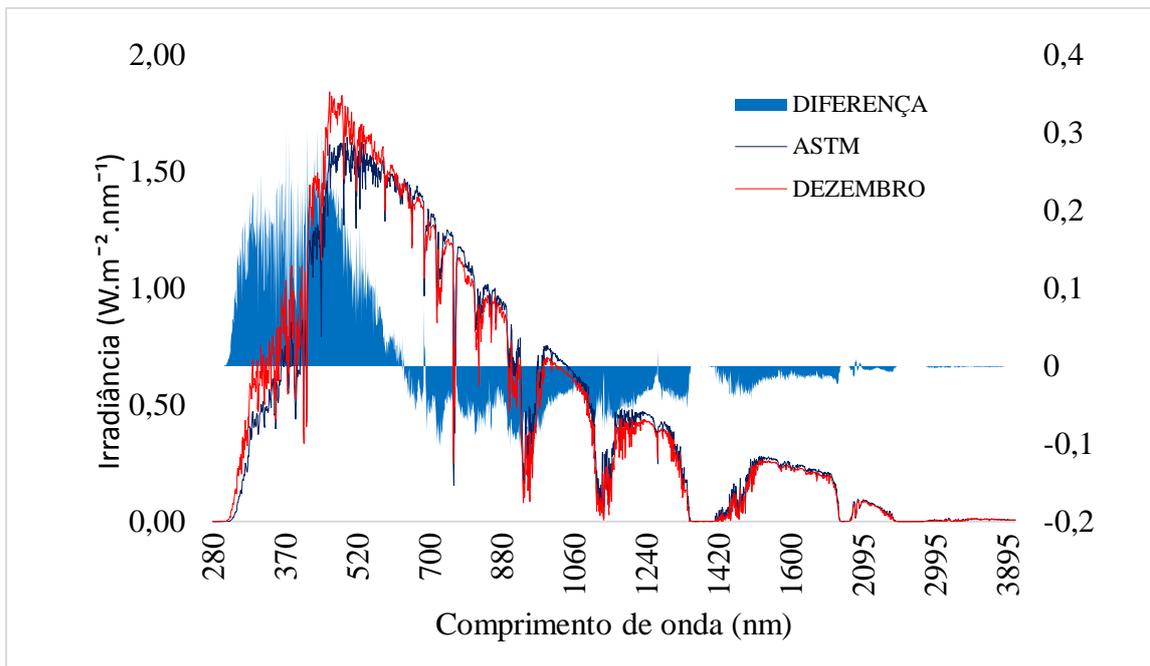


Figura 40 Resultado para o mês de dezembro com AM médio de 1,12, comparado com a norma ASTM G-173.

Para analisar o comportamento de cada tipo de célula em relação à distribuição espectral mensal foi feito o cálculo do Fator de Eficiência Espectral (Fe) referente a cada

mês, que se resume em multiplicar a resposta espectral normalizada para 1, característica intrínseca do material, pelas irradiâncias do espectro ASTM, equação 20, e pelos respectivos meses na região de Porto Alegre normalizados para 1000 W/m² de forma a se assemelhar às condições de ensaio exigidas pela norma IEC 60904-3. Desta forma obtém-se os valores de corrente de curto circuito referente a cada módulo e com isso, o valor do fator espectral para os módulos de simples junção conforme tabela

Os valores de Fe acima de 1 indicam um ganho de corrente em relação a distribuição espectral padronizada, no caso observa-se que o módulo CIGS teve uma perda de aproximadamente 1% em 5 meses, obtendo um ganho de 1% apenas no mês de junho, já o CdTe-1 nas versões mais antigas First Solar v3 e v4.1 houve um aumento de aproximadamente 2% em 5 meses. Para o CdTe-2 na versão mais recente First Solar v5 o ganho foi mais significativo para todos os meses do ano variando em torno de 2% a 4%. Este resultado é coerente com a resposta espectral das novas células de CdTe que foi enfatizada na região do azul e verde do espectro solar em relação às células mais antigas.

Tabela 11 Valores de Fe mensal para módulos de simples junção

PORTO ALEGRE	CIGS	CdTe-1	c-Si	CdTe-2
JAN	0,99	1,01	1,01	1,04
FEV	0,99	1,01	1,01	1,04
MAR	0,99	1,01	1,01	1,03
ABR	1,00	1,01	1,01	1,03
MAI	1,00	1,01	1,01	1,02
JUN	1,01	1,01	1,01	1,02
JUL	1,00	1,01	1,01	1,02
AGO	1,00	1,00	1,00	1,02
SET	0,99	1,00	1,00	1,02
OUT	0,99	1,00	1,00	1,02
NOV	0,99	1,00	1,00	1,02
DEZ	0,99	1,00	1,00	1,03

Em relação aos módulos de Silício amorfo tripla junção (a-Si), e o de dupla junção de Silício microcristalino (a-Si/ μ -Si), os resultados do Fator de Eficiência Espectral podem ser visualizados na tabela 12. Para ambos os casos o valor de Fe foi calculado através da

equação 21. No caso do a-Si, o valor de corrente mínimo foi encontrado na junção inferior e por isso selecionado para o cálculo, já para o a-Si/ μ -Si a junção μ -Si é que apresentou menor corrente. Em ambos os casos houve uma perda de corrente de até 4%.

Tabela 12 Valores de Fe mensal para módulos de multijunção

PORTO ALEGRE	a-Si/ μ -Si (Junção μ Si)	a-Si tripla junção (inferior)
JAN	0,97	0,96
FEV	0,97	0,97
MAR	0,97	0,97
ABR	0,98	0,98
MAI	0,99	0,99
JUN	1,00	1,00
JUL	0,99	0,99
AGO	0,98	0,98
SET	0,97	0,97
OUT	0,97	0,96
NOV	0,96	0,96
DEZ	0,96	0,96

5 CONCLUSÕES

Foi proposto encontrar os espectros efetivos mensais utilizando o software SMARTS2, para dias de céu limpo, ou pelo menos as horas em que há pouca cobertura de nuvens, visto que será quando haverá maior conversão de energia, e valores médios de massa de ar, com os demais dados característicos da região. Para isso, foram analisados os impactos das demais características atmosféricas no espectro, e feita uma abordagem da influência da massa de ar no Fator de Eficiência Espectral dos módulos fotovoltaicos.

Verificou-se que mesmo com alteração do período de aquisição de dados os valores característicos para Porto Alegre possuem diferença em relação à norma e que ocorreram mudanças nas características atmosféricas em relação a anos anteriores, sendo que em um estudo prévio realizado por (Haag 2012) entre 2003 e 2011, ocorreu uma mudança do valor médio de Ozônio e vapor d'água de 0,4% e 3,9% respectivamente.

A análise estatística da distribuição dos dados horários da série histórica entre 2000 e 2018 permitiu verificar que a energia convertida para cada mês do ano, considerando apenas os horários em que $k_t > 0,6$, é maior de 60% de toda a energia convertida daquele mês, indicando a forte representação destes horários. Ainda limitando os dados a esta condição foi definida a faixa de valores de AM a ser considerada para abranger pelo menos 80% da energia convertida. O valor médio da massa de ar ponderado pela energia foi então considerado para construir a distribuição espectral efetiva para cada mês do ano.

Como resultado foi obtido um espectro anual médio baseado na massa de ar de 1,5, utilizada como referência pela norma ASTM, e que comparada com o valor médio ponderado característico da região de aproximadamente 1,3, já demonstrou uma diferença principalmente na faixa até aproximadamente 630 nm. Em seguida foram gerados os espectros efetivos para cada mês do ano e, depois de normalizados para que todos integrassem 1000 W/m², repetida a comparação com a referência G-173-03.

Baseando-se nos resultados mensais pode-se confirmar que a massa de ar possui uma influência mais significativa na distribuição espectral, nas faixas mais baixas de comprimento de onda, ou seja até aproximadamente 630 nm, mas também houve para todo o ano e para cada mês uma contribuição para este deslocamento espectral devido à combinação das condições atmosféricas de Porto Alegre em relação às condições do padrão ASTM.

Também foi analisado o impacto dessa distribuição mensal nas respostas espectrais dos módulos de telureto de cádmio (CdTe) em duas versões, Silício amorfo tripla junção (a-Si), Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e uma dupla junção de silício amorfo com microcristalino (a-Si/ μ -Si), e uma de silício cristalino (c-Si). Constatou-se que para os módulos na categoria de única junção CIGS houve uma perda de aproximadamente 1%, tendo em vista que essa tecnologia responde melhor a comprimentos de onda maiores, faixa na qual não houve muita variação em relação a massa de ar. Já para o CdTe em suas versões comerciais anteriores houve um ganho de aproximadamente 1%, mas em suas versões mais atuais, FSv4.2 ou superior, o ganho subiu para valores entre 2% e 4% mostrando que seria interessante sua escolha para projetos de energia solar na região, a depender dos demais parâmetros de dimensionamento. Por último, tem-se o módulo monocristalino c-Si, que se manteve com os resultados obtidos com a norma ASTM G 173-03.

Já na categoria de múltipla junção pode-se notar um resultado interessante, o de dupla junção de silício amorfo com microcristalino (a-Si/ μ -Si) apresentou uma perda de aproximadamente 2% e já o de tripla junção menos 3%, valores esses referenciados com a que apenas o mês de junho ficou quase igual ao padrão da ASTM, e os outros onze meses ficaram levemente abaixo do esperado.

Com isso, pode-se finalizar dizendo que os objetivos deste trabalho foram alcançados mostrando que a distribuição espectral efetiva para Porto Alegre, tanto mês a mês quanto em valor médio anual, implica em um aumento da irradiância espectral para comprimentos de onda menores do que 630 nm, acarretando vantagens na utilização de tecnologias que tenham resposta espectral mais acentuada nesta faixa, como é o caso dos novos módulos de CdTe.

Para trabalhos futuros sugere-se aplicar a metodologia proposta para outras cidades do Rio Grande do Sul com os dados disponíveis no mesmo banco de dados. Além disso, outra questão a ser analisada será realizar estudos de custo/benefício levando em consideração análise econômica com diferentes tecnologias, e por fim analisar o efeito das alterações espectrais para horários com alguma nebulosidade e $k_t < 0,6$.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR , 24 novembro 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.htm>>. Acesso em: 29 novembro 2020.
- ALONSO, M. C.; GARCIA, F. S.; SILVA, J. P. **Photovoltaic Solar Energy**. [S.l.]: Observatory for Renewable Energy in Latin America and the Caribbean, 2013.
- ALONSO-ABELLA, M. E. A. **Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites**. Energy, Volume 67. [S.l.]. 2014.
- ALONSO-GARCÍA, M. C.; RUIZ, J. M.; CHENLO, F. **Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module**. Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 90, Issue 3. [S.l.]. 2006.
- ASTM G173-03, 2012. **Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface**. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/G173.htm>>. Acesso em: dez. 2020.
- BACK, C. A.; SILVA, F.J.L; CATANI, F.; LINA, G.G.; COIMBRA, I. L.; C., AMARANTE O. A.; P., ANDRADE P. E.; FREITAS, R. M.; LIMA NETO, V. F. C.; SILVEIRA, E. J. T.; ZAMBERLAM, M.; MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I.; KRENZINGER, A.; PRIEB, C. W.M.; ROSS. Atlas Solar Rio Grande do Sul. 01. ed. Porto Alegre: SMERS, v. 01, 2018. p. 144.
- BETTS, T. R. **Investigation of photovoltaic device operation under varying spectral conditions**. Tese. Loughborough University. Loughborough, p. 129. 2004.
- BONEBERG, B. S. **Estudo e análise do espectro solar simulado a partir de parâmetros atmosféricos usando o software Smarts**. Dissertação de mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, p. 98. 2019.
- BUHLER, J.; GABE, I. J. **Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais**, Anais do VII congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, Abril 2018.
- CARDIA, V. C. **Climatologia das Ondas de Calor de Porto Alegre - RS: 1961 a 2010**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.
- CASSARES, M. A. R. **Avaliação operacional de sistemas fotovoltaicos com seguimento**. Dissertação. Universidade de São Paulo. [S.l.]. 2016.
- COMMISSION., I. E. IEC 60904-3– Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance, 2008.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- FERNANDES, S. L. **Desenvolvimento de Células Solares de Perovskita Baseadas em Filmes de Óxidos Nanoestruturados**, Tese. UNESP, Instituto de Química, Araraquara, p. 132, 2016.

FIRST SOLAR. **Module Characterization Spectral Response of FS Series PV Modules**. First Solar. [S.l.]. 2017.

FRAUNHOFER, I. **Photovoltaics Report**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Freiburg. 2020.

GALINDO, E. F. A.; MELO, J. B. F. Análise da Tecnologia Fotovoltaica de CdTe para uma Central Geradora de 1MWp no Semiárido Brasileiro. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Pernambuco, v. 4, n. 2, Abril 2019.

GASPARIN, F. P.; BÜHLER, A. J.; KRENZINGER, A. **Análise da importância do fator de descasamento espectral na caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos**. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 4 e Conferência Latino-americana da ISES, 5. São Paulo. 2012.

GHENSEV, A. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. Universidade Federal de Lavras - UFLA. Lavras. 2006.

GREEN, M. A. et al. **Solar cell efficiency tables (Version 45). Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 23, n. 1, p. 1-9, 2015. [S.l.].

GROSSIORD, N. et al. Degradation mechanisms in organic photovoltaic devices *Org. Electron.*, 13 (3), 2012. pp 432-456.

GUEYMARD, C. A. . 1. **SMART2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment**. Solar Energy Center/ University of Central. Flórida, p. Report FSEC-PF-270-95. 1995.

HAAG, R. **Estimativa da distribuição Espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através da análise multi-instrumental**. UFRGS. Porto Alegre. 2012.

HAAG, R.; KRENZINGER, A. Análise da influência de parâmetros atmosféricos e locais na distribuição espectral da radiação solar. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 1, n. 1, p. 23-33, setembro 2010.

HATHAWAY, D. H. **The solar cycle**. *Living Reviews In Solar Physics*, v.7, n. 1, p. 1-81. [S.l.]. 2010.

HECKTHEUER, L. A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.. Porto Alegre. 2001.

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. PV EDUCATION. **Properties of sunlight**. Disponível em: <<http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/photon-flux>>. Acesso em: set. 2020.

INFOLINK, 2017. Disponível em: <<https://www.infolink-group.com/en/solar/feature-china-exports/2H20-module-trends-from-a-perspective-of-China-exports>>. Acesso em: 2020.

IPCC. **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change**. PCC Climate Change 2014. Genève: IPCC, p. 155. 2015.

- IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Academic Press. Toronto, p. 408p. 1983.
- IRENA INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. PV World Installed Capacity. Disponível em: <<https://www.irena.org/solar>>. Acesso em: 2020.
- KAUFMAN, Y. J. et al. Will aerosol measurements from Terra and Aqua polar orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties. **Geophysical Research Letters**, v. 27, p. 3861-3864, 2000.
- KING, R. R. et al., Lattice-matched and metamorphic GaInP/GaInAs/Ge concentrator solar cells. **World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, v. 1, p. 622-625, 2003.
- KÖHLER, A.; BÄSSLER, H. **Electronic processes in organic semiconductors: an introduction**. John Wiley & Sons. Weinheim. 2015.
- KRENZINGER, A.; PRIEB, C. W. M.; GASPARIN, F. P. **Mapas de Produtividade Fotovoltaica para o Rio Grande do Sul (Brasil)**. Lisboa: LNEG: Livro de Comunicações do XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Ibero-americano de Energia Solar., 2020.
- LANG, F. A Lei de Wien não prevê a cor da luz solar?, 2013. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=a-lei-de-wien-nao-preve-a-cor-da-luz-solar>>. Acesso em: 2020.
- LECKNER, B. The spectral distribution at the Earth's surface elements of a model. **solar Energy**, n. 20, p. 143-150, 1978.
- LIU, K. N. **Introduction to atmospheric radiation**. 2. ed. San Diego: Academic press, 2002.
- LITJENS, G. **Investigation of Spectral Effects on Photovoltaic Technologies by Modelling the Solar Spectral Distribution**. Freiburg. 2013.
- MARION, B. **Preliminary Investigation of Methods for Correcting for Variations in Solar Spectrum under Clear Skies**. National Renewable Energy Laboratory. Colorado. 2010.
- MARK, O. PVTECH. **First Solar shipped 5.5GW of CdTe thin film modules in 2020**. Disponível em: <www.pv-tech.org/first-solar-shipped-5-5gw-of-cdte-thin-film-modules-in-2020>. Acesso em: 2020.
- MARKOSKI, P. R. **Modelagem atmosférica (8 – 12 µm) de ambientes úmidos aplicada no processo de correção dos dados de emissividade do sensor ASTER**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL- UFRGS. [S.l.]. 2015.
- MYERS, D.; GUEYMARD, C. **Description and availability of the SMARTS spectral model for photovoltaic applications**. Annual Meeting of SPIE. Denver, CO. 2004.
- MYERS, D. **Evaluation of the performance of the PVUSA rating methodology applied to DUAL junction PV technology**. In: AMERICANSOLAR ENERGY SOCIETY ANNUAL CONFERENCE, 2009, Buffalo. Proceedings. Springfield: NREL, 2009. p. 1-7.
- NASA. **n.d.** Disponível em: <Disponível em: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>>. Acesso em: dez. 2020.

NEVES, G. M. **INFLUÊNCIA DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. INPE. São José dos Campos. 2016.

NOAA. **Trends in CO₂**. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_trend.html>. Acesso em: dez. 2020.

OSARUMEN, O. O.; EKERE, N.N.; OLAGBEGI, P.O.; EMEKA, H.A.. A review of photovoltaic module technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1225-1238, 2017.

PANDEY, A. et al. Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications. **Renew.Sustain Energy**, v. 53, p. 859-884, 2016.

PARKINSON, C. **Aqua: an earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables**. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 41. [S.l.], p. 173-183. 2003.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; RÜTHER, R.; LIMA, F.J.L; ABREU, S. L. DE ; GONÇALVES, A.R.; TIÊPOLO, G.M.; SOUZA, J.G.; PRREIRA, S.V.. Atlas Brasileiro de Energia Solar. **INPE**, São José dos Campos, v. 1, n. 2, p. 84, 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL–CRESESB, 2014. 529 p.

PORTAL Solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 30 novembro 2020.

RAMPINELLI, G. A.; BÜHLER, A. J. Análise de diferentes tecnologias fotovoltaicas para instalações residenciais no sul do Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 16, p. 09-12, 2012.

REMER, L. A. et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. **Journal of The Atmospheri Sciences**, v. 62, n. CLAMS special Sction, p. 947-973, 2005.

SANTOS, F. H.; BÜHLER, A. J.; FILHO, N. B.; ZAMBRA, D. A. B. A IMPORTÂNCIA DA DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO LOCAL PARA UM CORRETO DIMENSIONAMENTO DAS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO. **ASADES**, v. 19, p. pp11.43-11.54, 2015.

SZOSTAK, R. et al. **Understanding perovskite formation through the intramolecular exchange method in ambient conditions**. *Journal of Photonics for Energy*. [S.l.]. 2017.

TODA Matéria. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/caracteristicas-do-sol/>>. Acesso em: 30 novembro 2020.

TOSHNIWAL, ; KHERAJ, V. Development of organic-inorganic tin halide perovskites. **Solar energy**, v. 149, p. 54-59, 2017.

VILELA, W. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. Instituto Nacional de pesquisas espaciais (INPE). São José dos Campos, p. 177. 2010.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Érica, 2012.

VM., F. **Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004. 303-334.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science - An Introductory Survey**. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, v. 92, 2006. 483 p. ISBN 0-12-732951-X.

WILSON ET AL. The 2020 photovoltaic technologies, Roadmap. J. Phys. D: Appl. Phys. 53 493001.

YAMASOE, M. A. . C. M. P. **Processos radiativos na atmosfera: fundamentos**. Oficina de Textos. São Paulo, p. 142. 2016.

YAMASOE, M. A. **Apostila da disciplina meteorologia física II**. São Paulo: USP, 2006.