

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO

BRUNA STEIL BONEBERG

**ESTUDO E ANÁLISE DO ESPECTRO SOLAR SIMULADO A PARTIR DE
PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS USANDO O SOFTWARE SMARTS**

SÃO LEOPOLDO
2019

Bruna Steil Boneberg

ESTUDO E ANÁLISE DO ESPECTRO SOLAR SIMULADO A PARTIR DE
PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS USANDO O SOFTWARE SMARTS

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan – PPG Engenharia Mecânica - Unisinos

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander – PPG Engenharia Mecânica – Unisinos

Prof. Dr. Arno Krenzinger – PROMEC - UFRGS

SÃO LEOPOLDO
2019

B712e Boneberg, Bruna Steil.

Estudo e análise do espectro solar simulado a partir de parâmetros atmosféricos usando o software SMARTS / Bruna Steil Boneberg. – 2019.

97 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

“Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias.”

1. Energia solar. 2. Radiação. 3. Distribuição espectral.
4. Atenuação atmosférica. I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

AGRADECIMENTOS

Antes do início da explanação deste trabalho, alguns agradecimentos se fazem necessários.

Primeiramente, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), através do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares (PROSUP), pela bolsa de estudos, sem a qual este trabalho não seria possível.

À Universidade do Vale do Rio dos Sinos, por disponibilizar este mestrado em seu quadro de cursos.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e ao Msc. Guilherme Neves pela disponibilidade de dados do Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM/INPE de Cachoeira Paulista – SP.

À Agência Espacial Norte Americana (NASA) pela disponibilidade de dados dos satélites TERRA, AQUA e AIRS pelo processamento remoto através da plataforma GIOVANNI.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica que tão graciosamente compartilharam os seus conhecimentos

E, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. João Batista Dias, por todo o apoio prestado durante a realização desta dissertação.

RESUMO

Ao longo dos anos, houve um aumento da taxa de crescimento populacional e melhoria da qualidade de vida. Na busca por alternativas energéticas para atender a atual e a futura demanda por energia, a energia solar fotovoltaica surge como uma solução. O presente trabalho apresenta o estudo e a análise de espectros solares simulados que visam mostrar que os valores medidos em solo pelo espectrorradiômetro (Cachoeira Paulista / São Paulo) são similares aos valores obtidos pelo software de simulação SMARTS, assim como identificar se há variações nas curvas obtidas para dezoito municípios do Estado do Rio Grande do Sul. A metodologia consiste na comparação e análise de dados medidos em campo com dados simulados (SMARTS v.2.9.5) para um município do Estado de São Paulo; e na obtenção de valores de irradiância instantânea (global e componente direta) para os meses de solstícios e equinócio considerando: inclinação com a superfície igual a zero, massa de ar para às 12 horas do dia médio do mês analisado e os valores médios de parâmetros atmosféricos do mês. Os resultados relacionados à comparação entre os dados medidos por um espectrorradiômetro e os dados simulados pelo SMARTS mostram uma confiabilidade de $87,33 \pm 2\%$. Nas análises de variação percentual, pode-se perceber que dentre os comprimentos de onda de 390 a 770 nm há menor oscilação entre os dados simulados e medidos em solo. Ainda, os valores irradiância instantânea obtido para os municípios não apresentaram variações significativas, o que era o esperado considerando o mapa solar do Estado do Rio Grande do Sul, e portanto, foi gerado um espectro a partir da média desses dezoito municípios. Como conclusão, não há semelhança entre os valores dos parâmetros da atmosfera utilizados pelos espectros de referência dentro dos valores encontrados para o Estado de São Paulo, Estado do Rio Grande do Sul, ou qualquer parte do território brasileiro e finalmente, as simulações mostraram-se confiáveis.

Palavras-chave: Energia Solar. Radiação. Distribuição Espectral. Atenuação Atmosférica.

ABSTRACT

Over the years, there has been an increase in population growth rate and improved quality of life. In the search for energy alternatives to meet current and future demand for energy, photovoltaic solar energy emerges as a solution. So, the present work presents the study and analysis of simulated solar spectra aiming to show that the values measured in the soil by the spectroradiometer (Cachoeira Paulista / São Paulo) are similar to the values obtained by the SMARTS simulation software, as well as to identify if there are variations in the curves obtained for eighteen cities in the State of Rio Grande do Sul. The methodology consists in comparing and analyzing field-measured data with simulated data (SMARTS v.2.9.5) for a city in the State of São Paulo; and obtaining instantaneous irradiance values (global and direct component) for the solstices and equinox months considering: slope with the surface equal to zero, air mass at 12 o'clock on the average day of the month under analysis and the mean atmospheric parameters values of the month. The results related to the comparison between the data measured by a spectroradiometer and the data simulated by SMARTS show a consistency rate of $87,33 \pm 2\%$. In the analysis of variation, it can be seen that among the wavelengths from 390 to 770 nm there is less oscillation between the simulated data and measured in soil. Still, the instantaneous irradiance values obtained for the municipalities did not show significant variations, which was expected considering the solar map of the State of Rio Grande do Sul, and therefore, a spectrum was generated from the average of these eighteen cities. In conclusion, there is no similarity between the values of the atmosphere parameters used by the reference spectra within the values found for the State of São Paulo, State of Rio Grande do Sul, or any part of the Brazilian territory and finally, the simulations were shown reliable.

Keywords: Solar energy. Radiation. Spectral Distribution. Atmospheric Attenuation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Inserção da energia fotovoltaica no Brasil.	22
Figura 2.2 Mapa de localização do Estado do Rio Grande do Sul.	22
Figura 2.3 Macrozoneamento do Estado do Rio Grande do Sul.....	23
Figura 2.4 Relação Terra-Sol.....	25
Figura 2.5. Ângulos de Solarimetria.....	26
Figura 2.6 Movimento de Translação da Terra ao redor do Sol.	27
Figura 2.7 Exemplo de carta solar elaborado para a cidade de Porte Alegre.	28
Figura 2.8 Variação da irradiância normal no topo da atmosfera ao longo de um ano no hemisfério Sul.	29
Figura 2.9 Variação da irradiância em superfície horizontal ao longo de um dia qualquer em Setembro e Março.	30
Figura 2.10 Espectro eletromagnético e a energia do fóton a luz visível.	31
Figura 2.11 Espectro eletromagnético da radiação solar.	33
Figura 2.12 Distribuição espectral das componentes da radiação solar.....	34
Figura 2.13 Camadas e constituintes atmosféricos.....	36
Figura 2.14 Transmitância atmosférica e moléculas absorvedoras responsáveis pelas bandas de absorção no intervalo espectral de 1 a 14 μm	40
Figura 2.15 Efeito da massa de ar no espectro solar de referência.	42
Figura 2.16 Espectro de Referência ASTM G-173.....	43
Figura 2.17. Comportamento da radiação ao atravessar um meio absorvedor.	44
Figura 3.1 Local onde foi realizado as medições em solo pelo SAE.....	50
Figura 3.2 Interface Óptica desenvolvida em laboratório para a coleta dos dados espectrais.	51
Figura 3.3 Etapas da análise de Dados da Plataforma GIOVANNI.	52
Figura 3.4 Exemplo da seleção em mesoescala do Estado do Rio Grande do Sul via Plataforma GIOVANNI.....	53
Figura 3.5 Sistema de satélites da Terra.	55
Figura 3.6 Espectros medidos para determinados dias do mês de Março do ano de 2016 para a cidade de Cachoeira Paulista – SP (latitude: 22° 34' S e longitude: 45° 00' W).	57
Figura 3.7 Série temporal, média por área de Coluna total de ozônio (somente durante o dia). Sensor AIRS, Satélite AQUA.....	59
Figura 3.8 Série temporal, média por área de vapor por coluna de água precipitado.....	59
Figura 3.9 Distribuição dos Municípios.....	65

Figura 4.1 (a) Mapa de mesoescala de valores médios de vapor de água próximo ao Infravermelho (MODIS-TERRA) registrado às 10h30min (2008 – 2018) e (b) Mapa de mesoescala de valores médios de vapor de água próximo ao Infravermelho (MODIS-AQUA) registrado às 13h30min (2008 - 2018).....	66
Figura 4.2 Mapa de mesoescala de valores médios da quantidade de ozônio na atmosfera obtido pelo sensor AIRS a bordo do satélite AQUA, registrado às 10h30min, dentro o período de 2008 a 2018.....	67
Figura 4.3 Mapas de mesoescala dos valores médios para dióxido de carbono obtidos pelo sensor AIRS – AQUA, registrado às 13h30min para o ano (a) 2010 e (b) (2016).....	68
Figura 4.4 Mapas de valores médios diários para a espessura ótica de aerossóis pelo (a) sensor MODIS-AQUA) registrado às 13h30min dentro o período de 2008 a 2018 e (b) sensor MODIS-TERRA) registrado às 10h30min dentro o período de 2008 a 2018.....	69
Figura 4.5 Comparação entre os espectros simulados e espectros medidos no município de Cachoeira Paulista/RS.....	70
Figura 4.6 Diferença percentual entre os espectros medidos pelo espectrorradiômetro no LIM/INPE e os espectros simulados pelo SMARTS.....	71
Figura 4.7 Correlação X-Y entre os espectros medidos em solo no LIM/INPE e os espectros simulados pelo SMARTS.	73
Figura 4.8 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 08 de Janeiro e 06 de Março de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.	74
Figura 4.9 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 22 de Abril e 11 Junho de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.	75
Figura 4.10 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 18 de Junho e 07 de Julho de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.	75
Figura 4.11 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 23 de Setembro e 24 de Outubro de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.	75
Figura 4.12 Espectros mensais São Leopoldo/RS em relação ao espectro de referência (componente direta).	77

Figura 4.13 Espectro solar do Estado do Rio Grande do Sul da global em comparação ao espectro de referência global válido para às 12 horas dos dias médios: (a) 16 de Março, (b) 11 de Junho, (c) 15 de Setembro e (d) 10 de Dezembro.....	80
Figura 4.14 Espectro solar do Estado do Rio Grande do Sul da componente direta em comparação ao espectro de referência da componente direta válido para às 12 horas dos dias: 16 de Março, 11 de Junho, 15 de Setembro e 10 de Dezembro.....	81
Figura 4.15 Variação de percentual para o dia 11 de junho entre a média dos 18 dezoito espectros instantaneos gerados às 12 horas para o Estado do Rio Grande do Sul em comparação ao espectro de referência ASTM G173-04..	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Representação da energia do espectro da radiação solar.	32
Tabela 2.2 Composição atmosférica por constituintes permanentes de uma atmosfera padrão.	35
Tabela 2.3 Composição atmosférica por constituintes variáveis de uma atmosfera padrão.....	36
Tabela 2.4 Parâmetros atmosféricos da Norma ASTM G-173-03.....	43
Tabela 2.5 Estado da Arte.....	47
Tabela 3.1 Mesoescala utilizada para as regiões de interesse.....	54
Tabela 3.2 Características dos Satélites TERRA E AQUA.....	55
Tabela 3.3 Período dos parâmetros atmosféricos coletados para a cidade de Cachoeira Paulista/SP.	59
Tabela 3.4 Dia médio do mês.	61
Tabela 3.5 Parâmetros Atmosféricos de Cachoeira Paulista para o ano de 2016.	61
Tabela 3.6 Valores de referência do APE para o espectro padrão 1.5 AM.	64
Tabela 3.7 Relação de municípios e zona de cobertura.....	65
Tabela 4.1 Valor médio da variação percentual dentre espectros medidos e simulados.	72
Tabela 4.2 Valor médio de variação percentual entre espectros simulados e o espectro de referência ASTM G176-03.	76
Tabela 4.3 Valores do Índice APE para os dias analisados em Cachoeira Paulista/SP.....	76
Tabela 4.4 Valores do Índice APE em São Leopoldo/RS.	78
Tabela 4.5 Irradiância instantânea global para o dia médio do mês às 12 horas.	79
Tabela 4.6 Irradiância instantânea da componente direta para o dia médio do mês às 12 horas.	79
Tabela 4.7 Valores do Índice APE do Estado do Rio Grande do Sul.....	82

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica Energia
ASTM	American Society for Testing and Materials
GaAs	Arseneto de Gálio
InGaAs	Arseneto Índio Gálio
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
CIGS	Disseleneto de Cobre – Índio – Gálio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
APE	Energia Média dos Fótons
InGaP	Fosfeto de Índio Gálio
InP	Fosfeto de Índio
Ge	Germânio
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
TSI	Irradiância Solar Total
LIM	Laboratório de Instrumentação Meteorológica do INPE
AM	Massa de ar
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MERRA	Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications
NASA	National Aeronautics and Space Administration
AOD	Profundidade Óptica dos Aerossóis
Si-a	Silício amorfo
Si-c	Silício cristalino
Si-mono	Silício monocristalino
Si-poli	Silício policristalino
SMARTS	Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	Standard Test Conditions
CdTe	Telureto de Cádmiio

LISTA DE SÍMBOLOS

$T_{o\lambda}$	absorção pelo O ₃
$T_{g\lambda}$	absorção pelo NO ₂ e mistura de gases
$T_{w\lambda}$	absorção pelo vapor da água
γ	ângulo de azimute (°)
θ_z	ângulo de zênite (°)
ω	ângulo horário (°)
θ	ângulo solar (°)
χ	coeficiente de turbidez (adimensional)
k_λ	coeficiente de extinção para uma radiação de comprimento de onda λ .
λ	comprimento de onda (nm)
Gsc	constante solar (1367 W/m ²)
h	constante de planck (6,626176 x 10 ⁻³⁴ J s)
δ	declinação solar (°)
z	distância na direção vertical (cm)
E _g	energia da Banda Proibida (eV)
α	expoente da turbidez (adimensional)
$T_{R\lambda}$	espalhamento Rayleigh
$T_{a\lambda}$	extinção por aerossol
ν	frequência da onda (Hz)
ϕ	fluxo de fótons (m ⁻² s ⁻¹).
Hs	horário local (h)
β	inclinação do módulo em relação ao plano horizontal (°)
E_λ	irradiância espectral (W/m ²)
$E_{bn\lambda}$	irradiância extraterrestre (W/m ²)
φ	latitude local (°)
ρ_w	massa específica de vapor de água (kg.cm ⁻³)
j_λ	totalidade da parcela da radiação que é absorvida e espalhada no meio de propagação da onda.
c	velocidade da luz (299792458 m/s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	15
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 Justificativa.....	19
1.4 Estrutura da Dissertação.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Energia Solar.....	21
2.2 Estado do Rio Grande do Sul.....	22
2.3 Radiação e Distribuição Espectral	24
2.3.1 Radiação Solar	24
2.3.2 Relação Sol – Terra.....	26
2.3.3 Movimento de Translação e Rotação da Terra ao redor do Sol.....	27
2.3.4 Irradiância Solar.....	29
2.3.5 Espectro Eletromagnético	30
2.3.6 Distribuição Espectral	32
2.3.7 Componentes da Distribuição Espectral	34
2.4 Processos de Interação com a Atmosfera Terrestre	35
2.4.1 Constituintes Atmosféricos	35
2.4.1.1 Oxigênio (O_2).....	36
2.4.1.2 Dióxido de Carbono (CO_2)	36
2.4.1.3 Ozônio (O_3)	37
2.4.1.4 Vapor da água (H_2O).....	37
2.4.1.5 Aerossóis	38
2.4.2 Espalhamento Atmosférico	39
2.4.3 Absorção, Refletância e Transmitância	39
2.4.4 Massa de Ar	41
2.5 Espectro de Referência.....	42
2.6 Equação de Transferência Radioativa.....	44
2.7 Software SMARTS	45
2.8 Estado da Arte.....	46

3 METODOLOGIA	50
3.1 Sistema de Aquisição de Dados em Solo	50
3.1.1 Condições Experimentais para Medição em Solo.....	51
3.2 Sistema de Aquisição de Dados via Plataforma GIOVANNI	52
3.2.1 Plataforma GIOVANNI.....	52
3.2.2 Satélites	54
3.2.2.1 <i>Sensor MODIS</i>	55
3.2.2.2 <i>Sensor AIRS</i>	56
3.2.3 Sistema de Reanalise MERRA	57
3.3 Tratamento e Agrupamento de Dados.....	57
3.3.1 Tratamento e Agrupamento de Dados em Solo	57
3.3.2 Tratamento e Agrupamento de Dados para Simulação.....	58
3.3.2.1 <i>Dados Diários</i>	58
3.3.2.2 <i>Dados Mensais</i>	60
3.3.2.3 <i>Mapas Temporais</i>	60
3.3.2.4 <i>Valores calculados de Massa de Ar (AM)</i>	60
3.3.2.5 <i>Parâmetros Atmosféricos de Cachoeira Paulista/SP</i>	61
3.4 Análise de Dados	62
3.4.1 Variação Percentual	62
3.4.2 Valor Médio	63
3.4.3 Índice APE	63
3.5 Cruzamento de dados	64
4 RESULTADOS.....	66
4.1 Mapas Temporais do Território Brasileiro com Parâmetros Atmosféricos	66
4.1.1 Vapor da água	66
4.1.2 Ozônio.....	67
4.1.3 Dióxido de Carbono.....	68
4.1.4 Aerossóis.....	68
4.2 Validação dos espectros simulados para Cachoeira Paulista/SP.....	69
4.2.1 Medição em Solo vs Simulação SMARTS	69
4.2.2 Correlação entre valores medidos e simulados.....	72
4.2.3 Variação entre os espectros simulados com o da norma ASTM G-176-03	74
4.2.4 Avaliação do APE.....	76
4.3 Espectros Mensais Simulados para São Leopoldo/RS.....	77

4.3.1 Avaliação do Índice APE para São Leopoldo/RS.....	78
4.4 Análise dos Resultados no Estado do Rio Grande do Sul	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1 Sugestões de trabalhos futuros	85
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICE A – EXEMPLO DE CÁLCULO DAS MASSAS DE AR	91
APÊNDICE B – EXEMPLO DE CÓDIGO INPUT DO SMARTS DE CACHOEIRA PAULISTA/SP	94
APÊNDICE C – EXEMPLO CÓDIGO OUTPUT DO SMARTS DE CACHOEIRA PAULISTA/SP	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Ao longo dos anos, com o aumento da taxa de crescimento populacional e a melhoria da qualidade de vida da população, tornou-se essencial a procura por fontes alternativas para a geração de energia que possam atender a atual e crescente demanda de energética global. Dentre as energias renováveis, o campo da energia solar vem ganhando destaque por poder ser aproveitada em praticamente qualquer lugar da superfície terrestre e inclusive no espaço, além de ser considerada uma alternativa limpa e sustentável, pois sua conversão de energia não envolve emissões de gases de efeito estufa.

Atualmente, o consumidor que gera a sua própria energia, economiza e ajuda o Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil. Para a geração distribuída solar fotovoltaica, a compensação da energia injetada na rede se dá por duas componentes, ou seja, a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e a Tarifa de Energia (TE). Dentre os gatilhos propostos pela revisão da REN 482/2012, apenas a componente da TE incidiria sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede, as demais componentes tarifárias incidiriam sobre toda a energia consumida da rede, ou seja, ocorre uma redução drástica dos benefícios. Além disso, consumidores que não usufruírem de tais amparos até o final de 2019, terão seu direito adquirido reduzido de 25 anos para 10 anos, junto a concessionária. Com a perda destes estímulos, as pesquisas que visam o aumento da eficiência global de sistemas fotovoltaicos poderão colaborar e muito no desenvolvimento do mercado de energia solar brasileiro, sendo para usinas de grande ou pequeno porte, pois ajudarão a minimizar os impactos no mercado.

Há várias pesquisas sendo desenvolvidas ao redor do mundo para melhorar a eficiência das células fotovoltaicas, buscando otimizar o desempenho global na geração de energia, bem como atender à crescente demanda do mercado de energia solar a preços comerciais mais competitivos. A avaliação de desempenho dos módulos fotovoltaicos é realizada em laboratórios sob condições de teste padrão (STC), por exemplo, irradiância solar incidente de 1000 W/m^2 , temperatura de módulo (T_{mod}) de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e distribuição de espectro solar AM 1,5G (HAAG, 2010).

O espectro de referência (ASTM G173-03) representa a irradiância espectral solar incidente sobre uma superfície específica, sob um conjunto de condições atmosféricas específicas. Esse é o espectro padrão usado para comparar o desempenho de diversas tecnologias fotovoltaicas.

Todavia, as fichas técnicas de módulos fotovoltaicos prometem performances simuladas sob a condição padrão (STC), que não são representativas no ambiente externo real, essencialmente porque os sistemas no campo não estão em uma atmosfera controlada. Por exemplo, na cidade japonesa de Kusatsu, apenas 0,89% dos dados ambientais coletados no campo, entre agosto de 2003 e julho de 2006, satisfizeram instantaneamente as condições de irradiância, espectro solar e temperatura das células do STC (MINEMOTO, NAGAE e TAKAMURA, 2007). Por isso é esperado que a avaliação da eficiência dos módulos fotovoltaicos realizados no laboratório sob condições STC dificilmente ocorrerá no campo (DIRNBERGER et al, 2015; ISHII et al, 2013).

Para entender melhor o funcionamento dos módulos fotovoltaicos fora da condição padrão (STC), estudos têm sido realizados, focando principalmente em compreender os efeitos da variação de irradiância e temperatura no desempenho da operação de módulos fotovoltaicos no campo (NOTTON et al., 2019; FOUILLY et al., 2018; NEVES et al., 2018; DIRNBERGER et al., 2015). Por exemplo, Hüttl et al. (2019) mostram que a temperatura detectada (T_{mod}) pode divergir da temperatura da célula no módulo, principalmente em relação ao resfriamento pelo vento. Além disso, Espinar et al (2010) mostraram que existe uma forte dependência na precisão de previsões em condições climáticas para modelos de mesoescala, usados mundialmente para a previsão de valores diários de irradiância. Também foi constatada a dependência da irradiância com a estação do ano, sendo necessário um conhecimento detalhado dos efeitos da variação espectral na eficiência de módulos fotovoltaicos (NEVES et al., 2018; RÜTHER et al., 2002). De acordo com Haag e Krenzinger (2010), a variação espectral solar tem correlação com fatores sazonais, parâmetros atmosféricos e geográficos e, por conseguinte, deve ser determinada independentemente para uma região específica.

A composição da atmosfera depende da grande mistura de gases e partículas suspensas. Então, quando é apresentada uma variação na amplitude do espectro solar, é porque uma dessas propriedades no campo - como concentrações variáveis de água, ozônio e aerossóis, diferem do espectro padrão ASTM G173-03 (HÜTTL et al 2019; MARION, 2010). Basicamente, cada um desses parâmetros afeta certas faixas de comprimento de onda (HAAG e KRENZINGER, 2016). Qualquer variação destes parâmetros pode impactar na porção de radiação absorvida pelas células fotovoltaicas, precisamente, entre as regiões do ultravioleta e do visível, onde estão os fótons mais energéticos (NEVES et al, 2018; ZHENG e XUAN; 2018).

Células de filme fino, como silício amorfo (a-Si), cobre-índio, disseleneto de gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe) têm um intervalo de bandas significativamente diferente dos dispositivos de silício cristalino (c-Si) e exibem uma resposta espectral diferente

(GOTTSCHALG et al., 2003). Considerando que a faixa de comprimento de onda disponível é diferente em cada tipo de módulo fotovoltaico, torna-se indispensável entender como a resposta espectral funciona. Por exemplo, para Minemoto et al. (2007), a resposta espectral do módulo fotovoltaico com células solares de multi-junção é melhorada porque as células de cada junção podem absorver uma faixa de comprimento de onda diferente do espectro solar, ou seja, a célula da camada superior da junção absorve fótons de menor comprimento de onda e a célula da camada inferior da junção absorve fótons em comprimentos de onda mais longos. Entretanto, ao aumentar a faixa de comprimento de onda do espectro solar, as células de junção tripla podem apresentar variações de perda de conversão da irradiância de até 60%, devido às oscilações no espectro causadas por parâmetros atmosféricos que impactam de forma diferente em cada tipo de material (MARION, 2010). Assim, é possível aumentar a faixa de comprimento de onda ao adicionar mais camadas de células solares que absorvem fótons em uma faixa específica de comprimento de onda, mas se uma dessas camadas/células não absorver fótons e, dessa forma, sua corrente limitará a corrente das outras camadas/células, por estarem conectados em série.

Em sua pesquisa, Haag (2012) mostra uma variação significativa entre os resultados do espectro típico para as cidades de Porto Alegre (Lat. $30^{\circ} 1'59.02''$ S, Long. $51^{\circ} 13'48''$ W) e Cuiabá (Lat. $15^{\circ} 35' 46''$ S, Long. $56^{\circ} 5'48.01''$ W), no Brasil, e Albuquerque (Lat. $35^{\circ} 6'24.3576''$ N, Long. $106^{\circ} 37'45.0516''$ W) nos Estados Unidos da América, onde os resultados mostraram que existem características diferentes de cada região e influenciam consideravelmente a irradiância espectral.

Partindo desse ponto de vista, tornar-se essencial estudar o espectro solar de diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul – Brasil, identificando as principais diferenças entre eles e o espectro ASTM G173-03 e, assim, permitir a identificação de quais são as tecnologias fotovoltaicas mais adequadas para uma atmosfera específica formada por gases que são o resultado de atividades econômicas desenvolvidas (isto é, áreas industriais, residenciais e desérticas, entre outras) no local de interesse.

Diante do que foi exposto, há a necessidade de validação da metodologia utilizada através da comparação entre os espectros solares medidos em condições externas no Laboratório de Instrumentação Meteorológica - LIM / INPE em Cachoeira Paulista / Brasil (Lat. $22^{\circ} 40'56.9''$ S e Long. $45^{\circ} 00' 05.2''$ W) e os espectros solares simulados usando o modelo computacional SMARTS (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) para condição de céu limpo. O software SMARTS utiliza esses parâmetros atmosféricos como dados de entrada no código e estima a intensidade e distribuição espectral

da radiação solar sobre a superfície terrestre. Desta forma, o software mostra que a distribuição espectral da radiação solar local apresenta algumas variações em relação a amplitude, se comparada ao espectro padrão de referência ASTM G173-03.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral é mostrar que os valores medidos em solo no laboratório do LIM/INPE pelo espectrorradiômetro são similares aos valores simulados pelo software SMARTS v. 2.6.5 utilizando parâmetros atmosféricos com valores médios do mês ou diários para o local de interesse; e responder: “há variações nas curvas espectrais ao comparar os espectros gerados a partir dos parâmetros atmosféricos de diferentes locais?”

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Obter dados de medições realizadas através do Sistema de Aquisição de Espectro (SAE) instalado no Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM/INPE em Cachoeira Paulista/SP (Lat. 22°40'56.9"S e Long. 45°00'05.2"W) e coletar os parâmetros atmosféricos para o mesmo período do ano;
- Realizar a validação do espectro através das similaridades apresentadas entre as simulações com propriedades atmosféricas e as medições realizadas em campo no Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM/INPE, assim como as divergências entre os espectros e a norma ASTM G173-03;
- Agrupar os parâmetros atmosféricos (concentrações e propriedades ópticas de aerossóis, quantidade de água precipitável, coluna de ozônio e dióxido de carbono) para diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul com características típicas (região litorânea, metropolitana, serrana, de campo, com vegetal fechada e desértica), através da utilização dos instrumentos MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo dos satélites TERRA e AQUA e AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) também instalado na plataforma AQUA, disponibilizados através da plataforma GIOVANNI;

- A partir dos espectros solares gerados para solstício e equinócio para os dezoito municípios selecionados no Estado do Rio Grande do Sul, obter uma curva de comportamento espectral instantâneo médio para o Estado do Rio Grande do Sul.

1.3 Justificativa

Nos últimos anos, a simulação computacional vem assumindo uma importância cada vez maior como ferramenta de aquisição de conhecimento. Gueymard (2019) publicou um artigo que mostra como o software SMARTS tem colaborado com a comunidade científica ao longo de 25 anos.

Após pesquisar sobre o espectro solar e as curvas de variação espectral; identificar em alguns trabalhos que a variação dos parâmetros atmosféricos do local geram impactos nas curvas espectrais; e estudar artigos que comparam locais específicos com o espectro de referência que não representa condições apresentadas em campo – assim como publicações que apresentaram variação significativa entre os resultados do espectro típico, cujos resultados mostraram que existem características diferentes de cada região e influenciam consideravelmente a irradiância espectral.

Esse trabalho procurou realizar simulações do comportamento espectral para diversas localidades da região Sul. Uma pergunta motivou a realização do trabalho: e se houvesse variação nas curvas espectrais ao comparar os espectros gerados a partir dos parâmetros atmosféricos do litoral com os parâmetros encontrados em campos ou serrado, ou ainda, uma de região com montanhas com uma zona industrial?

1.4 Estrutura da Dissertação

Este trabalho segue a seguinte estrutura: revisão bibliográfica e fundamentação teórica, descrição da metodologia, resultados e considerações finais.

O capítulo 2 consiste de uma revisão bibliográfica e fundamentação teórica, onde se apresentam conceitos importantes para a compreensão da energia solar e espectro solar. Além disso, ele traz também o estado da arte atual dos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos no tema. Por fim, ele apresenta uma síntese das características do espectro padrão (STC).

O capítulo 3 trata da descrição da metodologia de validação utilizada para o desenvolvimento do trabalho incluindo: o aparato experimental utilizado no Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM/INPE em Cachoeira Paulista – SP, desenvolvido por

Neves et al. (2018). Além disso, neste capítulo está descrito o procedimento teórico-experimental, a forma de aquisição dos dados diários e mensais, sendo os dados diários referente a atmosfera externa do laboratório e simulação dos mesmos no software SMARTS, e mensais para os municípios do Estado do Rio Grande do Sul.

O capítulo 4 aborda os resultados obtidos da validação deste trabalho – que traz a comparação realizada entre os dados medidos em campo e simulados - a discussão dos mesmos e algumas comparações com os resultados obtidos por outros pesquisadores em relação ao espectro de referência ASTM G173-03. Ainda, são apresentados os espectros mensais gerados ao longo do ano de 2016 obtidos para a cidade de São Leopoldo - do Estado do Rio Grande do Sul – e os valores da média de energia dos fótons, um índice de qualificação do espectro. Além disso, são mostrados os espectros gerados a partir da média dos valores obtidos de irradiância instantânea para dezoito municípios do Estado do Rio Grande do Sul.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é exposto o embasamento teórico da pesquisa.

2.1 Energia Solar

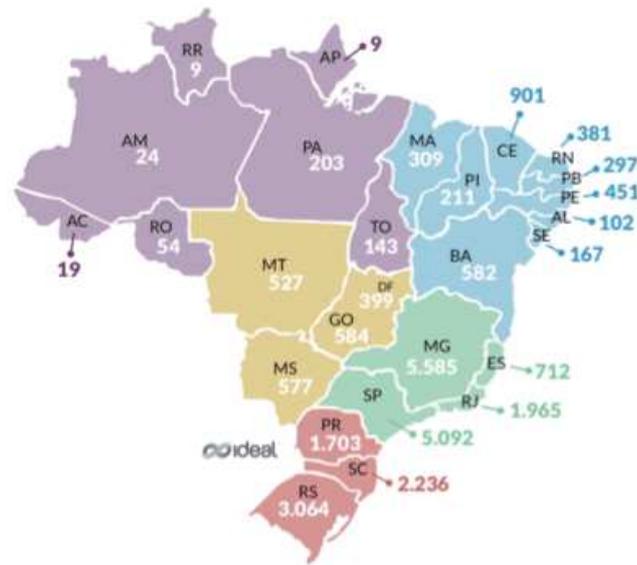
Vive-se em uma época de mudanças econômicas, tecnológicas, climáticas e políticas que impactam diretamente no nosso planeta. Com impactos ambientais cada vez mais agressivos, há a necessidade de mudar a maneira de pensar e agir. A matriz energética mundial ainda possui grande dependência de fontes não renováveis. Por exemplo, a REN21 divulgou dados do final de 2017, onde 73,5% da energia consumida no mundo é de fontes não renováveis, ou seja, 26,5% de fontes renováveis, sendo 5,6% de energia eólica, 16,4% proveniente de hidroelétricas e apenas 1,9% é de energia solar fotovoltaica. Portanto, como expandir o consumo de energia sem agredir nosso planeta? Para suprir a crescente demanda de energia elétrica é preciso muito mais investimentos em energias renováveis, procurando diversificar a matriz energética e planejar reformas para melhorar o rendimento das atuais.

A energia solar fotovoltaica tem sido a tecnologia em grande desenvolvimento no mundo e será o grande destaque energético do Brasil nos próximos anos, já que o Brasil é privilegiado com elevadas taxas de irradiação solar, o que o torna propício para aplicação da energia solar fotovoltaica.

No Brasil, as regiões nordeste e centro-oeste são as que possuem o maior potencial de aproveitamento da energia solar. Por exemplo, a melhor irradiação da Alemanha é de aproximadamente 3500 Wh/m².dia (média anual), sendo que a irradiação diária no Brasil está entre 4500 e 6000 Wh/m².dia (HAFEMEISTER, 2016).

Segundo a ANEEL, a capacidade total de geração de energia elétrica no Brasil atingiu a marca de 152 GW em 2017, sendo que apenas 0,02% do total foi produzido a partir da fonte solar. A GRENNER, empresa de Pesquisa e Consultoria especializada no setor de energia solar fotovoltaica, divulgou que 551,6 MW_p de capacidade foi instalada e registrada até janeiro de 2019, apresentando um crescimento de 221%, para o período (2012 – 2018).

Figura 2.1 Inserção da energia fotovoltaica no Brasil.

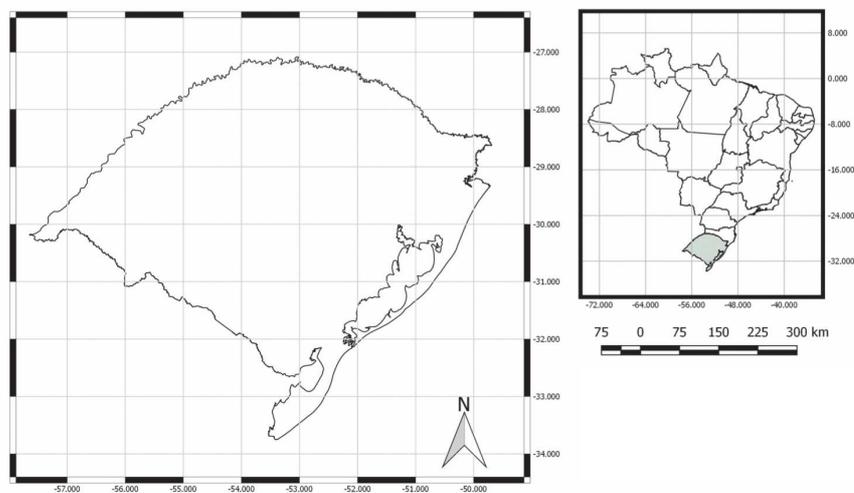


Fonte: Instituto IDEAL e AHK-RJ. 2018.

2.2 Estado do Rio Grande do Sul

O Rio Grande do Sul (Figura 2.2) com extensão territorial de 281.737,888 km², ocupando mais de 3% do território brasileiro, é dividido em 497 municípios e possui 11,329 milhões de habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018).

Figura 2.2 Mapa de localização do Estado do Rio Grande do Sul.

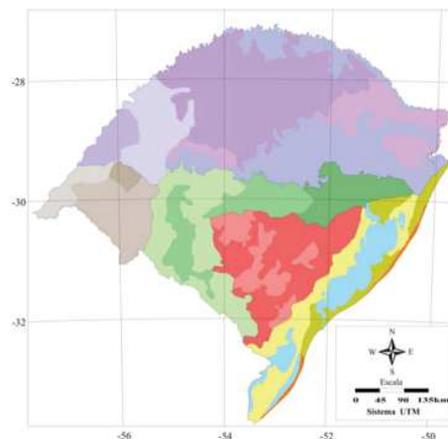


Fonte: ATLAS SOLAR DO RIO GRANDE DO SUL (2017).

O Rio Grande do Sul vem apresentando papel de destaque no setor, desde a publicação da Resolução Normativa 482 da ANEEL, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. O sistema de compensação de energia elétrica apresentou um crescimento médio anual de 428% para o período de 2013 a 2017, considerando novas instalações.

O Macrozoneamento do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 2.3) baseia-se no cruzamento de informações espaciais provenientes de diferentes fontes com dados de sensoriamento remoto adquiridos por sensores com características espectrais e espaciais diversas. No trabalho desenvolvido por Guasselli (2006), esse macrozoneamento foi realizado por meio da associação de informações, e constatou-se que nos compartimentos geomorfológicos, nos quais a altimetria é uma das importantes variáveis ambientais, os diferentes padrões de uso e ocupação de solos (definidos pelas imagens TM), analisados ao longo de um período de tempo, entre outros, permitem definir diferentes macrozonas de uso e cobertura do solo. Essas macrozonas, por sua vez, representam a dinâmica da ocupação do solo do Estado do Rio Grande do Sul.

Figura 2.3 Macrozoneamento do Estado do Rio Grande do Sul.



Legenda

Unidades Geomorfológicas	Zonas de uso e cobertura do solo	Unidades Geomorfológicas	Zonas de uso e cobertura do solo
Planalto	Florestas	Depressão Central	Campos
	Campos		Agrícola 1
	Campos sujos		Agrícola 3
	Agrícola 1	Escudo Sul-rio-grandense	Campos sujos
	Agrícola 2		Campos mistos
Cuesta do Haedo	Campos	Planície Costeira	Agrícola 1
	Campos sujos		Agrícola 3
	Agrícola 1		Dunas
			Lagoas

Fonte: GUASSELLI et al 2006.

Este cenário representado no Macrozoneamento é composto por cinco unidades que foram subdivididas, resultando num total de dezessete macrozonas diferenciadas com base em 09 classes de uso do solo e cobertura vegetal. Neste trabalho, diversas cidades foram selecionadas, procurando identificar se há variações em seus espectros solares relacionando as características da região em que a cidade se encontra.

2.3 Radiação e Distribuição Espectral

É essencial para o desenvolvimento da geração fotovoltaica, conhecer os movimentos da Terra e como a energia fornecida pelo Sol varia em função de processos físicos ocorridos na atmosfera.

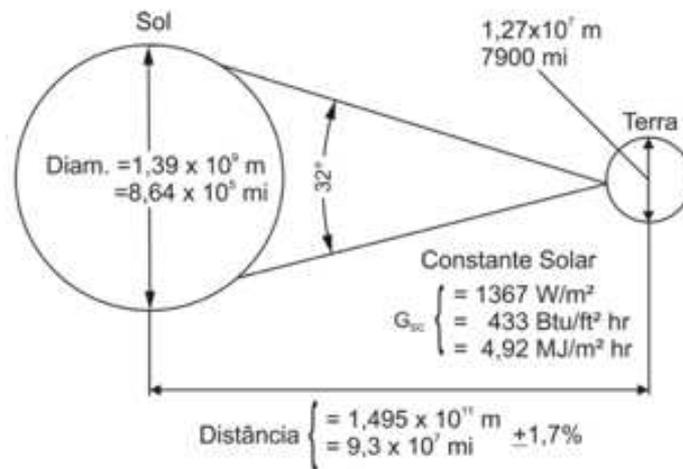
O Sol é uma estrela de tamanho médio e devido a fusão nuclear dos átomos de hidrogênio uma grande quantidade de calor é liberada, ou seja, elétrons são excitados a estados mais altos de energia. Ao retornar espontaneamente a níveis de energia mais baixos, estes, liberam parte dessa energia na forma de radiação eletromagnética, distribuída sobre uma faixa de distintos comprimentos de onda. A essa energia dá-se o nome de radiação solar.

2.3.1 Radiação Solar

A radiação solar é uma expressão usual relacionada ao fluxo de potência de todo o espectro solar. A medição da radiação extraterrestre vem sendo feita por diversos pesquisadores ao longo dos anos, utilizando desde balões atmosféricos até satélites. Fora da atmosfera terrestre, a radiação é estável.

A constante solar (G_{sc}), onde a potência recebida pelo Sol por unidade de área ficou definida como 1367 W/m^2 , ou seja, a média de diversas medições, com 1% de incerteza. Esta é a variação da ordem de exatidão dos instrumentos utilizados para a sua medida. Ela corresponde à potência incidente na Terra a uma distância média Sol-Terra, em função da órbita elíptica da Terra em relação ao Sol, ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 Relação Terra-Sol.



Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2013).

A radiação eletromagnética emitida pelo Sol viaja através do espaço até ser interceptada por corpos celestes como gases e poeira interestelar. Em outras palavras, é o processo pelo qual a energia é transferida de um corpo para outro através de ondas eletromagnéticas sem a necessidade de um meio para se propagar (FRITSCHEN; GAY, 1979; NEVES, 2016).

A radiação eletromagnética possui diferentes intervalos de comprimentos de onda (λ), que compõem o espectro eletromagnético. Tanto a irradiância (i.e., radiação eletromagnética que chega ao solo) quanto à radiância (i.e., radiação eletromagnética refletida pela superfície) sofrem atenuação dos constituintes da atmosfera, sendo importante que os dados sejam coletados em dias sem nuvens (Westphalen, 2018).

Em algumas situações a radiação eletromagnética precisa ser considerada uma partícula ou fóton, que pode ser definido como uma unidade de energia com massa e carga igual a zero (DUFFIE e BECKMAN, 2013). A energia de um fóton é proporcional a frequência da radiação e é dada pela (2.1).

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

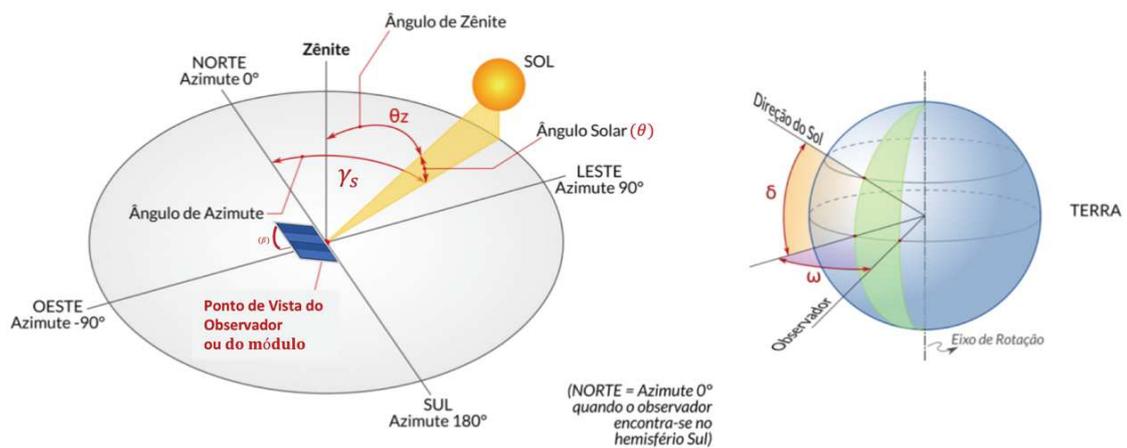
onde E é a energia transportada pela onda, h é a constante de Planck, v é a frequência da onda, c é a velocidade da luz, λ é o comprimento de onda.

O termo correto para se referir à potência da radiação solar é a irradiância (G) que representa a potência solar em um determinado instante por unidade de área. Já para se referir à energia solar deve-se utilizar irradiação (H), que representa a energia solar incidente sobre uma superfície ao longo de um determinado intervalo de tempo.

2.3.2 Relação Sol – Terra

Para descrever os ciclos da variabilidade da radiação solar que chega no topo da atmosfera, torna-se necessários o uso de conceitos importantes definidos geometricamente como os ângulos apresentados na Figura 2.5.

Figura 2.5. Ângulos de Solarimetria.



Adaptado de ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (2017).

A declinação (δ) é a posição angular do Sol ao meio dia, referente a linha do equador, cujo limites são -23.45° (Hemisfério Norte) a 23.45° (Hemisfério Sul), dada pela Eq. 2.2.

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (n + 284) \right] \quad (2.2)$$

onde n é o dia do ano contado de 1 a 365.

O ângulo azimute do sol (γ_s) é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). Sua variação vai de 0 a 180° , sendo que 0 significa que o ângulo está na direção Norte, e 180° significa que o ângulo está na direção Sul.

O ângulo horário do Sol (ω) corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre -180° e $+180^\circ$. A cada hora solar (H_s) corresponde a um deslocamento de 15° . Conforme apresentado pela Eq. 2.3.

$$\omega = (H_s - 12) 15^\circ \quad (2.3)$$

O ângulo zenital solar (θ_z) é formado entre os raios do Sol e a vertical local (zênite). Pode ser obtido através da Eq. 2.4.

$$\cos\theta_z = \cos\delta \cos\omega \cos\varphi + \sin\delta \sin\varphi \quad (2.4)$$

onde δ é o ângulo de declinação solar, ω é o ângulo horário, φ é ângulo de latitude local, cuja localização angular é ao norte ou ao sul da linha do equador e os limites são definidos como -90° a 90° .

Há outros ângulos importantes, como a altura solar (α), cujo variação é de 0 a 90° . De uma forma mais clara, é dada pela Eq. 2.5.

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (2.5)$$

O ângulo de incidência solar (θ) é formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação e o ângulo da superfície de captação (β) é o ângulo da superfície do módulo e o plano horizontal.

2.3.3 Movimento de Translação e Rotação da Terra ao redor do Sol

A duração do dia está relacionada com as estações do ano. As estações são determinadas pelos solstícios e os equinócios. No hemisfério Sul, o verão ocorre quando o polo Sul está voltado para o Sol. Entretanto, o inverno ocorre quando o polo Sul está voltado para a direção oposta à do Sol.

Na Figura 2.6, é possível perceber que a radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre varia ao longo do tempo, devido ao movimento de translação Terra ao redor do Sol e ao movimento de rotação da Terra.

Figura 2.6 Movimento de Translação da Terra ao redor do Sol.



Fonte: ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (2017).

Solstício e equinócio são fenômenos astronômicos relacionados ao movimento aparente do Sol (incidência de raios solares nos hemisférios) e ao início das estações do ano. O solstício

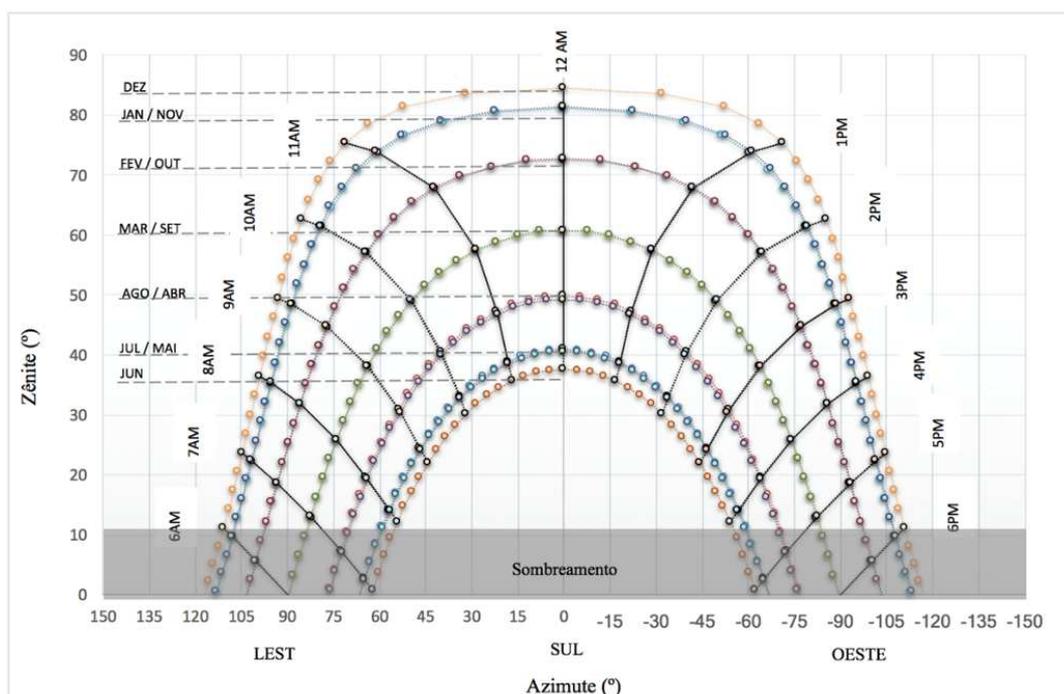
representa o momento em que o sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação em latitude medida a partir do Equador, logo um dos hemisférios recebe maior incidência de raios solares, ocorrendo nos dias 21 de dezembro e 21 de junho. Já o equinócio representa o instante em que o Sol, em sua órbita aparente, cruza o Equador terrestre, portanto, isso significa que os raios solares incidem com a mesma intensidade nos dois hemisférios, consequentemente, os dias e as noites têm a mesma duração, esse fenômeno ocorre normalmente 22 ou 23 de setembro e 20 ou 21 de março.

Uma ferramenta bastante prática para a obtenção das informações necessárias para avaliar a penetração solar, sombras projetadas pelo entorno, e com isso determinar a melhor orientação da edificação e as proteções solares necessárias às aberturas, é a carta solar.

A carta solar é uma reprodução gráfica dos percursos aparentes do sol na abóbada celeste ao longo do dia em diferentes épocas do ano, cujos percursos são identificados através da transposição do azimute e da altitude solar sobre o plano. Essa ferramenta pode ilustrar o porque de seleciona-se o meio dia solar para coleta de dados atmosféricos, pois é momento que o Sol tem o mesmo azimute, para todos os meses do ano.

Na Figura 2.7 é possível visualizar a carta solar para a cidade de Porto Alegre (Lat. $30^{\circ} 0' 0''$ S e Long. $51^{\circ} 8' 53.988''$ W). Neste exemplo, foi considerado um sombreamento no local de interesse que deixa de ocorrer às 7h55min no mês de junho. Através da carta é possível perceber que o mesmo sombreamento, deixaria de ocorrer às 6 horas para o mês de dezembro.

Figura 2.7 Exemplo de carta solar elaborado para a cidade de Porto Alegre.

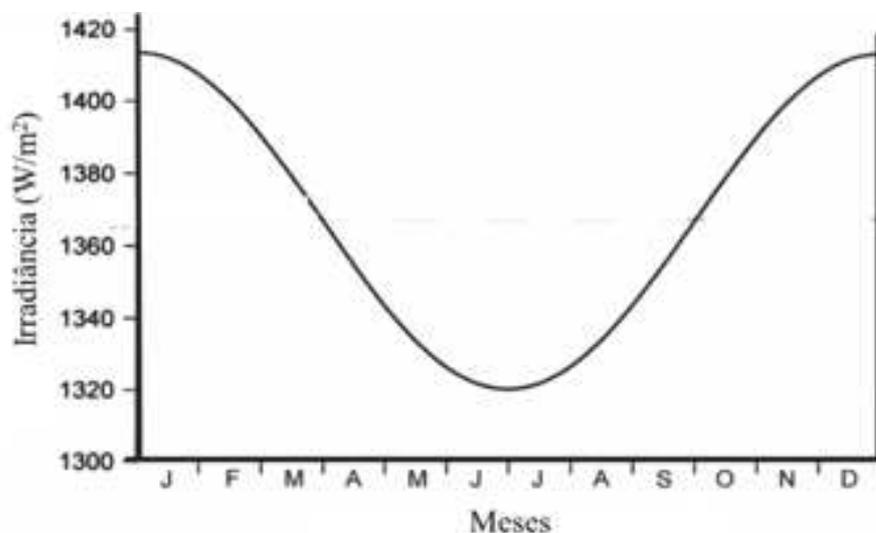


Portanto, devido aos movimentos mencionados anteriormente, o tempo solar trabalha de maneira cíclica ao longo de um ano. Neste caso, para tratamento de dados e simulações utilizou-se o horário do meio dia solar (às 12 horas), pois não depende da variação do zênite (altura solar), o azimute permanece constante (zero) servindo como referência, proporcionando o caminho menos longo entre o objeto e o Sol, sem interferências do entorno (com exceção dos parâmetros atmosféricos).

2.3.4 Irradiância Solar

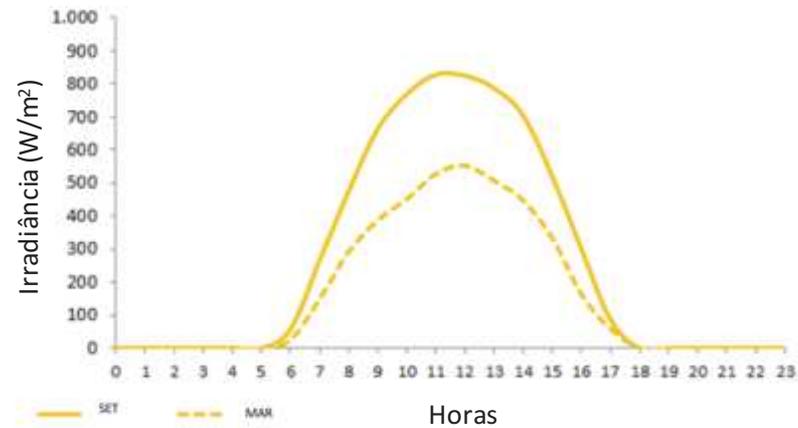
A duração do dia e a quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre apresenta variabilidade temporal característica de dois ciclos: o ciclo anual e diário, como resultado de ambos os movimentos mencionados. O comportamento característico da irradiância extraterrestre ao longo do ano pode ser observado na Figura 2.8, onde os valores variam em função dos dias do ano no hemisfério Sul. De uma forma mais clara, a irradiância extraterrestre (I_0) se refere à radiação solar recebida pela Terra no topo da atmosfera em superfície perpendicular aos raios solares, tendo como valor médio 1367 W/m^2 , sendo variável ao longo do ano, pelo formato elíptico da órbita terrestre em torno do Sol, ficando por volta de 1322 W/m^2 até 1412 W/m^2 . Ainda, o outro movimento da Terra é o que ela faz em torno de si mesma (rotação), é responsável pela variação da Irradiância ao longo de um dia, ilustrado na Figura 2.9.

Figura 2.8 Variação da irradiância normal no topo da atmosfera ao longo de um ano no hemisfério Sul.



Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2013).

Figura 2.9 Variação da irradiância em superfície horizontal ao longo de um dia qualquer em Setembro e Março.



Adaptado de PINHO e GALDINO (2014).

As dinâmicas entre a Terra e o Sol acabam gerando uma série de relações que comprometem a intensidade da radiação que chega à superfície terrestre. A radiação extraterrestre incidente pode ser obtida pela (2.6 ou pela (2.7 (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.6)$$

$$G_{on} = G_{sc} \left(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B \right) \quad (2.7)$$

onde G_{on} é a radiação extraterrestre incidente no plano normal, G_{sc} é constante solar e B é o valor dados é dada pela Eq. 2.8. e n é o dia do ano, ou seja, o número de dias é contado de 1 a 365.

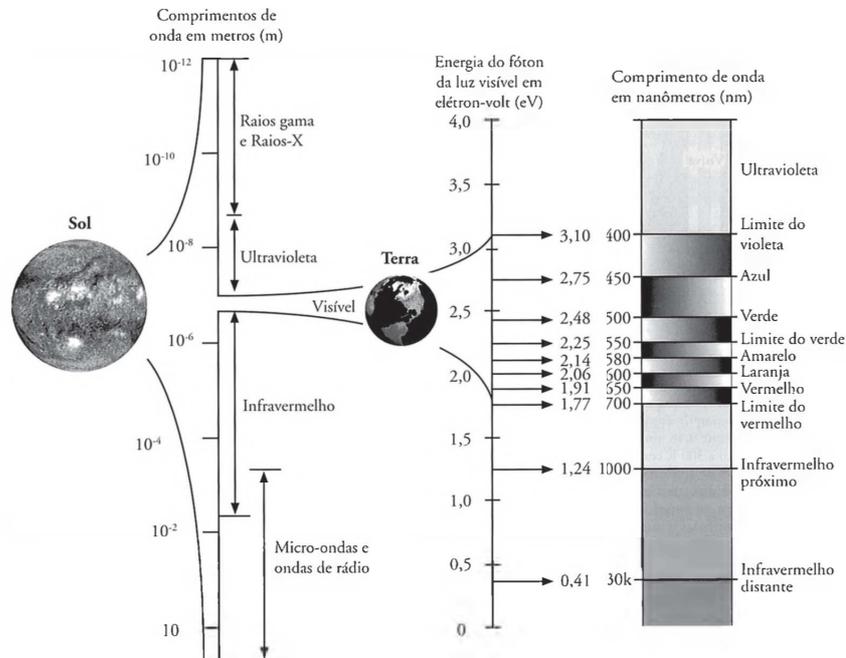
$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.8)$$

2.3.5 Espectro Eletromagnético

O espectro eletromagnético é o conjunto completo de todas as possíveis frequências, comprimentos de onda ou energia que a radiação eletromagnética pode apresentar. Basicamente, é a disposição da energia eletromagnética que pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência. Na Figura 2.10, é

apresentado o espectro eletromagnético (faixa de comprimento de ondas em nm) e sua relação com energia da luz visível em elétron-volt e com os comprimentos de ondas emitidos pelo Sol.

Figura 2.10 Espectro eletromagnético e a energia do fóton a luz visível.



Fonte: JENSEN (2009).

Segundo Jensen (2009), o Sol produz um espectro contínuo de energia desde os raios gama até as ondas de rádio, que banha continuamente a Terra com energia. A porção visível do espectro pode ser medida usando comprimentos de onda (medidos em micrometros ou nanômetros ou elétron-volt). Esse espectro é classificado em várias regiões de acordo com o tipo de interação que a radiação eletromagnética tem com a matéria, como apresentado na Figura 2.10, cujo o intervalo de emissão do espectro eletromagnético compreende as regiões do ultravioleta, da faixa do visível e do infravermelho, sendo que a maior parcela da energia radiante do Sol está centralizada nos limites do espectro visível (MASTER,2013; IQBAL,1983).

Fora da atmosfera terrestre, a radiação solar tem a maior parte de sua energia situada entre 250 e 3000 nm (MELO, 2012). Dentre as regiões do espectro solar, a faixa do ultravioleta possui os menores comprimentos de onda, e por consequência os fótons mais energéticos, considerado prejudicial aos seres vivos na Terra. A faixa do visível do espectro é conhecida como luz e possui a capacidade de interagir com células receptoras fotossensíveis presentes na retina do olho humano e dos animais em geral. A faixa do espectro conhecida como

infravermelho possui os comprimentos de onda mais longos da radiação térmica e por consequência, menores níveis de energia.

Estudos realizados por Floy et al. (1998; Lean, 1991; Rottman, 1999) revelam que a região de maior variação da radiação é abaixo de 200 nm.

Segundo Masters (2013), o espectro solar no topo da atmosfera da Terra consiste de 7% de radiação ultravioleta, 47% de radiação visível e 46% de infravermelho. Desde abaixo de 300 nm, representa apenas 1,2% da energia total do espectro solar, enquanto acima de 2500 nm corresponde a 4% (ZHENG, 2017). Os limites de cada banda espectral e sua porção percentual da energia total do espectro solar podem ser vistos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Representação da energia do espectro da radiação solar.

Faixa do Visível	λ (μm)	(%) da Energia do Espectro
Violeta	0,390 – 0,455	8,0
Azul	0,455 – 0,492	4,57
Verde	0,492 – 0,577	10,51
Amarelo	0,577 – 0,597	2,47
Laranja	0,597 – 0,622	3,09
Vermelho	0,622 – 0,770	18,30
Faixas do Espectro	λ (μm)	(%) da Energia do Espectro
Ultravioleta	< 0,300	1,20
Ultravioleta	0,300 – 0,390	5,80
Visível	0,390 – 0,770	47,00
Infravermelho	0,770 – 2,400	42,00
Infravermelho	>2,400	4,00

Fonte: IQBAL (1983).

2.3.6 Distribuição Espectral

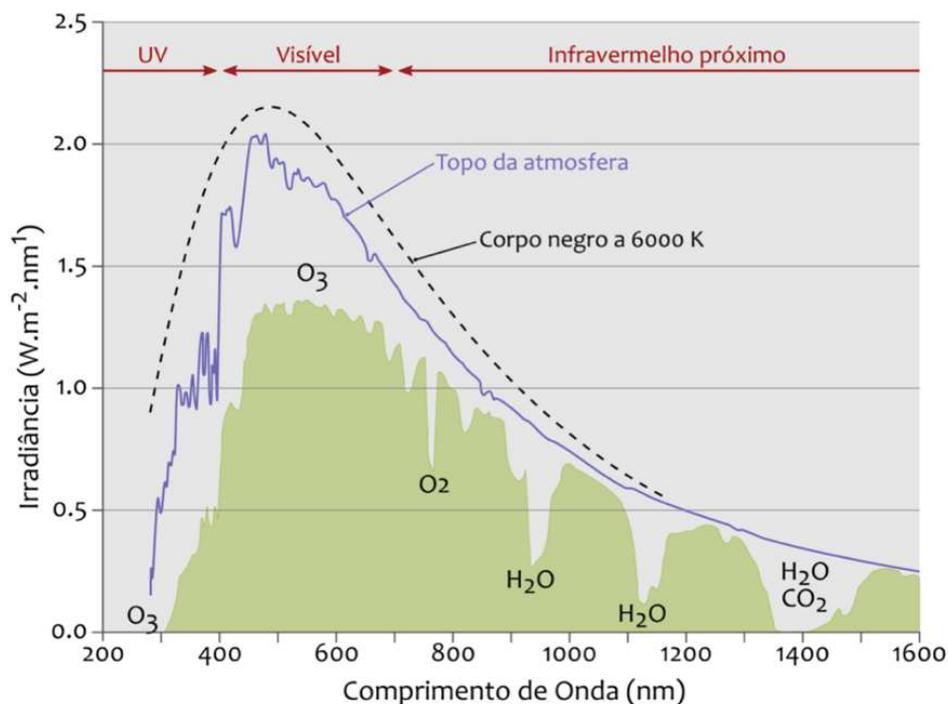
Em 1814, foi Joseph Von Fraunhofer que descreveu as primeiras características do espectro solar, identificou 574 linhas de absorção, se tornando o pioneiro da espectrometria estelar. Após outras pesquisas, Samuel Pierpont Langley publicou os primeiros dados sobre distribuição espectral da radiação solar entre 300 e 5300 nm, sendo capaz de determinar a posição espectral e intensidade de mais de 700 linhas do espectro solar.

Satélites equipados com instrumentos extremamente sensíveis e estáveis, posicionado em órbita além da atmosfera terrestre, revelaram o comportamento da emissão solar em regiões do espectro que não haviam sido medidas em função da opacidade da atmosfera e permitiram que o termo “constante solar” fosse revisto, pois a emissão solar eletromagnética possuía variações ao longo do tempo (HAAG, 2007).

A radiação atmosférica é consequência da absorção e emissão da energia pelos gases - vapor de água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ozônio (O₃), 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 seu percurso até incidir na superfície terrestre é conhecido como transferência radiante (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017).

A Figura 2.11 mostra a distribuição espectral de radiação eletromagnética emitido pelo Sol que atinge o topo da Atmosfera e na superfície terrestre após a atenuação pelos processos radiativos na atmosfera (área verde do gráfico). As perdas do fluxo de potência entre o espectro da irradiância incidente no topo da atmosfera e o espectro da irradiância global são de aproximadamente 27 % (PINHO; GALDINO, 2014). Ainda, para comparação é exibida uma curva de emissão de um corpo negro a 6000 K (linha tracejada). Além disso, pode-se observar que alguns comprimentos de onda da radiação solar são totalmente atenuados pela atmosfera e não incidem na superfície terrestre, principalmente, na região do ultravioleta.

Figura 2.11 Espectro eletromagnético da radiação solar.



Fonte: ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (2017).

De acordo com Gueymard (2004), o valor de irradiância solar extraterrestre, pode ser obtida pela relação apresentada na (2.9).

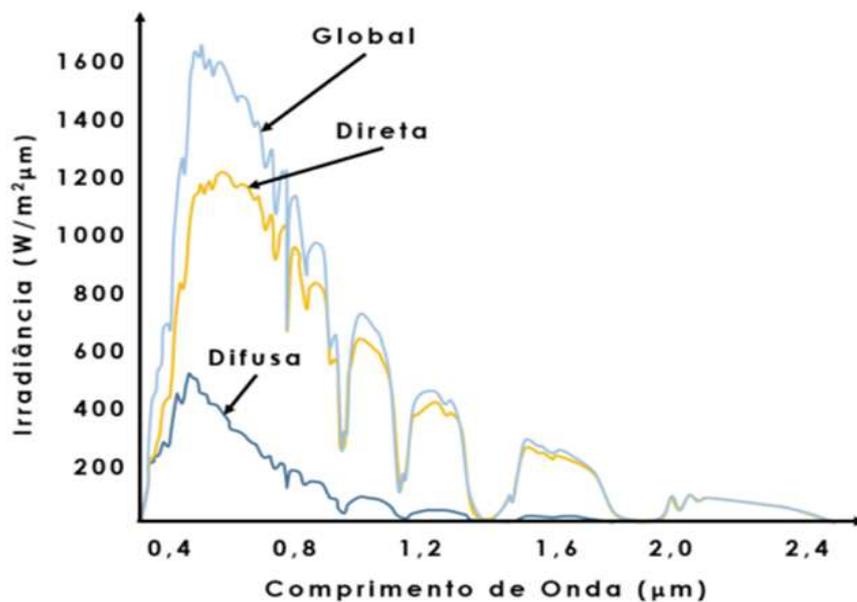
$$G_{sc} = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (2.9)$$

onde E_{λ} é a irradiância espectral e λ é a faixa do comprimento de onda.

2.3.7 Componentes da Distribuição Espectral

A Figura 2.12 ilustra o comportamento das distribuições espectrais da radiação global, direta e difusa.

Figura 2.12 Distribuição espectral das componentes da radiação solar.



Adaptado de NEVES (2016).

A radiação solar que chega à superfície terrestre, conhecida como global, é composta por uma componente direta e por uma componente indireta. A componente direta é aquela que provém diretamente da direção do Sol e produz sombras (DUFFIE e BECKMAN, 2013). A componente indireta (difusa) é aquela proveniente de todas as direções que atingi a superfície após sofrer o espalhamento pela atmosfera terrestre (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4 Processos de Interação com a Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre comporta-se como um véu protetor contra a ação de radiação solar que chega ao nosso planeta e como regulador térmico ao redor da Terra, protegendo e proporcionando condições indispensáveis para a vida animal e vegetal (HAAG, 2007).

A divisão da atmosfera terrestre pelo critério térmico ocorre da seguinte maneira: a troposfera vai até 12 km de altura e sua temperatura varia entre 20 e -60°C, seu gradiente térmico é negativo; a estratosfera vai de 12 a 50 km de altura e sua temperatura varia entre -60 e -5°C, gradiente térmico é positivo, local onde fica a camada de Ozônio; a mesosfera vai de 50 a 80 km, a temperatura vai de -5 a -95°C, gradiente térmico negativo; a termosfera vai de 50 a 500 km, temperatura varia entre -95 a 1000°C, gradiente térmico positivo; a exosfera vai de 500 a 800 km, sendo a região que antecede o espaço sideral e há satélites artificiais.

2.4.1 *Constituintes Atmosféricos*

De uma forma mais complexa, Markoski (2015) descreveu a atmosfera com uma grande mistura de gases somada a partículas suspensas (aerossóis, fumaça, poeira, etc.) e hidrometeoros (gotículas de água, neve e cristais de gelo). Conforme Neves (2016), os gases que conformam a atmosfera podem ser repartidos entre os que têm uma concentração permanente (99%), conforme apresentado na Tabela 2.2., e os que têm concentrações variáveis (1%), como mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.2 Composição atmosférica por constituintes permanentes de uma atmosfera padrão.

Componentes	% Volume	Componentes	Fração molar	Componentes	Fração molar
N ₂	78,084	He	5,24x10 ⁻⁴	CH ₄	1,7x10 ⁻⁴
O ₂	20,948	Kr	1,14x10 ⁻⁶	N ₂ O	0,3x10 ⁻⁴
Ar	0,934	Xe	0,089x10 ⁻⁴	CO	1x10 ⁻⁸
CO ₂	0,4	H ₂	0,5x10 ⁻⁴	Ne	1,82x10 ⁻⁵

Adaptado de LIOU (2012).

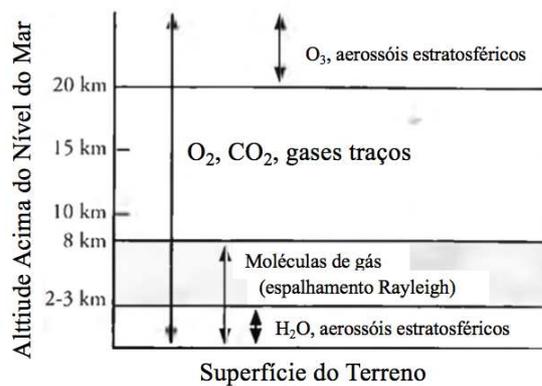
Tabela 2.3 Composição atmosférica por constituintes variáveis de uma atmosfera padrão.

Componentes	% Volume	Componentes	Fração molar	Componentes	Fração molar
O ₃	0-12 x10 ⁻⁴	NH ₃	0,004x10 ⁻⁴	NO ₂	0,001x10 ⁻⁴
H ₂ O	0-0,04	H ₂ S	0,00005x10 ⁻⁴	NO	0,0005x10 ⁻⁴
HNO ₃	Traços	SO ₂	0,001x10 ⁻⁴	(CFCL ₃ , etc.)	Traços

Adaptado de LIOU (2012).

Na Figura 2.13 é apresentado em formato de gráfico as principais subdivisões da atmosfera e os tipos de moléculas e aerossóis encontrados em cada camada.

Figura 2.13 Camadas e constituintes atmosféricos.



Adaptado de JENSEN (2009).

2.4.1.1 Oxigênio (O₂)

Este gás é responsável pelo bloqueio de parte do espectro ultravioleta, ou seja, todos os comprimentos de onda abaixo de 200 nm que atinge a superfície do planeta (IQBAL, 1983; NEVES, 2016). As regiões do visível e do infravermelho possuem as seguintes faixas de comprimento de onda ou bandas de absorção: 628 nm, 688 nm e 762 nm.

2.4.1.2 Dióxido de Carbono (CO₂)

O dióxido de carbono CO₂ é o gás permanente cuja concentração tem aumentado ao longo do tempo (MARKOSKI, 2015). Este gás influencia na faixa do infravermelho, atuando em comprimentos de onda superiores a 1000 nm (HAAG, 2012), em acordo Neves (2016), destaca que a absorção do CO₂ ocorre em 1400 nm, 1600 nm, 2000 nm, 2700 nm.

2.4.1.3 Ozônio (O_3)

Este gás variável possui seis bandas de absorção do espectro solar, duas no ultravioleta, uma no visível e quatro no infravermelho. De acordo com Haag (2012), o O_3 atua na região ultravioleta e em certas bandas de infravermelho. Neves (2016) aponta que entre 200 e 300 nm é a banda de absorção mais intensa, que entre 300 e 360 nm é a banda responsável por proteger a Terra da radiação UV-C e UV-B e, finalmente, da região de 450 a 770 nm onde não há altos níveis de absorção. Tipicamente, o conteúdo total de ozônio integrado em uma coluna atmosférica de base unitária é expresso em Unidades Dobson (UD), descrito pela (2.100).

$$u_0 = \int_0^{\infty} \rho O_3 dz \quad (2.10)$$

onde ρO_3 é a massa específica de ozônio, z é o caminho de integração na direção vertical e u_0 é o conteúdo total de ozônio em UD.

2.4.1.4 Vapor da água (H_2O)

O espectro do vapor d'água cobre praticamente toda a região do infravermelho, sendo considerado o absorvedor mais importante (VIÚDEZ-MORA, 2011; apud MARKOSKI, 2015). Nas regiões visível e infravermelha, as menos importantes estão centradas em 720 nm e 820 nm, e as bandas de absorção mais significativas são nos seguintes comprimentos de onda: 940 nm, 1100 nm, 1380 nm e 1870 nm (NEVES, 2016). Mambrini (2015) mostra numa análise do espectro de 300 nm a 1100 nm que as bandas em que as moléculas de vapor de água absorvem a energia dos fótons estão centradas em 724 nm, 824 nm e 938 nm.

A quantidade de vapor de água é calculada a partir da massa de vapor de água total presente em uma coluna de área unitária desde a superfície até o topo da atmosfera terrestre, pela Eq. 2.11.

$$w = \int_0^{\infty} \rho_w dz \quad (2.11)$$

onde ρ_w é a massa específica de vapor de água, z representa a distância na direção vertical e w é expresso em unidades de massa por unidade de área.

2.4.1.5 *Aerossóis*

Os aerossóis podem ser definidos como o conjunto de partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar. Pode ser liberado ou formado por processo natural ou atividade humana e os locais com as maiores ocorrências desses elementos são as regiões desérticas e urbanas, pois possuem fontes de emissão intensivamente ativas.

Os aerossóis atmosféricos têm uma enorme variedade de volumes, formas e dimensões, havendo tamanhos que, em geral, variam de cerca de 10 a 10000 nm de diâmetro (Atlas Solar do Rio Grande do Sul, 2017). Conforme Haag e Krenzinger (2010), a determinação exata das particularidades ópticas dos aerossóis é essencial ao estimar a distribuição espectral da irradiância solar através de modelos paramétricos.

As características dos aerossóis atmosféricos dependem de sua origem e idade, podendo viajar por grandes distâncias transportados pelas correntes de ventos. Eles podem ser classificados em troposféricos e estratosféricos. Os troposféricos são divididos entre continental (subdivididos entre rural e urbano) e marinho - que representam o maior montante de aerossóis na atmosfera. Os aerossóis urbanos possuem características dadas pela atividade antropogênica nos grandes centros populacionais, já os aerossóis rurais têm partículas originadas a partir da atividade orgânica vegetal ou mesmo da queima de biomassa. Já na troposfera, as partículas de aerossóis apresentam vida média curta, normalmente da ordem de dias e semanas, influenciando no clima, uma vez que eles aumentam a quantidade de radiação refletida para o espaço (efeito albedo) (Atlas Solar do Estado do Rio Grande do Sul, 2017).

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, houve 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).

A interação entre aerossóis e a radiação solar nas regiões espectral do visível e do infravermelho próximo, tem a ver com o tamanho das partículas, que são menores e apresentam a mesma ordem que o comprimento de onda da radiação incidente, provocando assim o espalhamento da radiação solar. No entanto, as partículas maiores de aerossóis (diâmetro maior que 15 μm) apresentam um tempo de residência muito baixo na atmosfera (Atlas Solar do Estado do Rio Grande do Sul, 2017).

A informação precisa sobre a espessura óptica de aerossóis é um requisito importante para a caracterização de espectro solar na superfície terrestre através de modelos de transferência radiativa. Essa propriedade é conhecida como Turbidez Atmosférica e pode ser medida através da profundidade óptica de aerossóis (AOD), um dos parâmetros obtidos pelo sensor MODIS acoplado aos satélites TERRA e AQUA.

2.4.2 *Espalhamento Atmosférico*

Ao entrar na atmosfera terrestre, a radiação solar sofre mudanças em sua intensidade devido a vários processos de propagação causados por diversos parâmetros atmosféricos - moléculas de gases, gotas de água, poeira e partículas de aerossóis, absorção por gases presentes na atmosfera e por último, por meio de sucessivos processos de absorção e reflexão no solo ou em superfícies líquidas (COULSON, 1975).

Fundamentalmente, o espalhamento ocorre porque as ondas eletromagnéticas são desviadas de suas trajetórias originais por gases, aerossóis ou nuvens de várias direções.

Existem dois modelos que descrevem tal comportamento, espalhamento de Rayleigh (espalhamento molecular) e espalhamento de Mie, que apresenta pouca dependência de comprimento de onda (IQBAL, 1983; NEVES, 2016).

O espalhamento Rayleigh é o responsável pela cor azul do céu e pelo vermelho do pôr do sol. Basicamente, ocorre quando o diâmetro efetivo da matéria é muitas vezes menor que o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente, sendo que a maioria ocorre na atmosfera de 2 a 8 km acima do solo. Já o espalhamento Mie ocorre nos 4,5 km inferiores da atmosfera onde pode estar muitas partículas essencialmente esféricas com diâmetros aproximadamente iguais ao tamanho do comprimento de onda da energia incidente. A magnitude desse espalhamento é maior que a do espalhamento Rayleigh, e os comprimentos de onda espalhados são maiores. Para esse espalhamento, quanto maior a número de partículas de fumaça e de poeira na coluna atmosférica, mais a luz violeta e azul será removida e somente os comprimentos de onda maiores de luz laranja e vermelha atingirão nossos olhos. A poluição também contribui para belos amanheceres e entardeceres. (JENSEN, 2009).

2.4.3 *Absorção, Refletância e Transmitância*

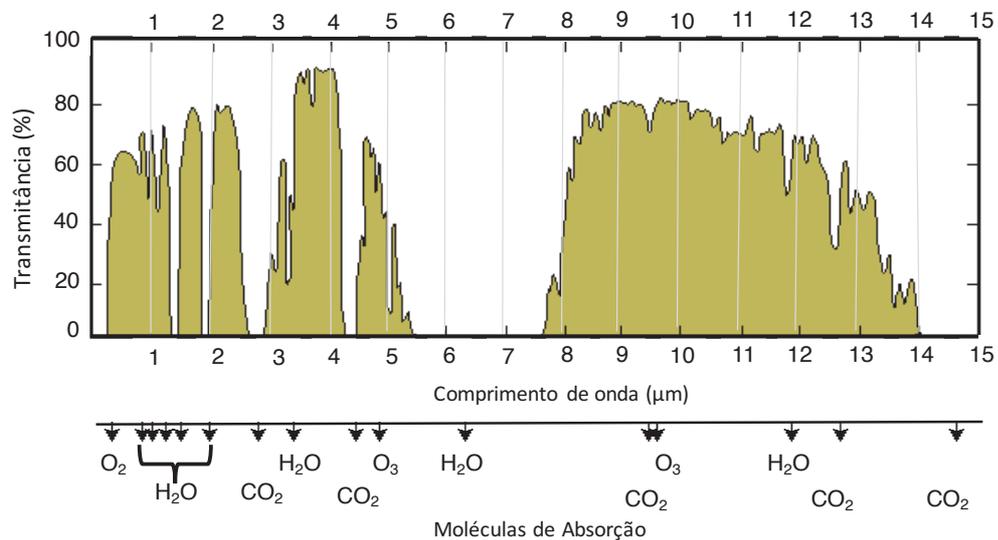
A absorção da energia radiante incidente que ocorre na atmosfera é o processo pelo qual a energia radiante é absorvida e convertida em outras formas de energia. Uma banda de

absorção é um intervalo de comprimentos de onda do espectro eletromagnético no qual a energia radiante é absorvida por uma substância. Já a refletância é o processo pelo qual a radiação “desliza” num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d’água ou um solo exposto. Se a superfície tem uma grande altura superficial (rugosa) relativamente ao tamanho do comprimento de onda da energia incidente e os raios refletidos vão em muitas direções, dependendo da orientação das superfícies refletoras menores (JENSEN, 2009).

Transmitância é a fração da luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria. Portanto, cada comprimento de onda está associado a uma transmitância cujo valor varia devido à absorção imposta pelas moléculas que estão no ar e compõem a atmosfera (NEVES, 2016). Isso significa que cada molécula é responsável por absorver certos comprimentos de onda. Desta forma, conclui-se que é importante entender a composição da atmosfera da localidade de interesse.

Na Figura 2.14, o sistema Terra-atmosfera perde energia para o espaço mantendo assim o equilíbrio térmico do planeta, sendo que essas considerações são válidas para a atmosfera sem nuvens e poluentes, pois estes tendem a absorver a energia eletromagnética.

Figura 2.14 Transmitância atmosférica e moléculas absorvedoras responsáveis pelas bandas de absorção no intervalo espectral de 1 a 14 μm .



Adaptado de ANDRADE (2011).

De acordo com Neves (2016), o oxigênio é responsável por bloquear toda a radiação que chega à Terra com comprimentos de onda abaixo de 200 nm. Contudo, o presente trabalho se limitará a estudar atenuações atmosféricas dentre os limites de 300 a 1700 nm. Portanto, os

parâmetros atmosféricos abaixo de 300 nm, não serão abordados nesta pesquisa, já que o seu intervalo de atuação não apresenta influência na geração fotovoltaica apresentada neste estudo.

Na sua maior parte, a Terra recebe energia do Sol nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho. Esta energia é absorvida pela Terra e reenviada em comprimentos de onda do infravermelho, principalmente entre 4 e 50 μm em virtude de sua temperatura (MARKOSKI, 2015). Na região do infravermelho, a superfície terrestre se comporta como um corpo cinza, com emissividades variando entre 0,85 e 0,99, dependendo do tipo e condições da superfície (LEVI et al. 1980).

2.4.4 *Massa de Ar*

A atmosfera interage com a radiação solar de modo a atenuá-la e alterar sua distribuição espectral através de dois processos físicos: a absorção e o espalhamento (NEVES, 2016). As magnitudes destes processos irão depender da distância percorrida pela radiação na atmosfera, sendo que quanto maior for a distância percorrida, uma maior quantidade de interações irá ocorrer. Essa distância denominada Massa Ar (AM) varia com a latitude, hora do dia e dia do ano por conta de sua dependência com o ângulo zenital (IQBAL, 1983). Por exemplo, quando $AM=1$, o ângulo zenital é igual a 0° ; já quando $AM=2$, o ângulo zenital é igual a 60° .

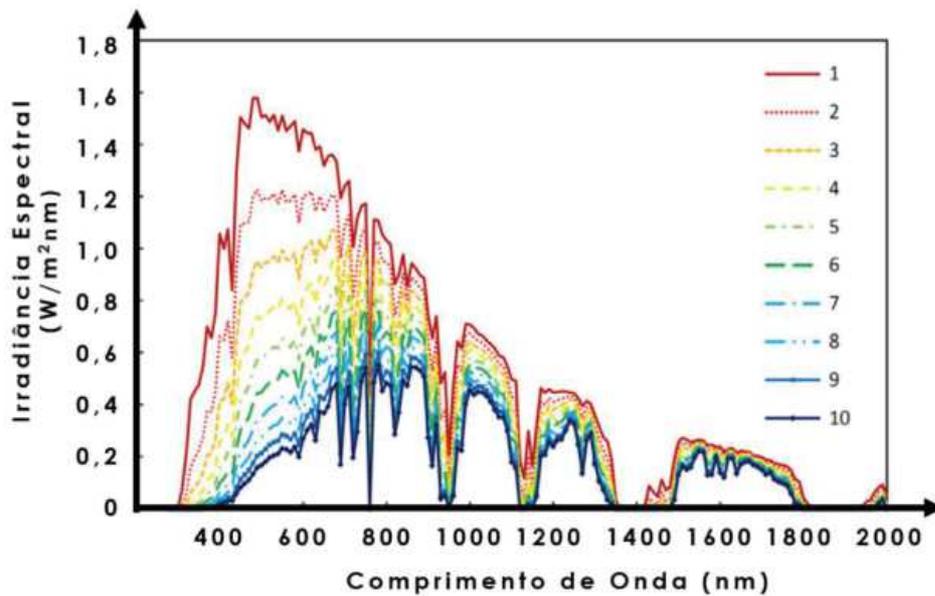
Para ângulos zenitais entre 0° e 70° , AM pode ser obtida através da Eq. 2.12.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.12)$$

onde AM é a massa de ar e θ_z é o ângulo de zênite solar.

Como mencionado anteriormente, o caminho cursado na atmosfera irá influenciar na quantidade de interações que a radiação irá sofrer com os gases e aerossóis. Na Figura 2.15, a medida que a diminuição de intensidade ocorre ao longo de todo o espectro, os menores comprimentos de onda sofrem uma maior redução devido aos efeitos do espalhamento Rayleigh.

Figura 2.15 Efeito da massa de ar no espectro solar de referência.



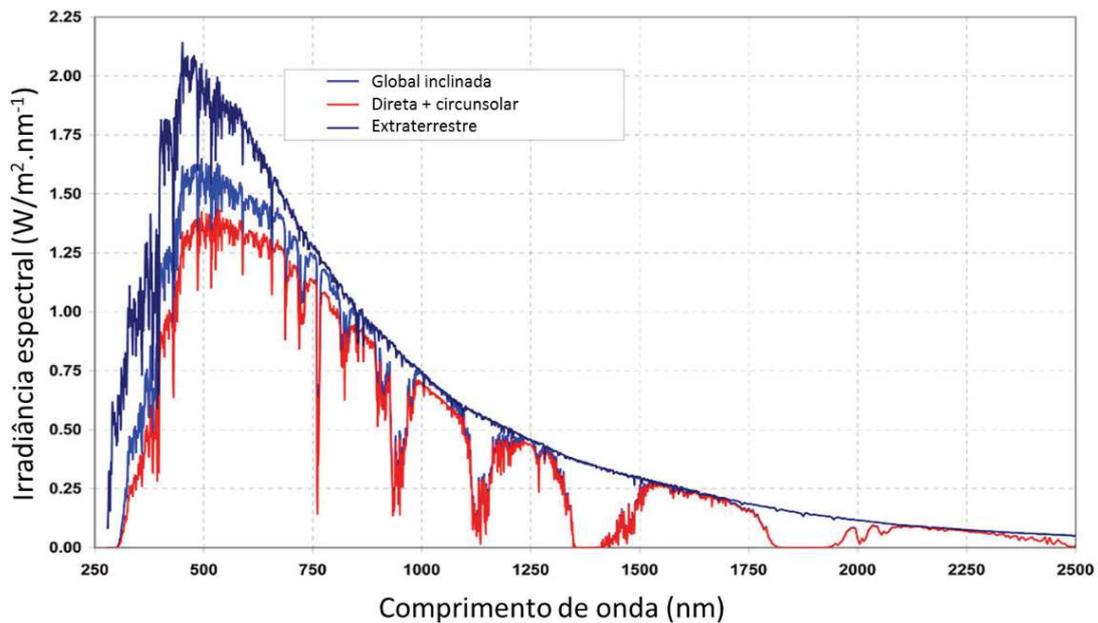
Fonte: NEVES (2016).

2.5 Espectro de Referência

Com o intuito de criar um padrão que pudesse ser utilizado por várias áreas interessadas, a American Society for Testing and Materials (ASTM) desenvolveu este espectro para condições no topo da atmosfera terrestre, com base em dados coletados de satélites, aviões de grande altitude, foguetes, telescópios e modelos matemáticos que servem de referência para o espectro solar extraterrestre.

Atualmente, o espectro padrão adotado é o ASTM G173-03. Este espectro foi modelado para atender os valores médios de 48 estados americanos, assim como o valor estabelecido pela latitude e pela inclinação de 37° da superfície com a horizontal (GUEYMARD et al, 2003; GUEYMARD, 2007). Esse ângulo de inclinação utilizado é aproximadamente a latitude média dos Estados Unidos (latitudes $25,8^\circ\text{N}$ e $49,4^\circ\text{N}$). Esta norma foi adotada pela norma europeia IEC 60904-3 como referência para a massa de ar de AM1,5, sendo este valor utilizado devido à latitude média, que substitui o valor médio anual do ângulo do zênite solar às 12 horas, nos Estados Unidos, pode ser observada na Figura 2.16.

Figura 2.16 Espectro de Referência ASTM G-173.



Fonte: NREL (2019).

Na Tabela 2.4 é apresentado os valores médios anuais previstos pela Norma para as concentrações de ozônio (em Unidades Dobson), vapor de água (em centímetros), AOD (do inglês *Aerosol Optical Depth*, é adimensional) e CO₂ (em partes por milhão por volume).

Tabela 2.4 Parâmetros atmosféricos da Norma ASTM G-173-03.

Ozônio (UD)	Vapor da Água (cm)	AOD para 550 nm	CO ₂ (ppmv)
343.8	1,42	0,084	370

Segundo Neves et al (2018), o espectro padrão ASTM G173-03 apresenta limitações em sua aplicabilidade em regiões do mundo em que as condições atmosféricas divergem dos parâmetros relatados. Isso ocorre porque certos gases e aerossóis presentes na atmosfera variam de acordo com a localidade, dia e época do ano. Por essa razão, é permissível que o espectro gerado para a América do Norte não seja equivalente a América do Sul, em termos de sua amplitude.

2.6 Equação de Transferência Radioativa

Como já mencionado anteriormente, a radiação emitida pelo Sol ao penetrar na atmosfera terrestre sofre alteração na sua intensidade e polarização através de vários processos como o espalhamento (COULSON, 1975).

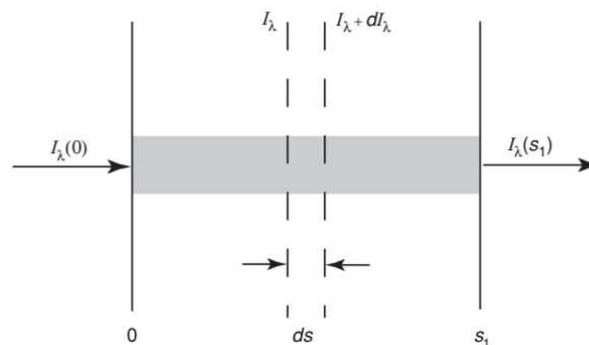
Segundo Haag (2012), em um céu limpo sem a presença de nuvens, a componente direta da radiação solar constitui a principal parcela da irradiância solar e por consequência, se a intensidade da radiação I_λ torna-se $I_\lambda + dI_\lambda$ após atravessar uma superfície com espessura ds na direção de propagação, Eq. 2.14.

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds \quad (2.13)$$

onde ρ é a massa específica do material, k_λ é o coeficiente de extinção (em unidades de área por massa) para uma radiação de comprimento de onda λ ,

Basicamente, o coeficiente de extinção representa a totalidade da parcela da radiação que é absorvida e espalhada no meio de propagação da onda. A Figura 2.17. apresenta uma simplificação deste processo de extinção.

Figura 2.17. Comportamento da radiação ao atravessar um meio absorvedor.



Fonte: Liou (2002).

De outra forma, a radiação pode ser intensificada devido à reemissão causada pelos múltiplos espalhamentos em um mesmo comprimento de onda, podendo ser representada pela Eq. 2.15.

$$dI_\lambda = j_\lambda \rho I_\lambda ds \quad (2.14)$$

onde j_λ representa a totalidade da parcela da radiação que é absorvida e espalhada no meio de propagação da onda.

Portanto, combinando as Equações 2.16 e 2.17 na Eq. 2.18, e por conveniência, adiciona-se mais uma variável como mostrado na Eq. 2.17.

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho I_\lambda ds \quad (2.15)$$

$$J_\lambda = \frac{j_\lambda I_\lambda}{k_\lambda} \quad (2.16)$$

Desta maneira, a (2.15 torna-se,

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + J_\lambda \quad (2.17)$$

Logo, a (2.17 é definida como equação geral de transferência radioativa e é válida para qualquer sistema de coordenada. Apesar disso, para a realização da modelagem utilizou-se o software SMARTS.

2.7 Software SMARTS

O modelo SMARTS é um programa computacional utilizado para modelar o espectro solar sob condições determinadas utilizando dados atmosféricos e geográficos (MAMBRINI et al., 2015; HAAG, 2007).

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 usadas na família de modelos Lowtran e Modtran (GUEYMARD, 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 solar pode compreender entre 280 a 4000 nm (MYERS e GUEYMARD, 2004).

O código SMARTS (versão 2.9.5) possibilita dados locais que sejam utilizados sobre as características ópticas dos aerossóis, considerando o expoente de Ångström (α) para comprimentos de onda abaixo e acima de 500 nm, assim como o índice de turbidez, o fator de espalhamento-simples do albedo e a umidade relativa que afeta o comportamento óptico dos aerossóis.

A maioria dos modelos espectrais de irradiância solar adotam os dados de radiação espectral extraterrestre fornecidos pelo WRC (World Radiation Center). O programa MODTRAN, por exemplo, adota o modelo WRC85 (Wehrli, 1985) e o código SPCTRAL2 utiliza o modelo WRC81.

Gueymard (1995) propõe um espectro modificado para o uso no programa SMARTS, já que se faz necessário uma associação adequada de vários grupos de dados espectrais obtidos por diversas fontes, considerando que nenhum conjunto de dados espectrais propostos anteriormente era capaz de abranger todo o espectro de interesse. Por exemplo, a TSI entre 280 e 4000 nm usada no modelo SMARTS é de $1349,46 \text{ W/m}^2$, valor muito próximo dos dados originais WRC85 ($1349,52 \text{ W/m}^2$). O espectro solar extraterrestre adotado possui 1881 valores discretos, distribuídos em intervalos de 1 nm entre 280 e 1700 nm e 5 nm entre 1705 e 4000 nm.

Tadros, El-Mtwally e Hamed (2005) realizaram um estudo comparando os programas mais utilizadas para estimar valores da irradiância solar normal direta (DNSI) em diferentes bandas, utilizando os três modelos espectrais SPCTRAL2, SPCTR-1881 (SPCTRAL2 modificado) e SMARTS, e concluíram que o modelo SMARTS é o mais adequado para a maioria das bandas com o menor desvio percentual, sendo que o SPCTRAL2 em conjunto com o SMARTS para análise dentre os comprimentos de onda 695–2900 nm. Já Utrillas *et al.* (1998), em um estudo de comparação entre os softwares SPCTRAL2 e SMARTS através de uma análise da área urbana de Valência/Espanha, concluíram que ambos os algoritmos são fáceis de operar e todos os parâmetros necessários são acessíveis e que ambos são altamente aplicáveis para o estudo de ganhos energéticos. No entanto, destacam que o modelo SMARTS emprega constantes e funções paramétricas mais atualizadas e que este modelo possui uma resolução mais alta e apresenta menores desvios, por isso é mais interessante para simulações teóricas, se o modelo de aerossol é adequado.

2.8 Estado da Arte

No presente trabalho foi realizado o estado da arte a fim de facilitar a compreensão de algumas referências utilizadas para o desenvolvimento desse estudo como mostra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 Estado da Arte.

Autor (Ano)	Objetivo	Principais aspectos abordados
Gueymard (1995)	A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment	O desenvolvimento do código SMARTS.
Gueymard, Myers, e Emery (2002)	Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing	Propôs um espectro padrão como substituto ao ASTM E891-82, E892-82. E recomenda o uso do SMARTS para comparações entre medições em campo com simulação mais realísticas.
Gueymard (2005).	SMARTS code, version 2.9.5 User's Manual.	Manual utilizado para a realização de simulação via código.
Standard G173-03 (2003)	Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface.	Valores do Espectro de Referência utilizados para teste em condições STC de módulos fotovoltaicos.
Acker, j.g. and Leptoukh, g. (2007)	Online analysis enhances use of nasa earth science data	Sistema GIOVANNI, dados dos satelites TERRA, AQUA, sistema EOS, sensores MODIS, AIRS, sistema de reanalise do MERRA-2.
Gueymard (2019)	The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra.	O SMARTS é usado em uma grande variedade de aplicações em muitas disciplinas científicas. Realização experimental de espectros de referência padrão AM1.5 é conduzida.

Autor (Ano)	Objetivo	Principais aspectos abordados
Haag e Krenzinger (2010)	Análise da influência de parâmetros atmosféricos e locais na distribuição espectral da radiação solar.	Apresenta diferenças entre os espectros analisados.
Haag e Krenzinger (2014)	Determinação das características espectrais da radiação solar na superfície terrestre através de satélites	Mostra o estudo realizado e a metodologia através da análise de dados obtidos por satélites em sensoriamento remoto e como podem ser usados para simular espectros.
Margare et al. (2015)	Effect of seasonal spectral variations on performance of three different photovoltaic technologies in India.	Ilustra a variação do espectro ao longo do ano e suas implicações para diferentes tecnologias em um estudo aplicado na Índia.
Minemoto, Nagae, e Takakura (2007)	Impact of Spectral Irradiance Distribution and Temperature on the Outdoor Performance of Amorphous Si Photovoltaic Modules	Mostra as variações de medições realizadas no campo diferem das medições de laboratório.
Neves et al (2018)	Influência do espectro solar em módulos fotovoltaicos sob céu limpo, céu parcialmente nublado e céu nublado.	Estudo realizado no INPE para diferentes condições e como as variações espectrais influenciam nas respostas espectrais de células solares.
Ishii et al (2013)	Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions.	Apresenta que as variações de medições realizadas no campo diferem das medições de laboratório.
Dirnberger, et al (2015)	On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV Technologies.	Estudo realizado na Alemanha sobre o comportamento da resposta espectral dos módulos de a-Si, CdTe, c-Si,

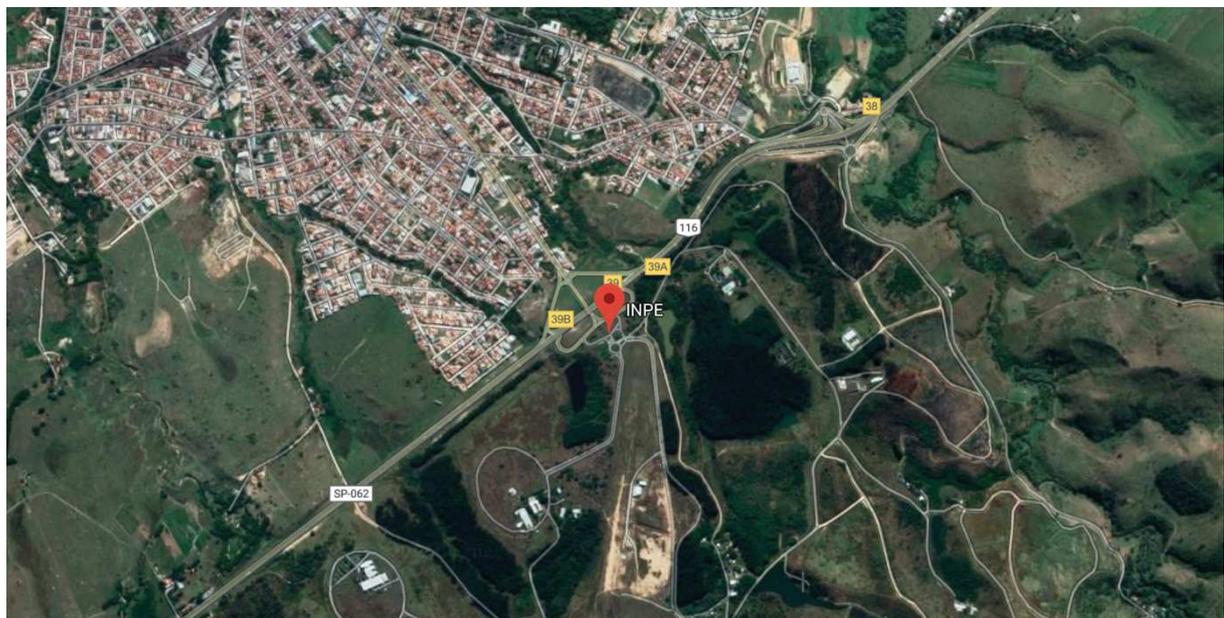
Autor (Ano)	Objetivo	Principais aspectos abordados
		CIGIS mostra que o impacto espectral é mais importante para a classificação de energia do que para as previsões de rendimento em campo.

3 METODOLOGIA

3.1 Sistema de Aquisição de Dados em Solo

Desde 2015, o Sistema de Aquisição de Espectro (SAE) encontra-se em operação no Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM/INPE em Cachoeira Paulista – SP (latitude: 22° 34' S e longitude: 45° 00' W), como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 Local onde foi realizado as medições em solo pelo SAE.



Fonte: Google Maps.

O SAE é composto por uma interface óptica desenvolvida especialmente para ser utilizada no trabalho de NEVES (2016). O sistema conta com um cabo de fibra óptica (comprimento de 25 m e número de abertura de 0,22), um espectrorradiômetro (modelo CCD 2048 fabricada pela GetSpec, faixa de operação entre 200 nm e 1100 nm e menor que 1% de exatidão para luz dispersa), um acionador eletrônico desenvolvido com a plataforma livre Arduino (modelo UNO2) e um microcomputador.

Nesse sistema, a radiação solar passa pela interface óptica, que está instalada no topo do prédio do LIM no plano horizontal e é enviada através do cabo de fibra óptica para o espectrorradiômetro, situado dentro do laboratório. Na Figura 3.2 é possível observar uma foto da interface óptica.

Figura 3.2 Interface Óptica desenvolvida em laboratório para a coleta dos dados espectrais.



Fontes: NEVES (2018)

Os dados de espectros referente ao ano de 2016 foram coletados, processados e armazenados no microcomputador sempre que o acionador envia um sinal automaticamente em um dos horários pré-determinados (de hora em hora, das 8 h às 18 h).

Os dados coletados e tratados pelo LIM foram fornecidos com as seguintes características: os valores registrados para o horário do meio dia, ou seja, às 12 h com $kt > 0,65$ para dias específicos do ano de 2016.

3.1.1 *Condições Experimentais para Medição em Solo*

Os dados medidos pelo espectrorradiômetro em solo são fornecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. A interface óptica (que é o elemento que coleta o espectro e envia os dados coletados via fibra óptica para o equipamento dentro do laboratório) está situado no teto do laboratório, onde o chão é de cimento e não possui árvores/obstáculos ao redor. Os dados enviados pelo INPE já foram filtrados para a condição de céu limpo, ou seja, Índice de Limpeza - kt são maiores que 0,65.

3.2 Sistema de Aquisição de Dados via Plataforma GIOVANNI

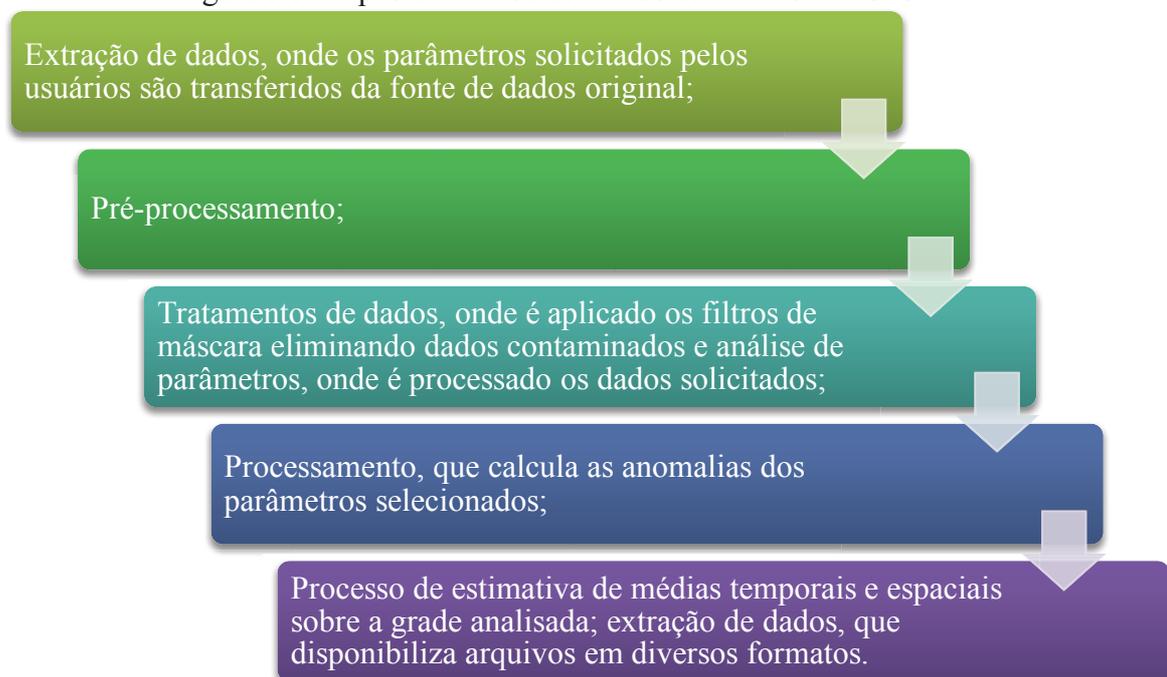
3.2.1 Plataforma GIOVANNI

A obtenção de parâmetros atmosféricos adotados como dados de entrada para o modelo paramétrico SMARTS, que estima a distribuição espectral da radiação solar, foi através de plataformas espaciais que processam dados remotamente, como o sistema GIOVANNI (acrônimo para GES-DISC Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure). Seu acesso é através do link: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

A base de dados para parâmetros atmosféricos foram os satélites TERRA e AQUA, que realizam as medidas, respectivamente pelo período da tarde e da manhã, em função de suas órbitas heliosíncronas.

Na plataforma remota GIOVANNI, a análise de dados ocorre conforme é mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 Etapas da análise de Dados da Plataforma GIOVANNI.



Ainda, dentro da plataforma GIOVANNI, os parâmetros geométricos e de localização são fornecidos em variáveis armazenadas sob a forma de matrizes, tais como latitude, longitude, ângulo solar zenital, ângulo zenital do sensor, ângulo de espalhamento, entre outros. Nesta dissertação, utilizou-se a dimensão de mesoescala.

Na dimensão de mesoescala os parâmetros atmosféricos são descritos em uma grade limitada, sendo possível informar as latitudes e longitudes com resolução espacial de 1 grau, ou selecionar uma área de interesse, como ilustrado na Figura 3.4. Essa resolução espacial utilizada permite que o tempo de processamento para cada parâmetro atmosférico na base anual seja de aproximadamente de 1 hora.

Figura 3.4 Exemplo da seleção em mesoescala do Estado do Rio Grande do Sul via Plataforma GIOVANNI.



Na Tabela 3.1 é apresentado a mesoescala utilizada para cada região de interesse estudada nesta dissertação.

Tabela 3.1 Mesoescala utilizada para as regiões de interesse.

Cidades	Lat.	Long.	Mesoescala
Cachoeira Paulista/SP	-22,674177	-44,9952	-45,9952; -23,6741; -43,9952; -21,6741
São Leopoldo/RS	-29,757615	-51,149316	-52,1493; -30,7576; -50,1493; -28,7576
Alegrete/RS	-29,7446	-55,8256	-56,8256; -30,7466; -54,8256; -28,7466
Caxias/RS	-29,1649	-51,18199	-52,1820; -30,1649; -50,1820; -28,1649
Torres/RS	-29,3471	-49,7410	-50,7410; -30,3471; -48,7410; -28,3471
Bagé/RS	-31,3351	-54,1121	-55,1121; -32,3351; -53,1121; -30,3351
Santa Maria/RS	-29,6815	-53,1120	-54,1120; -30,6815; -52,1120; -28,6815
Cachoeira Do Sul/RS	-30,0579	-52,96315	-53,9631; -31,057; -51,96315; -29,0579
Encruzilhada Do Sul/RS	-30,549322	-52,5281	-53,5281; -31,5493; -51,5281; -29,5493
Vacaria/RS	-28,5047	-50,9415	-51,9415; -29,5047; -49,9415; -27,5047
Santana Do Livramento/RS	-30,8758	-55,5399	-56,5399; -31,8758; -54,5399; -29,8758
Santo Angelo/RS	-28,299944	-54,266582	-55,2665; -29,2999; -53,2665; -27,2999
Passo Fundo/RS	-28,263627	-52,428562	-53,4285; -29,2636; -51,4285; -27,2636
Cambará Do Sul/RS	-29,049819	-50,14195	-51,1419; -30,0498; -49,1419; -28,0498
Cidreira/RS	-30,172456	-50,207973	-51,2079; -31,1725; -49,2079; -29,1725
Herval/RS	-32,028560	-53,393540	-54,3935; -33,0285; -52,3935; -31,0285
Pelotas/RS	-31,758557	-52,329047	-53,3290; -32,7585; -51,3290; -30,7585
Santa Vitória do Palmar/RS	-33,518352	-53,366770	-54,3668; -34,5183; -52,3668; -32,5183
São Borja/RS	-28,658985	-56,007922	-57,0079; -29,6590; -55,0079; -27,6590

3.2.2 Satélites

As informações sobre diversos parâmetros atmosféricos, entre eles aerossóis e suas propriedades ópticas, água precipitável e ozônio, foram obtidas por plataformas espaciais como os satélites TERRA (EOS AM-1) e AQUA (EOS PM-1), como pode ser observado na Figura 3.5. Ambos os satélites têm uma órbita polar hélio-síncrona e possuem as características apresentadas na Tabela 3.2.

Figura 3.5 Sistema de satélites da Terra.



Fonte: EOS (2017).

Tabela 3.2 Características dos Satélites TERRA E AQUA.

Descrição	Satélite TERRA	Satélite AQUA
Projeto / Instituição responsável.	Earth Observing System (EOS) / NASA	
Satélite Lançado	18 Dez 1999	04 Mai 2002
Altitude	705 km	
Horario de Passagem na Linha do Equador	10h30min	13h30min
Sensores acoplados	MODIS, ASTER, MISR, CERES e MOPPIT	MODIS, AMSR, AMSU, AIRS, CERES e HSB Estes

3.2.2.1 Sensor MODIS

O MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) é um instrumento desenvolvido pelo GSFC (Goddard Space Flight Center) na NASA e possui 36 canais espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 µm com resolução de 12 bits e resolução espacial que varia de 250 a 1000 metros de acordo com o canal usado. Os instrumentos MODIS produzem aproximadamente 1,2 TB de dados diários (600 GB em cada satélite). Em função desta elevada quantidade de dados, foi utilizada a plataforma GIOVANNI para a aquisição e processamento remoto destes dados.

Os dados dos sensores do instrumento MODIS estão associados à medição de propriedades das nuvens, fluxo de energia radiante, água precipitável e propriedades ópticas dos aerossóis. Os produtos atmosféricos, como aerossóis e vapor de água, com resolução temporal diária e mensal são classificadas como MOD08 de nível 3, por exemplo os mapas de mesoescala 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.

O sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA fornece uma cobertura global diária da quantidade de material particulado presente na atmosfera, tendo sido o primeiro sensor concebido com características específicas para o estudo de aerossóis.

Os produtos MODIS gerados pelo satélite TERRA são identificados pelo prefixo MODxx, os produzidos pelo satélite AQUA levam a identificação MYDxx (MYD08, por exemplo). Ambos os satélites têm órbita polar em sincronia com o Sol, a 705 km de altitude. No entanto, o horário de passagem do satélite TERRA é em torno das 10h30 min no período da manhã, enquanto que o horário de passagem do AQUA é em torno de 13h30min no período da tarde. Assim, utilizando a média para o dia de ambos os satélites, poderemos chegar a valores mais apurados.

3.2.2.2 Sensor AIRS

O instrumento AIRS a bordo do satélite AQUA foi projetado pelo *Jet Propulsion Laboratory* da NASA, para determinação da abundância de vários constituintes atmosféricos, entre eles o ozônio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, dióxido sulfúrico e detectar a presença de partículas em suspensão na atmosfera.

O AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*) é um instrumento de rastreamento perpendicular ao caminho da órbita com alta resolução espectral. Este sensor opera com 4 detectores que operam no visível e infravermelho próximo (0,4 - 1,0 μm) e 2378 detectores de radiação na faixa do infravermelho distante (3,7 - 15,4 μm). De acordo com Haag (2012), a qualidade dos dados adquiridos pelo sensor AIRS é comparável aos avaliados in situ por sondas a bordo de balões de sondagens atmosféricas. O sensor também foi dimensionado para aferir a temperatura da atmosfera com exatidão de 1°C em camadas de 1 km e umidade com precisão melhor que 20% em camadas de 2 km.

3.2.3 Sistema de Reanalise MERRA

O código de reanalise de dados MERRA (do inglês The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application) foi estimulado pelo reconhecimento de que vários aspectos do ciclo hidrológico representados em gerações passadas não estavam adequados para estudos do climatológicos (RIENECKER et al., 2011).

Através do sistema de assimilação de dados da NASA (National Aeronautics and Space Administration), a reanálise MERRA possui alta resolução (0,5° Latitude por 0,67° de Longitude), com dados disponíveis a cada 3 horas.

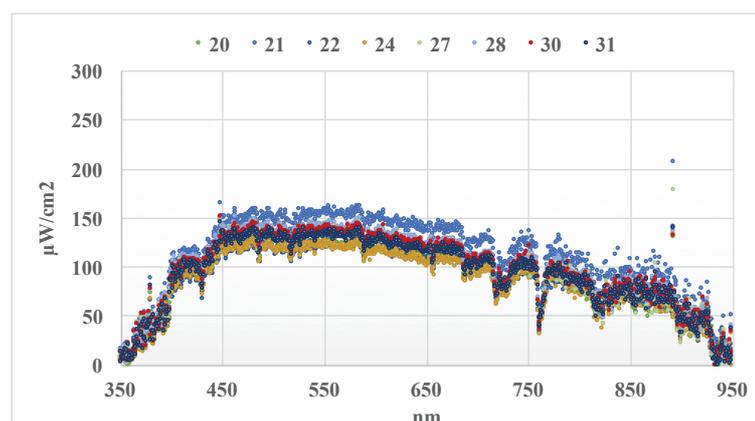
Este sistema foi proposto para tratar os dados de ciclo de água a partir de 1979 na América do Sul como uma contribuição para a comunidade científica e pesquisas de reanálise (QUADRO, 2012).

3.3 Tratamento e Agrupamento de Dados

3.3.1 Tratamento e Agrupamento de Dados em Solo

Os dados medidos em solo no LIM-INPE, não contemplam todos os dias referente ao ano de 2016, mas medições aleatórias, neste caso, dias aleatórios para todos os meses, entre o período de Janeiro a Dezembro de 2016, cujo o horário das medidas foi às 12:00 horas. Estes dados foram tratados e filtrados em uma planilha de MS Excel, cujos espectros medidos foram para o intervalo de 350 a 950 nm de comprimento de onda e a irradiância espectral medida foi registrada na unidade $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$, conforme o exemplo apresentado na Figura 3.6 que ilustra o comportamento do espectro medido para os dias 20, 21, 22, 24, 27, 28, 30 e 31 de Março.

Figura 3.6 Espectros medidos para determinados dias do mês de Março do ano de 2016 para a cidade de Cachoeira Paulista – SP (latitude: 22° 34' S e longitude: 45° 00' W).



3.3.2 *Tratamento e Agrupamento de Dados para Simulação*

Os parâmetros atmosféricos foram extraídos da Plataforma GIOVANNI em formatos distintos visando objetivos diferentes. Os dados diários e para a simulações do Estado do Rio Grande do Sul, utilizou médias mensais.

3.3.2.1 *Dados Diários*

Para a cidade de Cachoeira Paulista/SP foi necessário a coleta de dados diário para comparar com as medições em solo, e validar o método utilizado. Foi necessário realizar um filtro dos dados referentes ao ano de 2016, e selecionar dias aleatórios que tivessem valores medidos para todos os parâmetros necessários para simulação, conforme itens selecionados dentro da Plataforma GIOVANNI:

- Time-Series, Area-Averaged of Precipitable water vapor (IR retrieval) daily – Mean of level 3A para sensor MODIS, satélite TERRA,
- Time-Series, Area-Averaged of Precipitable water vapor (IR retrieval) daily – Mean of level 3A para sensor MODIS, satélite AQUA.
- Time-Series, Area-Averaged of Ozone Total Column (Daytime, AIRS only), monthly.
- Time-Series, Area-Averaged of Aerosol Optical Depth 550 nm (land only) daily, para sensor MODIS, satélite TERRA,
- Time-Series, Area-Averaged of Aerosol Optical Depth 550 nm (land only) daily, para sensor MODIS, satélite AQUA.
- Time-Series, Area-Averaged of Surface Albedo, MERRA-2.
- Time-Series, Area-Averaged Surface Pressure monthly, MERRA-2.

Na Figura 3.7 e Figura 3.8, são apresentados dois exemplos da quantidade de dados extraídos da plataforma GIOVANNI ao longo de um ano, em formato de arquivo (*.csv). Dentre esses valores, foram selecionados os dias apresentados na Tabela 3.3.

Figura 3.7 Série temporal, média por área de Coluna total de ozônio (somente durante o dia). Sensor AIRS, Satélite AQUA.

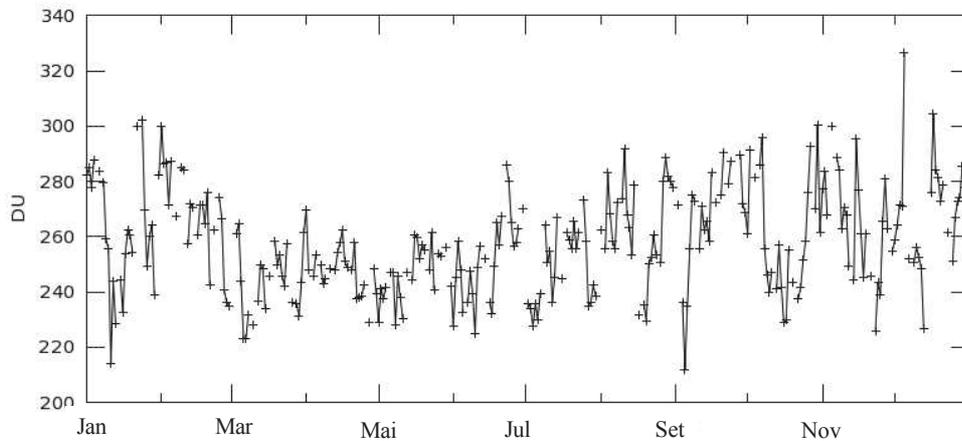


Figura 3.8 Série temporal, média por área de vapor por coluna de água precipitado. Sensor MODIS, Satélite AQUA.

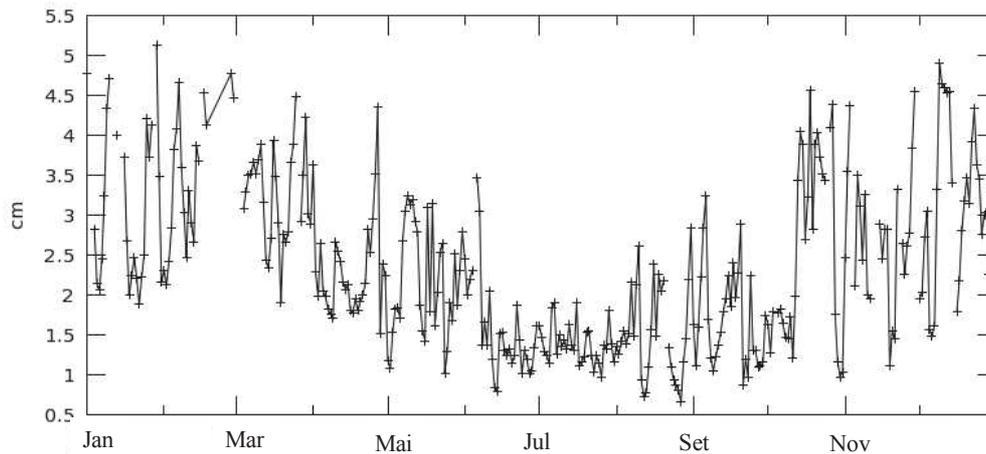


Tabela 3.3 Período dos parâmetros atmosféricos coletados para a cidade de Cachoeira Paulista/SP.

Tempo de Resolução	Dia Selecionado	
Diário	08/01/2016	18/06/2016
	06/03/2016	07/07/2016
	22/04/2016	23/09/2016
	11/06/2016	24/10/2016

3.3.2.2 Dados Mensais

Já para as cidades escolhidas do Estado do Rio Grande do Sul, os dados a serem informados na simulação foram os dias referentes aos equinócios (posicionamento médio do Sol em relação à Terra) e solstícios (maior iluminação de um dos hemisférios), no entanto obtidos para o horário do meio dia solar, procurando encontrar variações máximas e médias entre cada espectro. Na Plataforma GIOVANNI o filtro de dados foi através da seleção de valores médios para séries temporais (do inglês *time series area averaged values*).

3.3.2.3 Mapas Temporais

Para elaboração dos mapas utilizados os seguintes itens selecionados dentro da Plataforma GIOVANNI:

- Tipo de plotagem: mapas de tempo médio (do inglês *time averaged map*);
- Seleção do período: 01/01/2008 a 31/12/2018;
- Seleção da região mesoescala/país: Brasil;
- Dentro das variáveis, foram selecionados para cada mapa temporal:
 - Precipitable water vapor (IR retrieval) – Mean of level 3A, para sensor MODIS, satélite TERRA,
 - Precipitable water vapor (IR retrieval) – Mean of level 3A para sensor MODIS, satélite AQUA.
 - Ozone Total Column (AIRS only).
 - Carbon Dioxide Mole Fraction in Free Troposphere (AIRS only).
 - Aerosol Optical Depth 550 nm (land only) para sensor MODIS, satélite TERRA,
 - Aerosol Optical Depth 550 nm (land only) para sensor MODIS, satélite AQUA.

3.3.2.4 Valores calculados de Massa de Ar (AM)

Os valores de massa de ar (AM) utilizados nas simulações dos espectros foram calculados dentro do software *Engineering Equation Solver* – EES, conforme é apresentado no exemplo do APÊNDICE A.

Na Tabela 3.4 é mostrado os dias (N) que apresentam o comportamento médio do mês com relação a irradiação. Esses dias foram usados na simulação para calcular da massa de ar, para gerar o espectro mensal e extrair a irradiância instantânea de cada município estudado.

Tabela 3.4 Dia médio do mês.

Mês	Dia	Data	N do ano
Janeiro	i	17	17
Fevereiro	31 + i	16	47
Março	59 + i	16	75
Abril	90 + i	15	105
Mai	120 + i	15	135
Junho	151 + i	11	162
Julho	181 + i	17	198
Agosto	212 + i	16	228
Setembro	243 + i	15	258
Outubro	273 + i	15	288
Novembro	304 + i	14	318
Dezembro	334 + i	10	344

Fonte: DUFFIE e BECKMAN (2013).

3.3.2.5 Parâmetros Atmosféricos de Cachoeira Paulista/SP

Após realizar as consultas e extrair os dados da Plataforma GIOVANNI, foi necessário organizar dos dados visando facilitar a edição do código SMARTS na etapa de validação. Por este motivo, a Tabela 3.5 apresenta tais parâmetros atmosféricos de Cachoeira Paulista para o ano de 2016.

Tabela 3.5 Parâmetros Atmosféricos de Cachoeira Paulista para o ano de 2016.

DIA	Pressão Atmosférica (hPa)	Vapor de água (cm)	Ozônio (DU) /1000	Aerossol (sem unidade)	Albedo (sem unidade)	AM
08/01	928,04	3,251	279,70	0,1306	0,1341	1,000
6/03	931,02	3,560	223,33	0,0523	0,1371	1,043
22/04	931,04	2,269	237,59	0,0532	0,1421	1,215
11/06	934,92	2,174	248,72	0,0490	0,1401	1,433
18/06	934,92	1,252	249,48	0,0383	0,1401	1,442
07/07	934,24	1,675	239,49	0,0234	0,1422	1,421
23/09	932,52	1,072	279,13	0,0290	0,1335	1,077
24/10	930,21	2,365	251,40	0,1550	0,1334	1,017

No caso das cidades, o procedimento repetiu-se, no entanto, para facilitar a comparação entre os valores submetidos dos parâmetros e resultados dos espectros, optou-se por dispor os dados em tabelas junto aos resultados, no próximo capítulo.

3.4 Análise de Dados

Na etapa de análise de dados para o município de Cachoeira Paulista, é apresentado algumas comparações para auxiliar na análise de dados.

Primeiramente foi realizado uma comparação qualitativa através da visualização do comportamento do espectro medido em solo para o município de Cachoeira Paulista/SP e espectros simulados para o mesmo período e horário. O objetivo é apresentar as similaridades entre ambos. Em seguida, foi efetuada uma análise de variação percentual entre os espectros medidos em solo e simulados para o município de Cachoeira Paulista/SP focando em mostrar as faixas de comprimento de onda que ocorreu as maiores variações de valores assim como as menores variações. Depois foi realizado outra comparação gráfica entre espectros mencionados, procurando mostrar de outra forma uma correlação entre eles. Por fim, a última análise gráfica procurou mostrar as variações entre o espectro simulado para o local específico e a norma de referência ASTM G-173-03.

Logo, para ilustrar o efeito das variações do espectro solar é conveniente definir um parâmetro que pode representar a extensão em que um espectro pode alterar para o vermelho ou para o azul. Diversos autores têm usado índices para avaliar diferentes comportamentos (MINEMOTO et al., 2007; PEREZ-LOPEZ et al., 2007; CORNARO; ANDREOTTI, 2013; NEVES, 2016). Logo, utilizou-se do indicador APE para auxiliar na qualificação do tipo de espectro solar do local analisado, também conhecido como a Energia Média dos Fótons (do inglês Averaged Photon Energy - APE).

3.4.1 *Varição Percentual*

Os diversos valores estão agrupados em uma planilha com valores dentre o intervalo de 300 a 1700 nm, totalizando 1401 valores para cada dia analisado.

O método de cálculo utilizado, informa em percentuais a diferença entre o espectro simulado e o espectro medido pelo equipamento no LIM ((3.1), e a diferença entre o espectro simulado e o espectro de referência ASTM G173-03 ((3.2), ou seja, destaca apenas as variações dentre a comparação.

$$Var1_{\lambda}(\%) = \left[\frac{Valor_Medido_dia_{\lambda} - Valor_Simulado_dia_{\lambda}}{Valor_Simulado_dia_{\lambda}} \right] * 100 \quad (3.1)$$

$$Var2_{\lambda}(\%) = \left[\frac{Valor_Simulado_dia_{\lambda} - Valor_ASTM_{\lambda}}{Valor_ASTM_{\lambda}} \right] * 100 \quad (3.2)$$

onde $Valor_Simulado_dia_{\lambda}$ é o valor obtido na simulação para o respectivo comprimento de onda através da simulação pelo SMARTS, $Valor_Medido_dia_{\lambda}$ é o valor obtido pelo espectroradiômetro para o respectivo comprimento de onda, $Valor_ASTM_{\lambda}$ é o valor de referência para espectro padrão 1,5AM para cada comprimento de onda e $Var_{\lambda}(\%)$ é o valor de variação percentual obtido no cálculo para cada comprimento de onda.

3.4.2 *Valor Médio*

Na sequência foi calculado o valor médio a partir da média aritmética que é calculada por meio da adição de um grupo de números e, em seguida, da divisão pela contagem desses números.

Esse valor médio é dado pela variação percentual (Eq. 3.2) de uma determinada série de dados, por exemplo, dentre os valores de comprimentos de onda: 390 a 770 nm, 770 a 950 nm, 390 a 950 nm.

3.4.3 *Índice APE*

A energia média de fótons (APE) é comumente usada como um meio de classificar a irradiância solar com base na distribuição relativa de energia sobre o espectro (NORTON, AMILLO, & GALLEANO; 2015). O índice APE (do inglês Average Photon Energy) é um indicador qualitativo das variações do espectro que considera o tempo do dia, a sazonalidade, condições climáticas (MAGARE et al., 2015).

Este indicador é usado para saber se o espectro solar influencia em células de diferentes tecnologias. Ainda o APE é definido como a energia média dos fótons na região do espectro solar, dividindo a irradiação integrada pela densidade de fluxo do fóton integrada (MAMBRINI et al., 2015), conforme Eq. 3.3.

$$APE = \frac{\int_0^\lambda G(\lambda)d\lambda}{q \int_0^\lambda \phi(\lambda)d\lambda} [ev] \quad (3.3)$$

onde q é a carga elementar do elétron, G é o espectro da irradiação obtido na simulação do SMARTS integrada dentre os comprimentos de onda 300 e 1680 nm e ϕ é a densidade de fluxo espectral obtida através da simulação do SMARTS integrada dentre os comprimentos de onda 300 e 1680 nm.

Em outras palavras, o APE depende diretamente da irradiação difusa para diferentes tipos de massa de ar, pois determina o nível de cobertura de nuvens permitindo escolher o melhor módulo para as condições climáticas (RODZIEWICZ et al., 2013). Assim, valores altos de APE indicam que correspondem ao espectro azul que apresentam uma predominância de fótons mais adequados para a região do ultravioleta e visível, já valores baixos indicam que correspondem ao espectro vermelho (CORNARO; ANDREOTTI, 2013).

É destacado por RODZIEWICZ et al. (2013), que para massa de ar de 1,5AM, 98% dos valores obtidos estão dentro da faixa de integração de 300-2500 nm. Todavia, as simulações realizadas neste trabalho utilizam a faixa de 300 até 1700 nm, que é região de maior interesse para aproveitamento solar fotovoltaico. Para facilitar é apresentado na Tabela 3.6 os valores de referência do indicador APE.

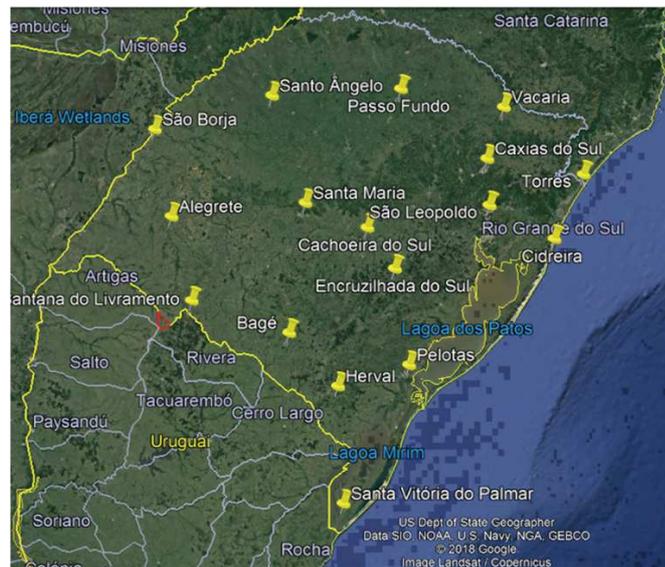
Tabela 3.6 Valores de referência do APE para o espectro padrão 1.5 AM.

Faixa Espectral de integração (nm)	APE (eV)	Fonte
300-4000 nm	1,43	(RODZIEWICZ et al., 2013)
300-2500 nm	1,48	
300-1700 nm	1,62	(MINEMOTO et al., 2007; RODZIEWICZ et al., 2013)
300-1100 nm	1,86	
350-1050 nm	1,88	(MAGARE et al., 2015).
350-1700 nm	1,58	

3.5 Cruzamento de dados

Na Figura 3.9, é mostrado a posição geográfica dos dezoito municípios estudados para o Estado do Rio Grande do Sul através do software Google Earth.

Figura 3.9 Distribuição dos Municípios.



As cidades foram identificadas através do cruzamento de dados entre o posicionamento geográfico (Figura 3.9) e a dinâmica da ocupação do solo (Figura 2.3), conforme mostrado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Relação de municípios e zona de cobertura.

Cidades	Unidade Geomorfologicas	Zona de cobertura do solo.
Alegrete/RS	Cuesta do Haedo	Campos sujos
São Leopoldo/RS	Depressão Central	Campos
Cachoeira Do Sul/RS	Depressão Central	Campos
Santana Do Livramento/RS	Depressão Central	Campos
Encruzilhada Do Sul/RS	Depressão Central/ Escudo Rio-grandense	Campos
Bagé/RS	Escudo Sul-rio grandense	Campos sujos
Herval/RS	Escudo Sul-rio grandense	Campos sujos
Caxias/RS	Planalto	Floresta
Vacaria/RS	Planalto	Campos
Santo Angelo/RS	Planalto	Floresta
Passo Fundo/RS	Planalto	Floresta
Cambará Do Sul/RS	Planalto	Campos
São Borja/RS	Planalto	Floresta
Santa Maria/RS	Planalto / Depressão Central	Campos
Torres/RS	Planície Costeira	Agrícola
Cidreira/RS	Planície Costeira	Dunas
Santa Vitória do Palmar/RS	Planície Costeira	Agrícola
Pelotas/RS	Planície Costeira	Agrícola

4 RESULTADOS

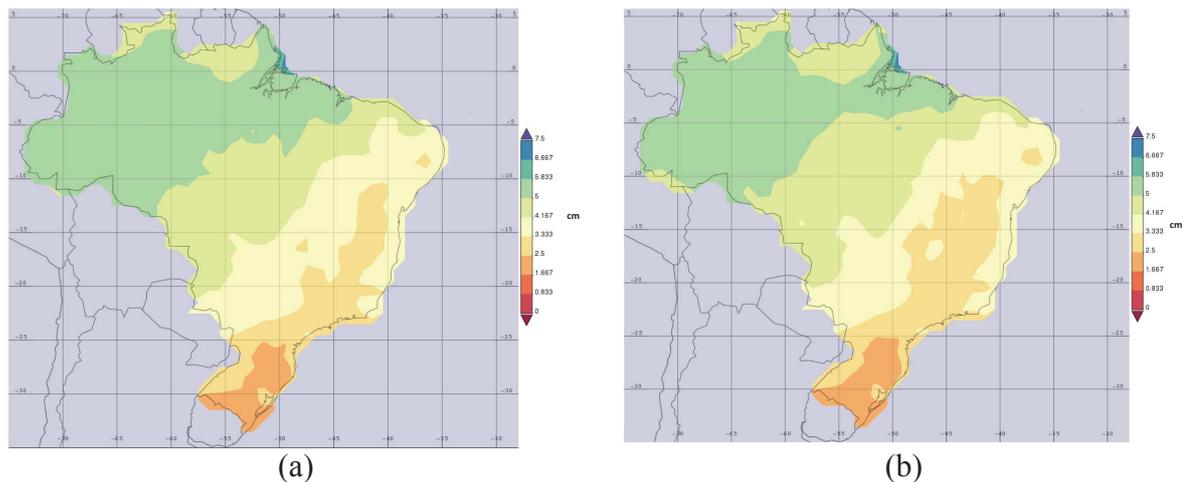
4.1 Mapas Temporais do Território Brasileiro com Parâmetros Atmosféricos

O mapa de tempo médio mostra os valores de dados para cada célula da grade dentro da área especificada pelo usuário, calculada em média (linearmente) sobre o intervalo de tempo especificado pelo usuário como uma camada do mapa. Os valores de preenchimento não contribuem para o valor médio de tempo. Dentro da Plataforma Giovanni, os mapas gerados podem ser ampliados e panorâmicos e há opções de plotagem que incluem a configuração de valores mínimos e máximos para a escala de cores e, em alguns casos, a seleção de outras paletas. Na sequência são apresentados valores médios para os fatores: vapor da água, aerossol, ozônio e dióxido de carbono.

4.1.1 Vapor da água

A Figura 4.1 (a, b) apresenta os valores médios registrados pelos satélites TERRA e AQUA, durante 10 anos, dentre o período de Janeiro de 2008 e Dezembro de 2018.

Figura 4.1 (a) Mapa de mesoescala de valores médios de vapor de água próximo ao Infravermelho (MODIS-TERRA) registrado às 10h30min (2008 – 2018) e (b) Mapa de mesoescala de valores médios de vapor de água próximo ao Infravermelho (MODIS-AQUA) registrado às 13h30min (2008 - 2018).



A evaporação dos oceanos, rios e lagos, juntamente com a transpiração da vegetação em grandes florestas, são fontes de vapor de água para a atmosfera. Por outro lado, nos grandes desertos e em grandes altitudes, a quantidade de vapor de água pode ser tão baixa a ponto de ser imensurável a sua concentração.

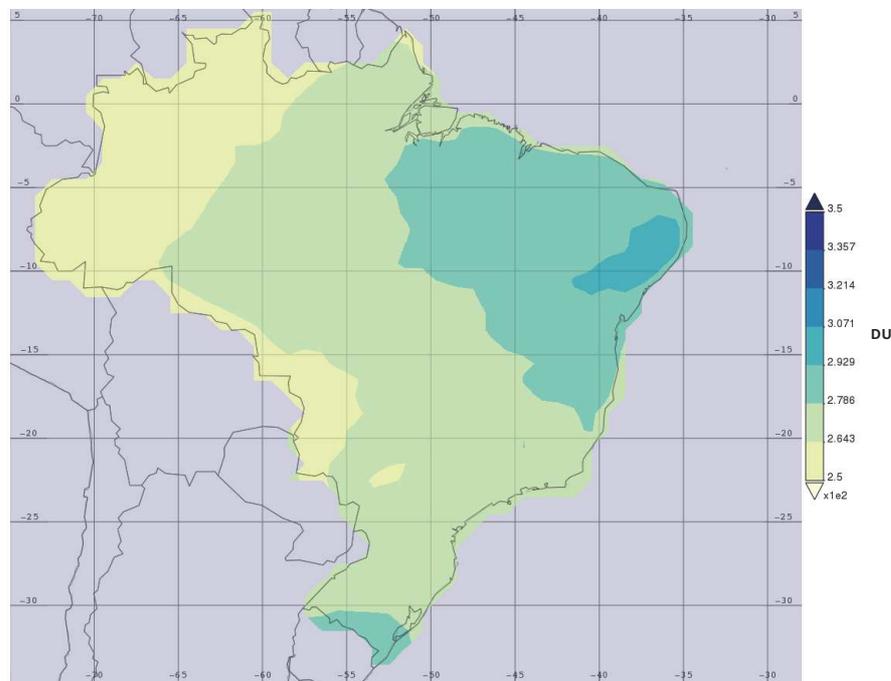
Pode-se perceber que em ambos os mapas, a média de vapor da água no Brasil não é uniforme. Ao considerar para o Estado do Rio Grande do Sul, com os valores entre 1,66 e 2,5 cm, existe uma diferença de 16% a 75% maior que o valor utilizado para o espectro de referência das normas ASTM G-173-03 e IEC 60904-3 cujo valor é de 1,42 cm.

4.1.2 Ozônio

Ao atravessar a atmosfera terrestre, o ozônio (O_3) apresenta a atenuação da radiação solar na região do ultravioleta e em determinadas faixas do espectro do infravermelho, em razão da concentração deste gás ser elevada, enquanto possui uma fraca absorção na região do visível do espectro.

A Figura 4.2 mostra os valores médios para a concentração de ozônio entre o período de janeiro de 2008 e dezembro de 2018. Estes dados foram obtidos pelo uso do sensor AIRS a bordo no satélite AQUA.

Figura 4.2 Mapa de mesoescala de valores médios da quantidade de ozônio na atmosfera obtido pelo sensor AIRS a bordo do satélite AQUA, registrado às 10h30min, dentro o período de 2008 a 2018.

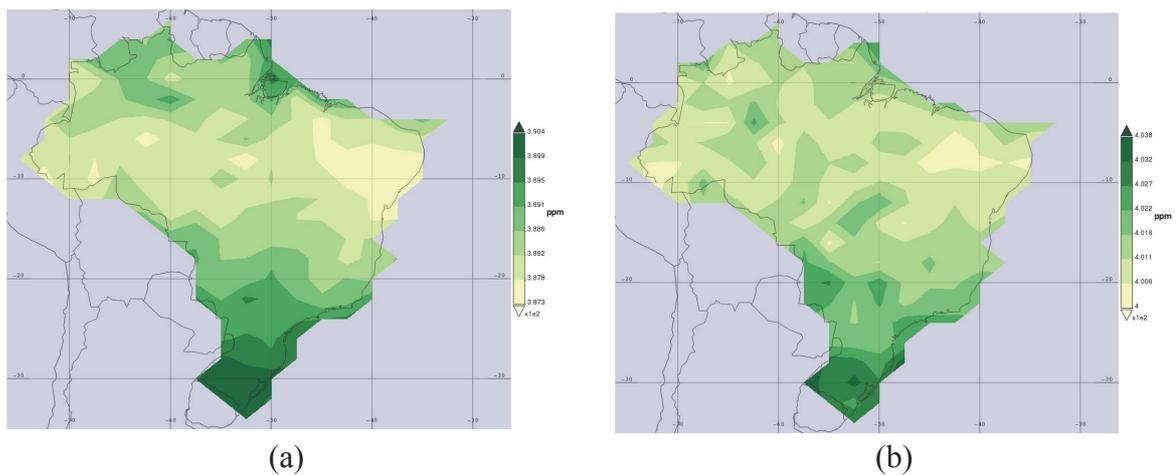


É possível visualizar através do mapa de mesoescala que os valores médios no território brasileiro, ficam abaixo do valor utilizado pelas normas ASTM G-173-03 e IEC 60904-3 cujo valor é de 343,8 DU.

4.1.3 *Dióxido de Carbono*

A partir da Figura 4.3 (a, b) se percebe que os valores médios em todo o território brasileiro para o ano de 2010 ficavam entre 387 a 390 ppm, enquanto para 2016 ficaram entre 400 e 403 ppm. O dióxido de carbono (CO_2) é considerado um gás permanente que apresentou um aumento em sua concentração na atmosfera ao longo do tempo. O valor considerado pela norma ASTM G-173-03 e IEC 60904-3 é de 370 ppm.

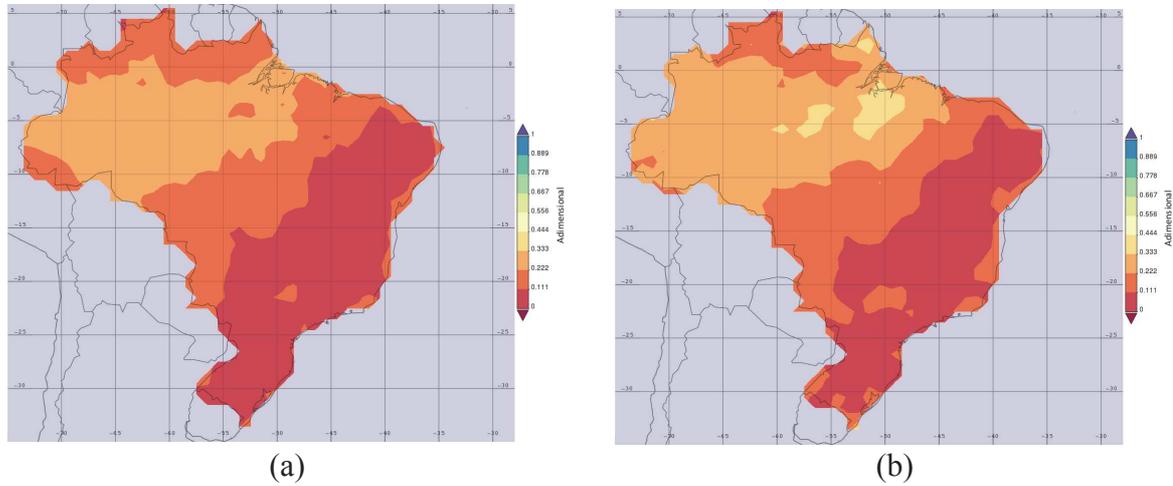
Figura 4.3 Mapas de mesoescala dos valores médios para dióxido de carbono obtidos pelo sensor AIRS – AQUA, registrado às 13h30min para o ano (a) 2010 e (b) (2016).



4.1.4 *Aerossóis*

Na Figura 4.4 (a, b) são apresentados os valores médios registrados pelos satélites TERRA e AQUA dentre o período de Janeiro de 2008 e Dezembro de 2018.

Figura 4.4 Mapas de valores médios diários para a espessura ótica de aerossóis pelo (a) sensor MODIS-AQUA) registrado às 13h30min dentro o período de 2008 a 2018 e (b) sensor MODIS-TERRA) registrado às 10h30min dentro o período de 2008 a 2018.



Aerossóis são partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, podendo ter origem em processos naturais, como tempestades de areia, vulcões em atividade ou antropogênicos, em eventos de queimadas, atividades humanas e industriais, entre outras.

Os dados em mesoescala apresentados na Figura 4.4 (a, b) possuem um algoritmo de verificação para detecção de contaminação devido a existência de nuvens. Como os valores médios de espessura ótica de aerossóis variam de 0 a 0,4 para alguns locais como no Rio Grande de Sul, enquanto os valores de referência pelas normas ASTM G-173-03 e IEC 60904-3 é de 0,084.

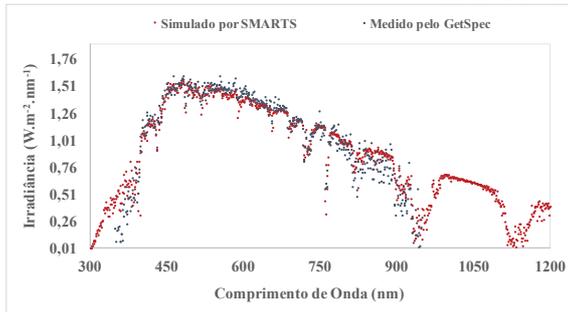
4.2 Validação dos espectros simulados para Cachoeira Paulista/SP

Nesta parte do trabalho são apresentados os dez dias que foram selecionados - de forma aleatória - dentro dos dados disponibilizados pelo INPE, considerando se haviam todos os parâmetros atmosféricos necessários para simular os espectros para a cidade de Cachoeira Paulista/SP.

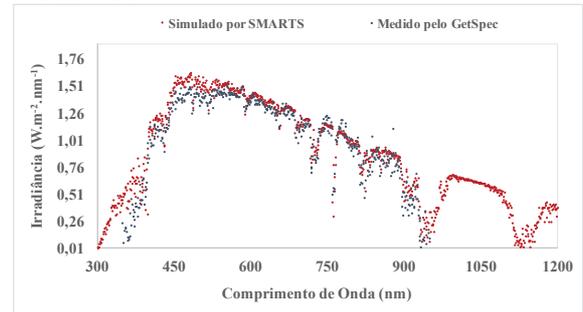
4.2.1 Medição em Solo vs Simulação SMARTS

Na Figura 4.5 (a, b, c, d, e, f, g, h) são apresentadas as curvas de comportamento espectral referentes aos espectros medidos em solo no LIM/INPE para às 12 horas do dia selecionado e as curvas de comportamento dos espectros simulados pelo SMARTS para o mesmo período para a cidade de Cachoeira Paulista/SP.

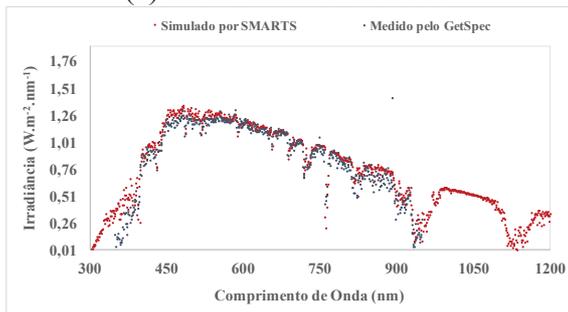
Figura 4.5 Comparação entre os espectros simulados e espectros medidos no município de Cachoeira Paulista/RS.



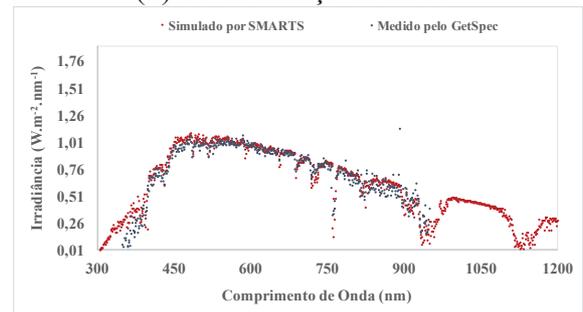
(a) 08 de Janeiro de 2016.



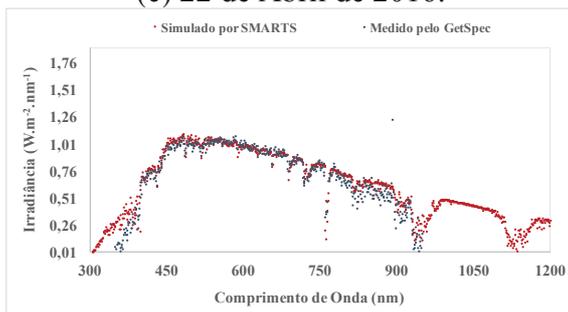
(b) 06 de Março de 2016.



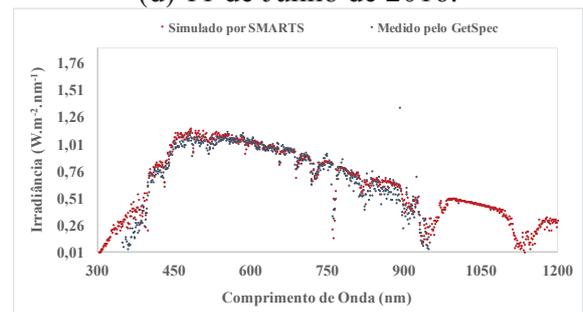
(c) 22 de Abril de 2016.



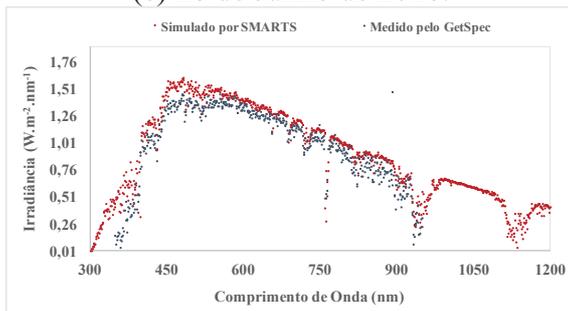
(d) 11 de Junho de 2016.



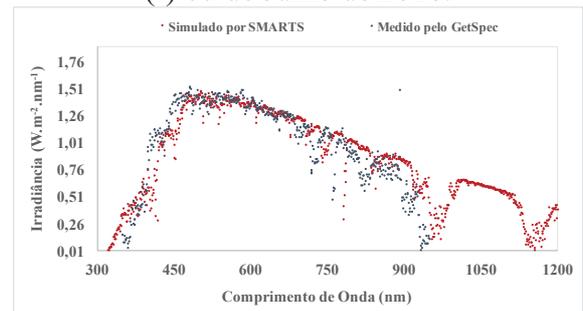
(e) 18 de Junho de 2016.



(f) 07 de Julho de 2016.



(g) 23 de Setembro de 2016.

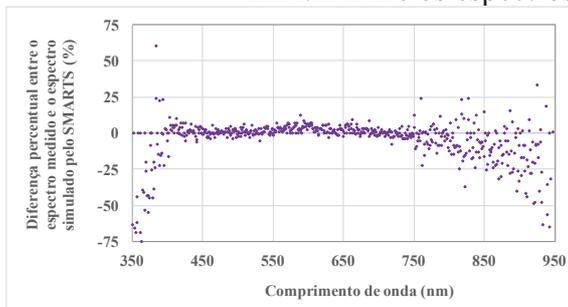


(h) 24 de Outubro de 2016.

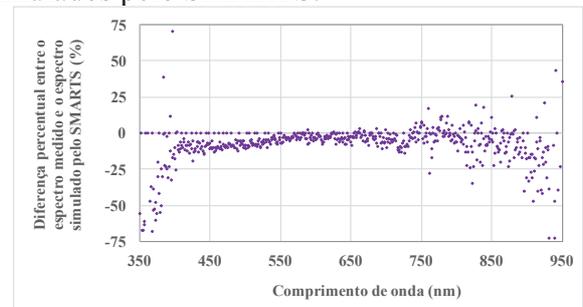
Fica claro que a faixa de medição não abrange a mesma faixa espectral da simulação, essa situação é dada pelo motivo do filtro realizado pelo LIM/INPE, que já forneceu os dados medidos na faixa de 350 a 950 nm. Durante as amostras apresentadas, é possível perceber que a simulação pode apresentar oscilações com relação à amplitude do espectro, cujos comportamentos podem ser melhor analisados na Figura 4.6 (a, b, c, d, e, f, g, h), pois os resultados ilustram as diferenças percentuais entre os espectros confrontados – medidos em

campo versus simulados para componente direta. Em outras palavras, essas diferenças percentuais realçam as regiões do espectro que apresentam maior confiabilidade, enquanto outras faixas de comprimento de onda tendem a ter maiores oscilações.

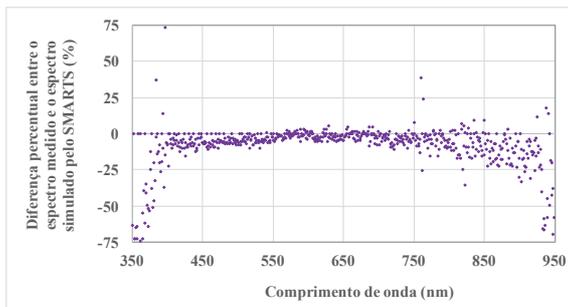
Figura 4.6 Diferença percentual entre os espectros medidos pelo espectrorradiômetro no LIM/INPE e os espectros simulados pelo SMARTS.



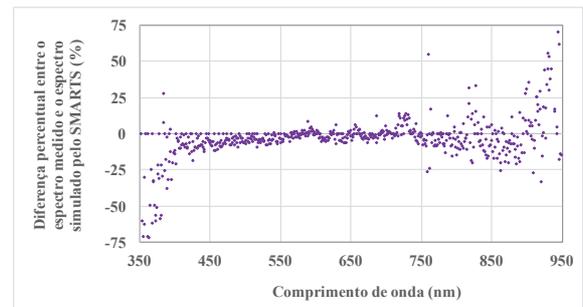
(a) 08 de Janeiro de 2016.



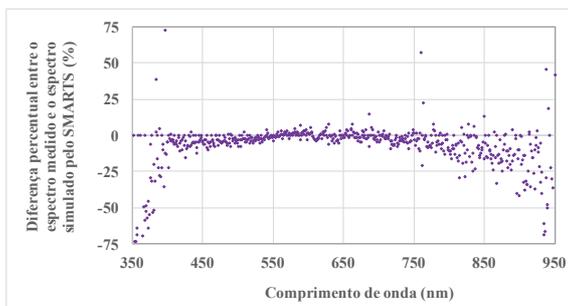
(b) 06 de Março de 2016.



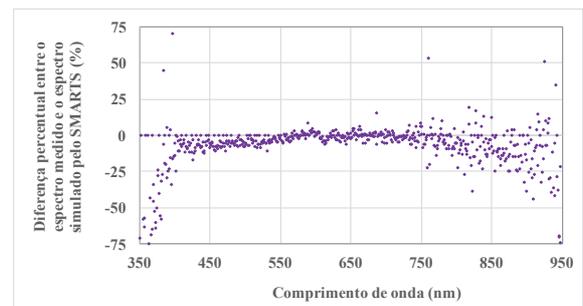
(c) 22 de Abril de 2016.



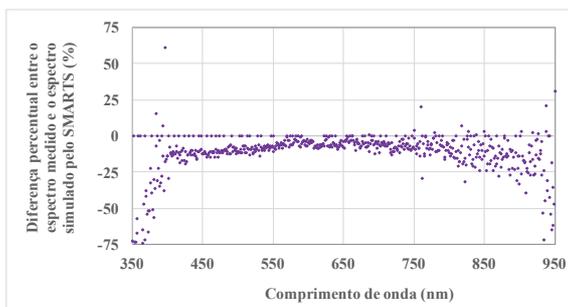
(d) 11 de Junho de 2016.



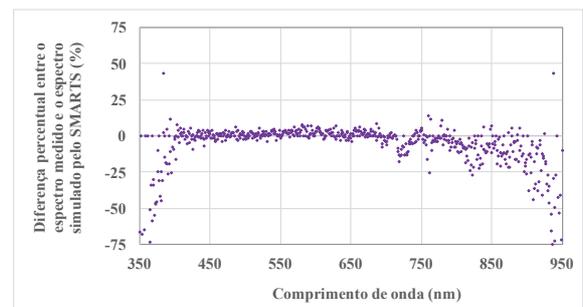
(e) 18 de Junho de 2016.



(f) 07 de Julho de 2016.



(g) 23 de Setembro de 2016.



(h) 24 de Outubro de 2016.

Dentre os dias analisados na Figura 4.6 (a, b, c, d, e, f, g, h), a Tabela 4.1 apresenta os valores médios da variação percentual para cada intervalo. Os valores negativos mostram que há perdas com relação a irradiância, enquanto os valores positivos mostram que há ganhos com relação aos valores simulados.

Tabela 4.1 Valor médio da variação percentual dentre espectros medidos e simulados.

Intervalo (nm)	08/01 (%)	06/03 (%)	22/04 (%)	11/06 (%)	18/06 (%)	07/07 (%)	23/09 (%)	24/10 (%)
390 a 770	1,60	-5,46	-3,65	-2,47	-2,06	-2,73	-7,99	0,26
770 a 950	-11,09	-11,86	-10,43	10,68	-14,42	-8,89	-13,95	-14,56
390 a 950	-2,66	-7,62	-5,93	1,95	-6,21	-4,81	-10,00	-4,71

Em acordo com Liu et al (2016), a média anual dos espectros SMARTS gerados é adequado para a média dos espectros medidos, mas os espectros simulados pelo programa SMARTS ainda são inadequados para representar uma condição de iluminação em tempo real, em termos de intensidade e composição espectral.

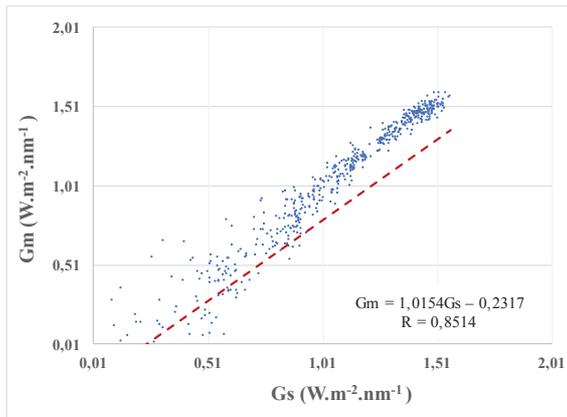
Os resultados adquiridos neste trabalho mostram que o software SMARTS pode ser utilizado para estimar o comportamento do espectro solar para dias específicos, porém há a necessidade de todos os parâmetros serem coletados além de que, as condições do céu devem ser de dia limpo para uma dada região.

Além disso, independente da variação para essa localidade chegar a oscilações de -14,56%, é possível estimar o comportamento espectral para uma dada localização, assim como foi abordado por UTRILLAS *et al* (1998), GUEYMARD (2007), HAAG (2012) E ROYO, GARCIA E TORRES (2018), dentre outros.

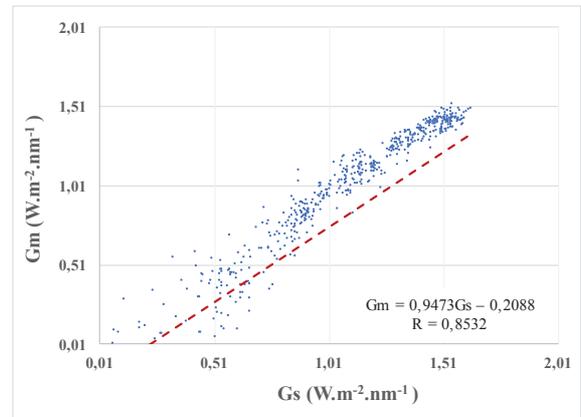
4.2.2 *Correlação entre valores medidos e simulados*

A Figura 4.7 (a, b, c, d, e, f, g, h) mostra os gráficos de um padrão de dispersão positiva, cujos valores de irradiância medidos (G_m) e simulados (G_s) são selecionados para cada intervalo de tempo. Esses gráficos visam apresentar de uma outra forma quais os dias que mostram menor e maior dispersão - entre os espectros analisados até o momento - para a cidade de Cachoeira Paulista/SP. Os valores resultantes são combinados por comprimento de onda e plotados como um gráfico de dispersão X-Y.

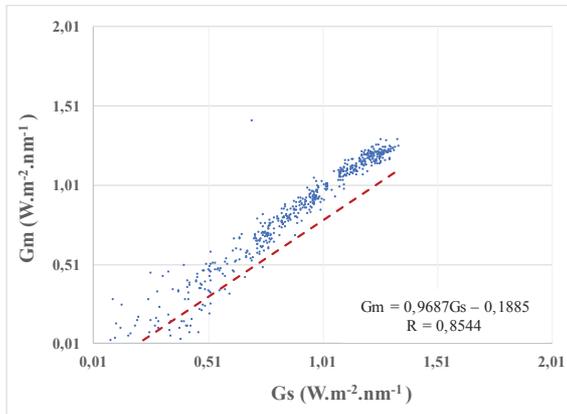
Figura 4.7 Correlação X-Y entre os espectros medidos em solo no LIM/INPE e os espectros simulados pelo SMARTS.



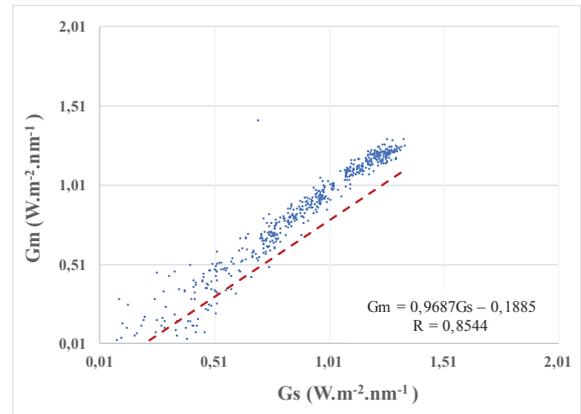
(a) 08 de Janeiro de 2016.



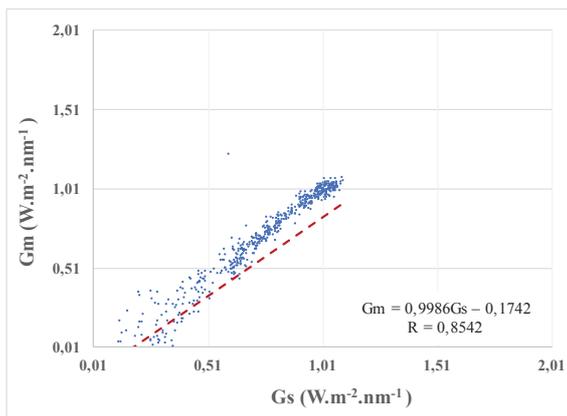
(b) 06 de Março de 2016.



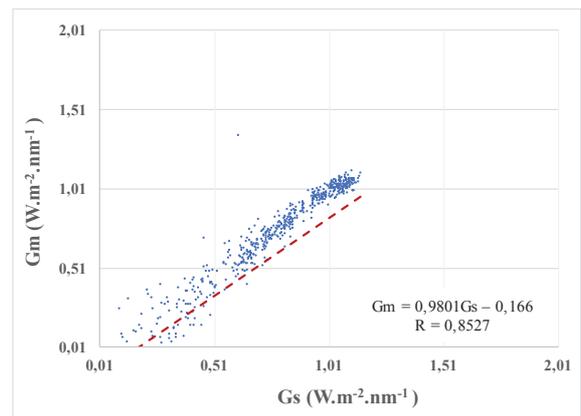
(b) 22 de Abril de 2016.



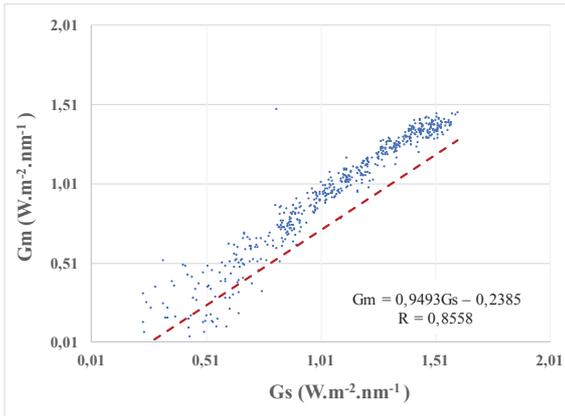
(d) 11 de Junho de 2016.



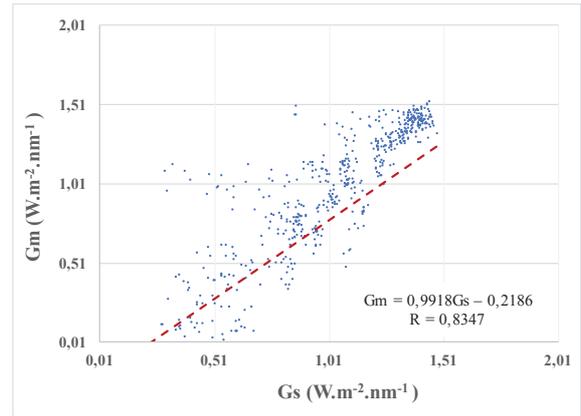
(e) 18 de Junho de 2016.



(f) 07 de Julho de 2016.



(g) 23 de Setembro de 2016.



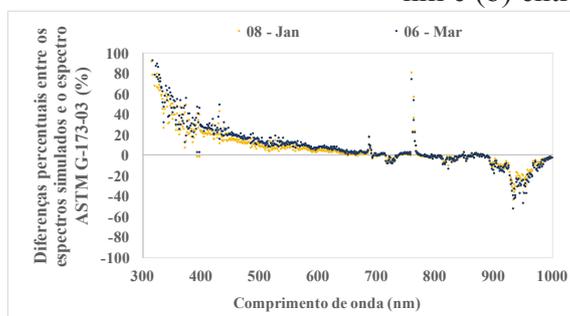
(h) 24 de Outubro de 2016.

Para os dias analisados, os valores dos coeficientes de correlação (R) obtidos foram 0,8514 para o dia 08 de Janeiro, 0,8532 para o dia 06 de Março, 0,8544 para o dia 22 de Abril, 0,8451 para o dia 11 de Junho, 0,8542 para o dia 18 de Junho, 0,8527 para o dia 07 de Julho, 0,8558 para o dia 23 de Setembro e por fim, 0,8347 para o dia 24 de Outubro. Esses resultados procuram mostrar a simetria entre ambos espectros (medidos e simulados).

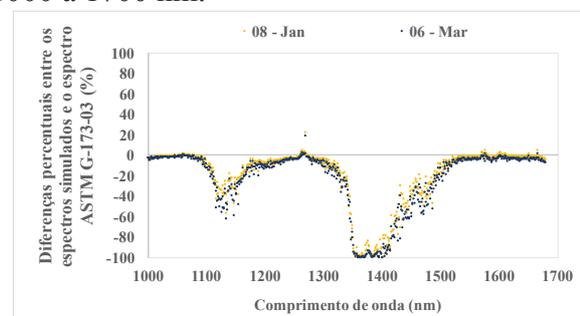
4.2.3 Variação entre os espectros simulados com o da norma ASTM G-176-03

A partir dos dados simulados, foram realizadas as comparações com o espectro de referência ASTM G173-03 da componente direta para os dias indicados, nas faixas de comprimento de onda de 300 a 1000 nm e de 1000 a 1700 nm, conforme apresentado nas Figuras 4.8 (a, b), 4.9 (a, b), 4.10 (a, b), 4.11 (a, b).

Figura 4.8 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 08 de Janeiro e 06 de Março de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.



(a)



(b)

Figura 4.9 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 22 de Abril e 11 Junho de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.

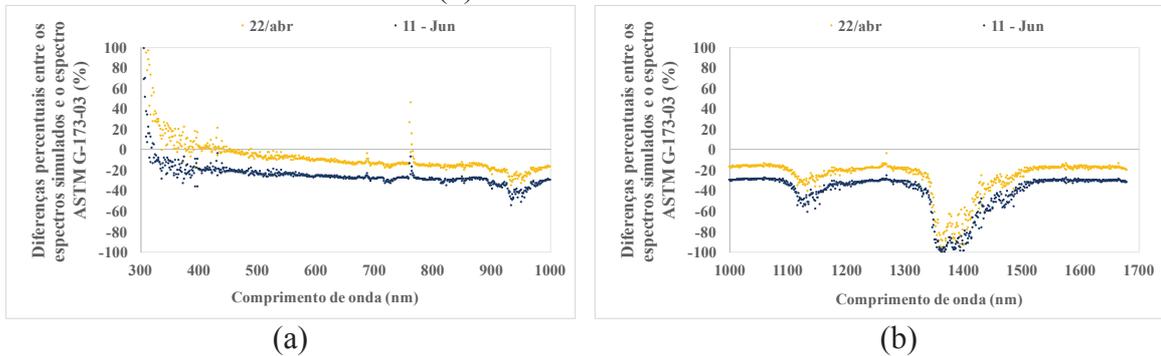


Figura 4.10 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 18 de Junho e 07 de Julho de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.

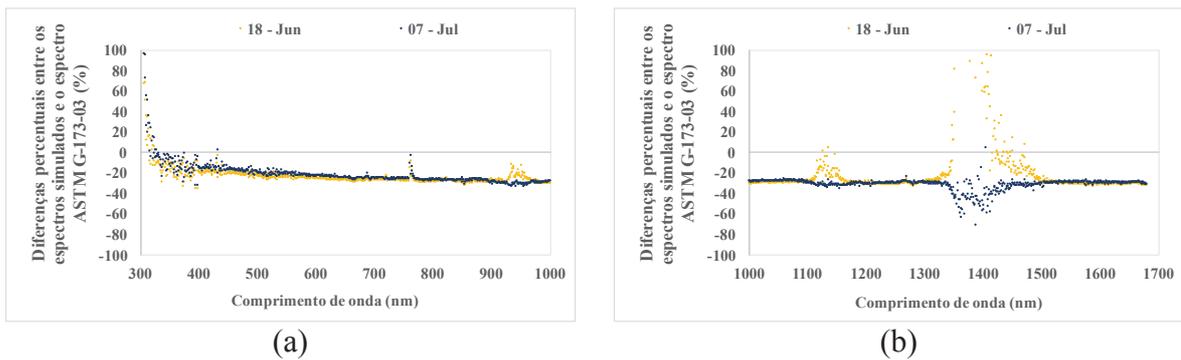
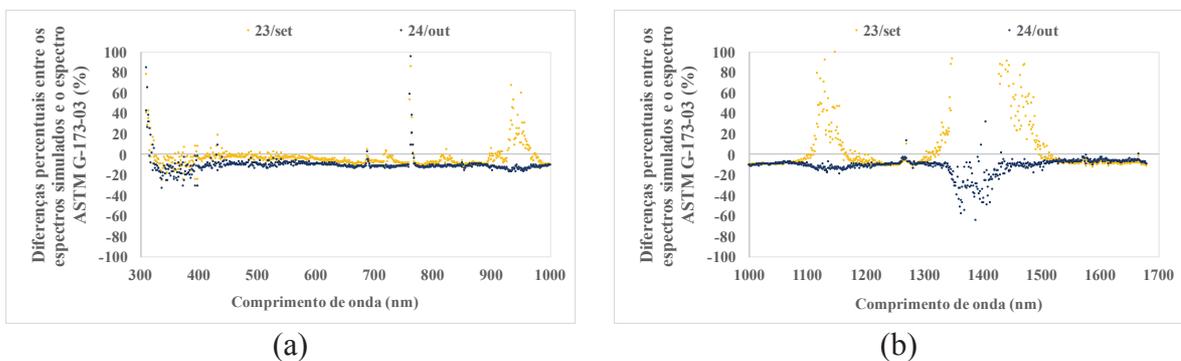


Figura 4.11 Diferenças percentuais entre os espectros simulados e o espectro de referência ASTM G173-03 para os dias 23 de Setembro e 24 de Outubro de 2016, sendo (a) entre 300 a 1000 nm e (b) entre 1000 a 1700 nm.



Na Tabela 4.2 foram obtidos os valores médios da variação percentual para cada intervalo selecionado, procurando mostrar onde ocorre as maiores oscilações.

Tabela 4.2 Valor médio de variação percentual entre espectros simulados e o espectro de referência ASTM G176-03.

Intervalo (nm)	08/01 (%)	06/03 (%)	22/04 (%)	11/06 (%)	18/06 (%)	07/07 (%)	23/09 (%)	24/10 (%)
390 a 770	8,11	10,94	-7,70	-24,77	-23,76	-20,95	-3,83	-9,46
770 a 950	-6,49	-7,77	-18,17	-32,21	-27,07	-27,70	-2,85	-12,12
390 a 950	-8,08	-6,84	-20,90	-35,18	-33,02	-31,57	-3,50	-10,32

Não há dúvidas que o espectro simulado segue o mesmo perfil do espectro de referência, e essas oscilações ocorrem devido as diversas características locais, os valores médios mostram que os espectros do local estudado apresenta algumas diferenças mais significativas, em termos de perda de irradiância em comparação ao espectro da norma, principalmente para os períodos de Junho e Julho. No entanto, essas variações são esperadas, pois a norma apenas serve como um parâmetro de referência para comparações entre diferentes locais no mundo.

O dia estudado em Setembro mostrou um comportamento atípico dos demais, isso se deu pela não ocorrência de moléculas de água suspensas no ar, fazendo com que não ocorresse perdas nas proximidades dos comprimentos de onda de 1100 nm e 1300 nm a 1500 nm. Portanto, fica clara a necessidade de estudar os espectros de regiões de interesse para entender melhor o comportamento das interações atmosféricas que resultam em um espectro com maior ou menor oscilações em determinados comprimentos de onda do local de interesse.

4.2.4 Avaliação do APE

A energia média de fótons (APE) e a variação percentual em relação à referência são apresentados para a cidade estudada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Valores do Índice APE para os dias analisados em Cachoeira Paulista/SP.

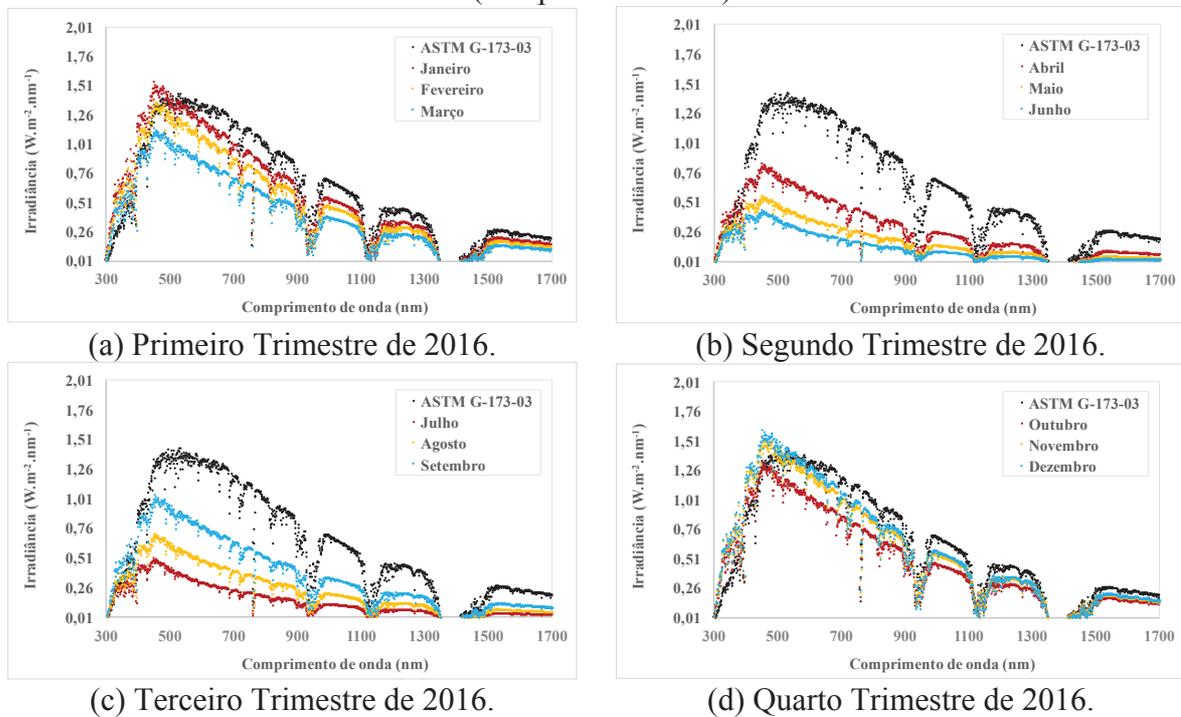
Dias	APE (eV)	Variação Percentual (%)
08/01/16	1,6474	1,693
06/03/16	1,6985	4,846
22/04/16	1,6828	3,877
11/06/16	1,6797	3,685
18/06/16	1,6635	2,685
07/07/16	1,6762	3,469
23/09/16	1,6640	2,716
24/10/16	1,6772	3,531

Os valores da irradiância resultam em um espectro azul, mostrado na Tabela 4.3. Em relação à variação entre o período estudado, os valores de APE obtidos foram de 1,64 a 1,69 eV com variação de 3% ao longo do ano, diferente dos valores encontrados por outros autores. Por exemplo, os valores reais de APE variaram de 1,50 a 1,73 eV durante todo o ano no Instituto Nacional de Energia Solar (NISE) em Gurgaon, norte da Índia (MAGARE et al., 2015). Além disso, a variação no valor de APE foi de 1,8 a 2 eV para a faixa de comprimento de onda de 350-1050 nm na Alemanha (DIRNBERGER et al, 2015). Enquanto Ishii et al. (2013) observaram uma grande variação de APE em torno de 1,3 a 1,9 eV em quatro locais no Japão na faixa de comprimento de onda similar de 350 a 1700 nm, sendo que a alta variação de APE ocorreu devido à proximidade com o oceano que afetou as condições atmosféricas do local.

4.3 Espectros Mensais Simulados para São Leopoldo/RS

Os espectros simulados para o município de São Leopoldo, considerando a inclinação equivalente a latitude do local, são apresentados na Figura 4.12 (a, b, c, d).

Figura 4.12 Espectros mensais São Leopoldo/RS em relação ao espectro de referência (componente direta).



Nas distribuições espectrais fica evidente as mudanças de amplitude principalmente dentre os meses de Abril e Setembro, que ocorre uma redução de irradiância de 1,51 e 1,26

$W.m^{-2}.nm^{-1}$, valores de pico referente aos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, para $0,51 W.m^{-2}.nm^{-1}$ nos meses de Junho e Julho.

Esses resultados apresentam um comportamento médio mensal do município de São Leopoldo/RS, localizado dentro da região do Vale dos Sinos, localizado a aproximadamente 40 km do Centro da capital Porto Alegre/RS. Como a resolução de coleta de parâmetros atmosféricos considera em sua maioria 1 grau de resolução, isso significa que os espectros representam o comportamento espectral referente a $100 km^2$, englobando tanto a Região Metropolitana, quanto a região do Vale do Sinos.

4.3.1 Avaliação do Índice APE para São Leopoldo/RS

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores de energia média dos fótons para o município de São Leopoldo do Estado do Rio Grande do Sul com inclinação equivalente a latitude e a variação referente a norma ASTM G173-03.

Tabela 4.4 Valores do Índice APE em São Leopoldo/RS.

Mês	APE (eV)	Variação Percentual (%)
Janeiro	1,678	3,58
Fevereiro	1,688	4,20
Março	1,691	4,38
Abril	1,726	6,54
Maio	1,762	8,76
Junho	1,818	12,22
Julho	1,793	10,68
Agosto	1,719	6,11
Setembro	1,685	4,01
Outubro	1,669	3,02
Novembro	1,667	2,90
Dezembro	1,674	3,33

Os valores de APE da irradiância global são em sua totalidade maiores que o APE para a espectro de referência de valor 1,62 eV, para essa faixa de análise espectral (300-1700 nm), mostrando que os espectros estudados para a cidade são considerados espectros azuis, ou seja, fótons mais energéticos na região do visível, conforme o município de Cachoeira Paulista/SP.

Na Tabela 4.4 são apresentadas as variações percentuais com relação ao valor de referência mencionado que chega a diferir 12,22%. Vale destacar que a região de ambas as cidades é considerada urbana, com atividades industriais e residências no entorno.

4.4 Análise dos Resultados no Estado do Rio Grande do Sul

São exibidos na Tabela 4.5, os valores de irradiância instantânea global sazonais obtidos para as cidades no intervalo de 300 a 1700 nm. Da mesma forma, como apresentadas na Tabela 4.6 as os valores de irradiância instantânea da componente direta.

Tabela 4.5 Irradiância instantânea global para o dia médio do mês às 12 horas.

id	Cidades	16 de Mar (W.m ⁻²)	11 de Jun (W.m ⁻²)	15 de Set (W.m ⁻²)	10 de Dez (W.m ⁻²)
01	São Leopoldo/RS	860,68	578,39	843,76	986,34
02	Bagé/RS	858,11	533,23	827,73	986,46
03	Cachoeira Do Sul/RS	868,57	559,93	841,42	990,01
04	Caxias/RS	874,16	577,38	576,99	852,21
05	Santa Maria/RS	871,58	566,13	845,83	991,55
06	Torres/RS	890,44	595,04	860,30	995,32
07	Encruzilhada Do Sul/RS	863,04	553,60	835,01	990,68
08	Alegrete/RS	859,94	564,67	840,62	982,46
09	Vacaria/RS	901,59	608,96	876,43	876,43
10	Santana Do Livramento/RS	860,19	549,40	834,44	984,53
11	Santo Angelo/RS	884,24	590,93	864,91	994,94
12	Passo Fundo/RS	902,32	609,51	881,80	1.013,13
13	Cambará Do Sul/RS	892,90	599,63	867,02	997,31
14	Cidreira/RS	883,17	582,55	856,41	996,17
15	Santa Vitória do Palmar/RS	824,37	453,32	786,95	975,95
16	Pelotas/RS	845,09	529,62	814,13	989,17
17	São Borja/RS	862,84	596,31	846,44	978,70
18	Herval/RS	847,99	519,35	815,66	988,10

Tabela 4.6 Irradiância instantânea da componente direta para o dia médio do mês às 12 horas.

id	Cidades	16 de Mar (W.m ⁻²)	11 de Jun (W.m ⁻²)	15 de Set (W.m ⁻²)	10 de Dez (W.m ⁻²)
01	São Leopoldo/RS	747,68	497,94	742,87	984,76
02	Bagé/RS	763,04	437,55	730,85	874,23
03	Cachoeira Do Sul/RS	767,95	470,52	741,92	877,34
04	Caxias/RS	784,37	506,86	506,60	765,55
05	Santa Maria/RS	771,05	477,17	746,37	879,01
06	Torres/RS	801,51	523,92	772,45	884,68
07	Encruzilhada Do Sul/RS	763,73	467,66	737,44	881,14
08	Alegrete/RS	755,90	481,70	742,28	862,81
09	Vacaria/RS	812,34	538,27	790,35	790,35
10	Santana Do Livramento/RS	765,49	467,52	740,89	865,54
11	Santo Angelo/RS	788,30	506,68	768,24	889,37
12	Passo Fundo/RS	814,75	536,86	796,57	920,18

id	Cidades	16 de Mar (W.m ⁻²)	11 de Jun (W.m ⁻²)	15 de Set (W.m ⁻²)	10 de Dez (W.m ⁻²)
13	Cambará Do Sul/RS	804,29	528,88	779,62	887,35
14	Cidreira/RS	793,98	511,90	768,42	885,17
15	Santa Vitória do Palmar/RS	726,10	322,13	677,98	858,53
16	Pelotas/RS	741,59	435,51	707,67	880,00
17	São Borja/RS	757,84	504,92	745,95	860,25
18	Herval/RS	748,37	421,19	714,30	876,91

Ao considerar as unidades geomorfológicas, os resultados entre os espectros das cidades simuladas não apresentaram variações consideráveis, resultado esperado considerando que mapa de irradiação solar do Rio Grande do Sul apresenta uma uniformidade entre seus municípios.

Como as variações entre os locais simulados pelo Estado do Rio Grande do Sul foram desprezíveis, decidiu-se por obter um espectro solar para os meses de equinócio e solstício, que considerou as médias mensais dos parâmetros atmosféricos, cálculo de massa de ar para o dia médio do mês, conforme apresentado nas Figuras 4.13 e 4.14.

Figura 4.13 Espectro solar do Estado do Rio Grande do Sul da global em comparação ao espectro de referência global válido para às 12 horas dos dias médios: (a) 16 de Março, (b) 11 de Junho, (c) 15 de Setembro e (d) 10 de Dezembro.

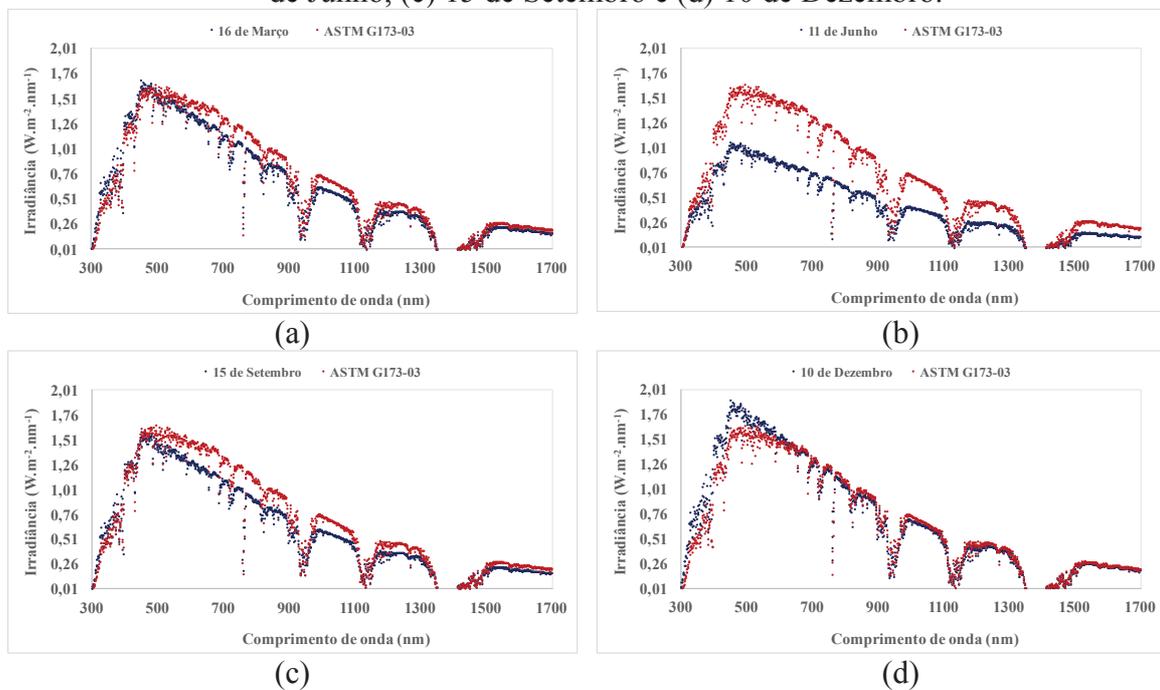
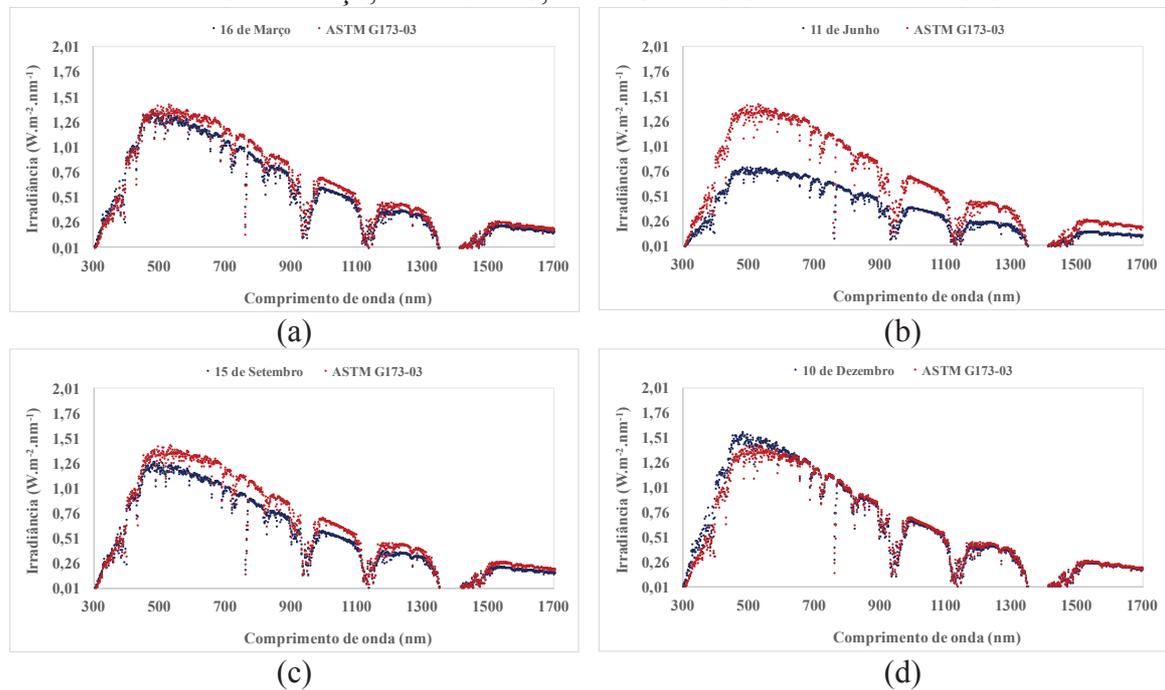
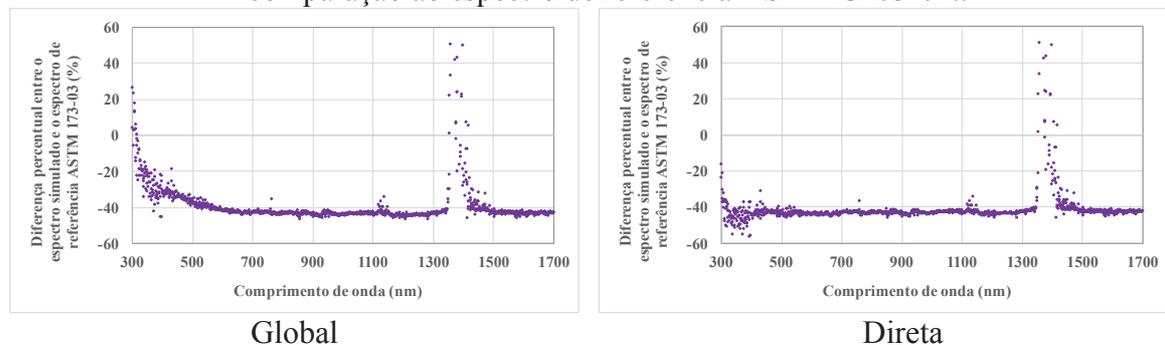


Figura 4.14 Espectro solar do Estado do Rio Grande do Sul da componente direta em comparação ao espectro de referência da componente direta válido para às 12 horas dos dias: 16 de Março, 11 de Junho, 15 de Setembro e 10 de Dezembro.



Fica claro, a partir dos resultados ilustrados acima que as variações sazonais do espectro em relação a norma não são significativas para os meses referente aos equinócios de outono e primavera e solstício de verão, exceto para o solstício de inverno. Neste caso, tanto para a irradiância global quanto para a irradiância da componente direta foi encontrado uma variação de aproximadamente 40% em relação aos espectros de referência da norma ASTM G173-04 (Figura 4.15a e Figura 4.15b).

Figura 4.15 Variação de percentual para o dia 11 de junho entre a média dos 18 dezoito espectros instantaneos gerados às 12 horas para o Estado do Rio Grande do Sul em comparação ao espectro de referência ASTM G173-04..



Os valores apresentados na Tabela 4.7 são referentes ao índice de energia média dos fótons para a global. Os valores praticamente não variaram no estudo dos dezoito municípios.

Tabela 4.7 Valores do Índice APE do Estado do Rio Grande do Sul.

Mês	APE (eV)	Varição Percentual (%) ref 1.62eV
Março	1,691	4,19
Junho	1,818	10,89
Setembro	1,685	3,86
Dezembro	1,674	3,22

Partindo desses valores, é admissível concluir que o espectro característico do Estado do Rio Grande do Sul apresenta espectro com fótons mais energéticos e deste modo, localizado na região do visível. Em suma, os valores ficam entre 3,22 a 10,89% maiores que o APE dado pela norma.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseados nos resultados apresentados nesse trabalho que visa mostrar que os valores medidos em solo no laboratório do LIM/INPE pelo espectrorradiômetro são similares aos valores simulados pelo software SMARTS v. 2.6.5, utilizando parâmetros atmosféricos com valores médios do mês ou diários para o local de interesse; e, portanto, responder: se há variações nas curvas espectrais ao comparar os espectros gerados no Estado do Rio Grande do Sul a partir dos parâmetros atmosféricos de diferentes locais?

Para responder a pergunta, foi necessário mostrar: a metodologia de como gerar as curvas espectrais através da simulação; validar essas simulações comparando com dados medidos em solo por espectrorradiômetro; e então, gerar os espectros de diversos locais com características distintas no Estado do Rio Grande do Sul com o objetivo de extrair as irradiâncias instantâneas global e da componente direta. Logo, algumas considerações podem ser levantadas:

Quanto aos parâmetros atmosféricos, não há semelhança entre os valores de vapor da água, ozônio, dióxido de carbono e aerossol utilizados pelos espectros de referência dentro dos valores encontrados para o Estado de São Paulo e qualquer parte do território brasileiro. Assim sendo, não é apropriado usar valores de referência do espectro AM1,5G, pois eles não representam valores médios entre os valores mínimos e máximos encontrados no Brasil. Esses valores devem ser usados apenas para fator de comparação com outros locais ao redor do mundo. Além disso, a localização, a massa de ar e o albedo influenciam diretamente o perfil do espectro, mais especificamente, a amplitude do espectro.

Com base nos gráficos que mostram a irradiância por comprimento de onda do município de Cachoeira Paulista, é admissível dizer que a simulação do software SMARTS v2.6.5 apresenta valores muito próximos aos dados medidos em campo no laboratório LIM/INPE pelo espectrorradiômetro, ou seja, uma confiabilidade de $87,33 \pm 2\%$.

Através da análise de variação percentual na comparação de espectros medidos e simulados para o município de Cachoeira Paulista, na região do visível do espectro solar foram encontradas variações de até 10,67%, enquanto na região do infravermelho as variações foram de 15%. Quanto à análise de correlação, a média dos valores calculados foi de 0,85 mostrando uma dispersão positiva e linear. Ainda, os valores de APE calculados foram de 1,64 a 1,69 eV com diferença de 3% ao longo do ano, mostrando um espectro classificado como azul, ou seja, esse índice qualitativo indica que há mais fótons energéticos na região do visível do que no infravermelho.

Os módulos de silício cristalino e monocristalino testados sob as condições STC têm sido usados em todo o território brasileiro e apresentado bons resultados, com base no que foi mostrado na comparação entre os espectros simulados e a norma ASTM G173-04, considerando as variações ao longo de um ano, ocorrem ganhos e perdas de energia dos fótons em relação a norma.

A mudança no comportamento das curvas do espectro solar afeta principalmente as tecnologias fotovoltaicas que possuem uma resposta de banda espectral estreita, como a junção única a-Si, enquanto seu efeito é marginal em tecnologias que têm uma ampla resposta de banda espectral como módulos de silício cristalino. Essa situação não ocorre em Cachoeira Paulista porque os valores obtidos através do índice APE indicam que há mais energia nos menores comprimentos de onda. Assim, as células solares fotovoltaicas que têm resposta espectral principalmente na região do visível - como silício monocristalino (560 a 1100 nm) e silício multicristalino (470 a 1000 nm) - podem fazer um bom progresso, considerando o rendimento fotovoltaico previsto. Se isso fosse considerado na região de comprimento de onda do vermelho, por essa razão, seria interessante escolher as tecnologias de células solares fotovoltaicas que aproveitam essa região do espectro, como, por exemplo, uma célula tripla de junção que contém germânio em uma das camadas.

A literatura mostra abundantemente que, ao longo dos anos, SMARTS foi um software considerado útil em uma ampla gama de aplicações. Por exemplo, avaliação de efeitos espectrais, fatores de incompatibilidade e previsão avançada de potência para vários tipos de geradores solares, incluindo: módulos fotovoltaicos planos, sistemas fotovoltaicos de concentração, FV bifacial, FV integrada na construção, definição de espectros de referência para melhorar o projeto de células fotovoltaicas e outros dispositivos, ou seus testes, entre muitos outros (GUEYMARD, 2019).

Após a validação dos espectros simulados para o município de Cachoeira Paulista, a metodologia utilizada neste trabalho foi aplicada para geração dos espectros mensais do município de São Leopoldo/RS e simulação dos espectros para os dias médios selecionados para o Estado do Rio Grande do Sul (ou seja, 16 de Março, 11 de Junho, 15 de Setembro e 10 de Dezembro), que representam o comportamento médio mensal (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A partir dos espectros simulados para os deztoitos municípios, foi possível determinar a irradiância instantânea entre os locais estudados e concluir que não há variações expressivas no espectro, por consequência, foi obtido através da média dos valores de irradiância instantânea,

os espectros para Estado do Rio Grande do Sul para os seguintes meses (Março, Junho, Setembro e Dezembro) que representam os meses de solstício e equinócio.

Por fim, é possível concluir que os espectros simulados pelo software SMARTS v.2.9.5 não apresentam a mesma amplitude do espectro de referência AM1,5G, pois consideram variações na atmosfera ao longo do ano, conforme esperado já que a norma serve como um fator de comparação para pesquisas na área científica. O software SMARTS v.2.9.5 é recomendado para simular espectros solares para diferentes locais, como mostrado nas comparações realizadas para a cidade de Cachoeira Paulista, apresentando comportamento muito próximo do medido em solo. Logo, é admissível confirmar que não foi encontrado variações significativas entre os espectros estudados para os municípios do Estado do Rio Grande do Sul, e que os resultados encontrados servem como referência para um determinado dia e determinada hora.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Dentre as sugestões que poderiam ser elencadas, merecem destaque:

- Elaboração de um mapa do território do Estado do Rio Grande do Sul, ou até mesmo a nível do território brasileiro, informando índices de qualidade de espectro, como por exemplo, usando o APE.
- Disponibilizar dados das respostas espectrais utilizadas para a análise, pois são dados de difícil acesso e podem colaborar para o desenvolvimento de outros indicadores relacionando o espectro com a resposta espectral de células solares fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS

- ACKER, J.G. AND LEPTOUKH, G. 2007. **Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data**. Eos, Transactions American Geophysical Union, 88, 14-17. Acesso: 18 de Fevereiro de 2019.
- ALONSO-ABELLA, M.; CHENLO, F.; NOFUENTES, G.; TORRES- RAMÍREZ, M. **Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites**. 2014. Energy, v. 67, p. 435-443.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM G173 – 03**: standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. 2012. West Conshohocken.
- ANDRADE, L. L. **Estimativa de temperatura e emissividade com imagens do sensor HSS (hyperspectral scanner system) e suas relações com materiais urbanos**. 2011.
- ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 482**, de 17 de Abril de 2012. Condições gerais de acesso, compensação de energia. Disponível: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2018.
- ANNEE, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 687**, de 24 de Novembro de 2015. Altera resolução nº 482. Disponível: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2018.
- ATLAS SOLAR DO RIO GRANDE DO SUL. 2018. Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/upload/arquivos/atlas-solar7.pdf>. Acesso 10 Jun de 2019.
- BETTS, T. R. **Investigation of photovoltaic device operation under varying spectral conditions**. 2004. 129p. Tese (Doutorado em Filosofia) - Loughborough University, Loughborough, 2004. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/63a3/1966cfcf54ee5d2c3e34e47bc7f31f525d47.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2019.
- CORNARO, C.; ANDREOTTI, A. **Influence of average photon energy index on solar irradiance characteristics and outdoor performance of photovoltaic modules**. 2013. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. vol. 21: 996–1003. doi:10.1002/pip.2194.
- COULSON, K. L. **Solar and Terrestrial Radiation: Methods and Measurements**. 1975. Academic Press, New York.
- DARWISH, Z. A.; KAZEM, H. A.; SOPIAN K.; AL-GOUL, M.; ALAWADHI, H. **Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance**. 2015. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 41, pp. 735-44.
- DIRNBERGER, D., BLACKBURN, G., MÜLLER, B., REISE, C. **On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV Technologies**. 2015. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 132, pp. 431-442.

- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**: 4th. ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2013. 936p.
- EOS, EARTH OBSERVING SYSTEM. **Terra**: the eos flagship. 2017. Disponível em: <<https://terra.nasa.gov/>>. Acesso em: 4 Jan. 2019.
- EOS, EARTH OBSERVING SYSTEM. **Aqua** earth-observing satellite mission. 2017. Disponível em: <<https://aqua.nasa.gov/>>. Acesso em: 4 Jan. 2019.
- EOS. Sensor **MODIS** (moderate resolution imaging spectroradiometer). Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 23 Março de 2019.
- EOS. Sensor **AIRS** (Atmospheric Infrared Sounder). Disponível em: <<https://airs.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 28 Mai. 2017.
- GETAMO. Description of getSpec-2048x14 Fiber Optic Spectrometers. Disponível em: <http://www.getamo.com/www/getspect.nsf/main.html?open&lang=EN&id=getSpec_2048x14_EN>.
- GOTTSCHALG, R., INFELD, D. G., & KEARNEY, M. J. **Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells**. 2003. Solar Energy Materials and Solar Cells, 79(4), 527–537. doi:10.1016/s0927-0248(03)00106-5.
- GUASSELLI, L.A.; SALDANHA, D.L.; SUERTEGARAY, D.M.A.; DUCATI, J.R.; FONTANA, D.C. **Macrozoneamento do Estado do Rio Grande do Sul**. 2006. Pesquisas em Geociências, 33 (1): 3-11, Porto Alegre.
- GUEYMARD, C. **SMARTS**. A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment, 1995.
- GUEYMARD, C. **The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models**. 2004. Solar Energy, 76(4), 423–453. doi:10.1016/j.solener.2003.08.039.
- GUEYMARD, C. A. **Spectral effects on latitude-tilt and vertical PV modules as affected by latitude, air mass, and climate**. 2007. Optical Modeling and Measurements for Solar Energy Systems. doi:10.1117/12.735230.
- GUEYMARD, C. A. (2019). **The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra**. Solar Energy, 187, 233–253. doi:10.1016/j.solener.2019.05.048
- GUEYMARD, C. A.; MYERS, D.; EMERY, K. **Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing**. v. 73, n. 6, p. 443–467, 2003.
- HAAG, R. **Desenvolvimento de radiômetro espectral e metodologia para caracterização do espectro solar**. 2007. UFRGS. Porto Alegre, Brasil.
- HAAG, R; KRENZINGER, A. **Análise da influência de parâmetros atmosféricos e locais na distribuição espectral da radiação solar**. 2010. Revista Brasileira de Energia Solar, Volume 1, Número 1, Setembro de 2010. p.23-33

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

HAAG, R; KRENZINGER, A. **Espectro solar característico para a região do semiárido brasileiro**. 2016. Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – Belo Horizonte, 04 a 07 de Abril de 2016.

HISOUR. **Figura: Tecnologia de células fotovoltaicas de junção múltipla**. Disponível em : <https://www.hisour.com/pt/multi-junction-photovoltaic-cell-technology-39624/>. Acesso: 19 de Maio de 2019.

INPE. In GOOGLE Maps. Mountain View: Google, 2019. Disponível em: <https://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR>. Acesso em: 5 set. 2019.

INSTITUTO IDEAL E AHK-RJ. **Relatório: O mercado brasileiro de geração distribuída**. 5ª Ed. 2018. Disponível em: http://ahkbusiness.de/fileadmin/ahk_business_br/05_Publicacoes-Publikationen/O_Mercado_Brasileiro_de_Geracao_Distribuida_FV_-_2018.pdf. Acesso dia 27 de Abril de 2019.

IQBAL, M. **Introduction to solar radiation**. Toronto: Academic, 1983.

ISHII, T., OTANI, K., TAKASHIMA, T., XUE, Y. **Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions**. 2013. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 21, n. 4, pp. 481-489.

ISHII, T., OTANI, K., ITAGAKI, A., UTSUNOMIYA, K. **A simplified methodology for estimating solar spectral influence on photovoltaic energy yield using average photon energy**. Energy Sci. Eng. 1(1), 18–26 (2013)

LECKNER, B. **The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface—Elements of a model**. 1978. Solar Energy 20, 143-150 (1978).

LIU, H., ABERLE, A. G., BUONASSISI, T., & PETERS, I. M. **On the methodology of energy yield assessment for one-Sun tandem solar cells**. 2016. Solar Energy, 135, 598–604. doi:10.1016/j.solener.2016.06.028

MAMBRINI, T.; DUBOIS, A. M.; LONGEAUD, C. **Photovoltaic yield: correction method for the mismatch between the solar spectrum and the reference ASTM G 173-03 spectrum**. 2015. EPJ Photovoltaics, v. 6, n. JANUARY, p. 60701.

MAGARE, D. B., et al. **Effect of seasonal spectral variations on performance of three different photovoltaic technologies in India**. 2015. International Journal of Energy and Environmental Engineering. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/s40095-015-0190-0.

MARKOSKI, P. R. **Modelagem atmosférica (8 - 12 microns) de ambientes úmidos aplicada no processo de correção dos dados emissividade do sensor aster**. 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 2015.

MASTERS, G. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. 2013. pp. 4-7. Hoboken, N.J.: Wiley-Blackwell.

- MEYERS, G. **The first solar array** — 1884 — installed on a New York City rooftop by Charles Fritts. *Clean Technica*. 2014. Disponível em: <https://cleantechnica.com/2014/12/31/photovoltaic-dreaming-first-attempts-commercializing-pv/>. Acesso: 18 de Maio de 2019.
- MYERS, D. R., GUEYMARD, C. A. **Description and availability of the SMARTS spectral model for photovoltaic applications**. 2004. *Organic Photovoltaics V*. doi:10.1117/12.555943.
- MINEMOTO, Y.; NAGAE, S.; TAKAKURA, H. **Impact of Spectral Irradiance Distribution and Temperature on the Outdoor Performance of Amorphous Si Photovoltaic Modules**. 2007. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 91: 919–23.
- MAMBRINI, T. et al. **Photovoltaic yield: correction method for the mismatch between the solar spectrum and the reference ASTM am1.5g spectrum**. 2015. *EPJ Photovoltaics* vol. 6 doi:10.1051/epjpv/2014011.
- NEVES, G. M. **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos. Defesa de Mestrado**. 2016. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia. INPE. São José dos Campos.
- NEVES, G.; VILELA, W.; PEREIRA, E. AND BERNI, L. **Influência do espectro solar em módulos fotovoltaicos sob céu limpo, céu parcialmente nublado e céu nublado**. 2018. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.
- NORTON, M., AMILLO, A. M. G., & GALLEANO, R. **Comparison of solar spectral irradiance measurements using the average photon energy parameter**. 2015. *Solar Energy*, 120, 337–344. doi:10.1016/j.solener.2015.06.023
- PEREIRA, E.B; MARTINS F.R.; GONÇALVEZ, A.R.; COSTA, R.S.; LIMA, F.J.L.; RÜTHER, R.; ABREU, S.L; TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G.; **Atlas brasileiro de energia solar**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. São José dos Campos. 2017
- PEREZ-LOPEZ, J.J. ; FABERO, F.; CHENLO, F. **Experimental solar spectral irradiance until 2500nm: results and influence on the pv conversion of different materials**. 2007. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Vol. 15: 303–15.
- POLO, J., ALONSO-ABELLA, M., RUIZ-ARIAS, J. A., & BALENZATEGUI, J. L. **Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies**. 2017. *Solar Energy*, 142, 194–203. doi:10.1016/j.solener.2016.12.024
- REZENDE, V. G. S.; ZILLES, R. **Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade**. 2018. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.
- ROYO, A., GARCÍA, I., & TORRES, J. L. **Generation of the site-adapted clearest-sky year of direct normal irradiance for solar concentrating technologies**. 2018. *Renewable Energy*, 128, 250–264. doi:10.1016/j.renene.2018.04.088

RODZIEWICZ, T., TENETA, J., ZAREMBA, A., & WACŁAWEK, M. **Analysis of Solar Energy Resources in Southern Poland for Photovoltaic Applications**. 2013. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 20(1), 177–198. doi:10.2478/eces-2013-0014

RÜTHER, R. KLEISS, G. REICHE, K. **Spectral effects on amorphous silicon solar module fill factors**. 2002. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 71, pp. 375–385.

SAMPLE, T.; GARCIA, J. L.; POZZA, A. **Long-term soiling in a moderate subtropical climate**. 2016. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Renewables and Energy Efficiency Unit. Italy.

TADROS, M. T. Y., EL-METWALLY, M., & HAMED, A. B. **A comparative study on SPCTRAL2, SPCTR-1881 and SMARTS models using direct normal solar irradiance in different bands for Cairo and Aswan, Egypt**. 2005. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(14), 1343–1356. doi:10.1016/j.jastp.2005.04.003

UTRILLAS, M. P., BOSCA, J. V., MARTÍNEZ-LOZANO, J. A., CAÑADA, J., TENA, F., & PINAZO, J. M. **A comparative study of SPCTRAL2 and SMARTS parameterised models based on spectral irradiance measurements at Valencia, Spain**. 1998. *Solar Energy*, 63(3), 161–171. doi:10.1016/s0038-092x(98)00058-9

VIÚDEZ-MORA, A. **Atmospheric downwelling longwave radiation at the surface during cloudless and overcast conditions**. 2011. Measurements and modeling. Tese de Doutorado. Universidade de Girona.

VEISSID, E. e VAZ, C.C. **Simulador solar de baixo custo (solsim): simulação da corrente fotogerada em diferentes células solares**. 2011. Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, Laboratório Associado de Sensores e Materiais. *Revista Brasileira de Energia Solar* Ano 2 Volume II Número 1 Julho de 2011 p. 71-77.

WEIDE, L. E. **Desenvolvimento de metodologias para estimativas de cobertura de nuvens**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia. INPE. São José dos Campos. 2014.

ZHENG, H. **Solar Energy Desalination Technology**. 2017. p. 56. Elsevier Science.

ZHENG, L., & XUAN, Y. **Suppressing the negative effect of UV light on perovskite solar cells via photon management**. 2018. *Solar Energy*, 173, 1216–1224. doi:10.1016/j.solener.2018.08.053

APÊNDICE A – EXEMPLO DE CÁLCULO DAS MASSAS DE AR

{Local : Cachoeira Paulista }

Lat = -22.674177 {latitude local}

Long = -44.9952 {longitude local}

{Dados de Entrada para ajuste da equação do tempo}

Lstm = -45 {meridiano padrão da cidade = $-3^{\circ}15' = -45$ }

LT = 12 {tempo do relógio em horas}

LTm = LT*60 {tempo do relógio em minutos}

{n = dia correspondente ao calendário juliano: 01/01 = 1 e 31/12 = 365;}

{Dia que representa o comportamento medio do mes}

n1 = 8 {janeiro 8}

n2 = 26 {janeiro 26}

n3 = 65 {março 6}

n4 = 80 {março 21}

n5 = 112 {abril 22}

n6 = 142 {maio 22}

n7 = 162 {junho 11}

n8 = 169 {junho 18}

n9 = 258 {setembro 15}

n10 = 266 {setembro 23}

n11 = 297 {outubro 24}

n12 = 341 {dezembro 7}

{Equação de Tempo Solar}

B1 = $(n1-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot1 = $9.87*\sin(2*B1)-7.53*\cos(B1)-1.5*\sin(B1)$ {Equação do tempo}

TC1 = $4*(Long - Lstm) + Eot1$ {Fator de correção}

B2 = $(n2-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot2 = $9.87*\sin(2*B2)-7.53*\cos(B2)-1.5*\sin(B2)$ {Equação do tempo}

TC2 = $4*(Long - Lstm) + Eot2$ {Fator de correção}

B3 = $(n3-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot3 = $9.87*\sin(2*B3)-7.53*\cos(B3)-1.5*\sin(B3)$ {Equação do tempo}

TC3 = $4*(Long - Lstm) + Eot3$ {Fator de correção}

B4 = $(n4-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot4 = $9.87*\sin(2*B4)-7.53*\cos(B4)-1.5*\sin(B4)$ {Equação do tempo}

TC4 = $4*(Long - Lstm) + Eot4$ {Fator de correção}

B5 = $(n5-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot5 = $9.87*\sin(2*B5)-7.53*\cos(B5)-1.5*\sin(B5)$ {Equação do tempo}

TC5 = $4*(Long - Lstm) + Eot5$ {Fator de correção}

B6 = $(n6-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot6 = $9.87*\sin(2*B6)-7.53*\cos(B6)-1.5*\sin(B6)$ {Equação do tempo}

TC6 = $4*(Long - Lstm) + Eot6$ {Fator de correção}

B7 = $(n7-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot7 = $9.87*\sin(2*B7)-7.53*\cos(B7)-1.5*\sin(B7)$ {Equação do tempo}

TC7 = $4*(Long - Lstm) + Eot7$ {Fator de correção}

B8 = $(n8-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot8 = $9.87*\sin(2*B8)-7.53*\cos(B8)-1.5*\sin(B8)$ {Equação do tempo}

TC8 = $4*(Long - Lstm) + Eot8$ {Fator de correção}

B9 = $(n9-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot9 = $9.87*\sin(2*B9)-7.53*\cos(B9)-1.5*\sin(B9)$ {Equação do tempo}

TC9 = $4*(Long - Lstm) + Eot9$ {Fator de correção}

B10 = $(n10-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot10 = $9.87*\sin(2*B10)-7.53*\cos(B10)-1.5*\sin(B10)$ {Equação do tempo}

TC10 = $4*(Long - Lstm) + Eot10$ {Fator de correção}

B11 = $(n11-81)*(360/365)$ {variável para Eot}

Eot11 = $9.87*\sin(2*B11)-7.53*\cos(B11)-1.5*\sin(B11)$ {Equação do tempo}

TC11 = $4*(Long - Lstm) + Eot11$ {Fator de correção}

$B12 = (n12-81) \cdot (360/365)$ {variável para Eot}
 $Eot12 = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot B12) - 7.53 \cdot \cos(B12) - 1.5 \cdot \sin(B12)$ {Equação do tempo}
 $TC12 = 4 \cdot (\text{Long} - \text{Lstm}) + Eot12$ {Fator de correção}

{Tempo Solar Verdadeiro}

$TSV1 = LT + TC1/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm1 = LT \cdot 60 + TC1$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV2 = LT + TC2/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm2 = LT \cdot 60 + TC2$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV3 = LT + TC3/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm3 = LT \cdot 60 + TC3$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV4 = LT + TC4/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm4 = LT \cdot 60 + TC4$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV5 = LT + TC5/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm5 = LT \cdot 60 + TC5$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV6 = LT + TC6/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm6 = LT \cdot 60 + TC6$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV7 = LT + TC7/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm7 = LT \cdot 60 + TC7$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV8 = LT + TC8/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm8 = LT \cdot 60 + TC8$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV9 = LT + TC9/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm9 = LT \cdot 60 + TC9$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV10 = LT + TC10/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm10 = LT \cdot 60 + TC10$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV11 = LT + TC11/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm11 = LT \cdot 60 + TC11$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

$TSV12 = LT + TC12/60$ {Tempo Solar Verdadeiro em horas}
 $TSVm12 = LT \cdot 60 + TC12$ {Tempo Solar Verdadeiro em minutos}

{Angulo Horário (w)}

$w1 = 15 \cdot (TSV1-12)$
 $w2 = 15 \cdot (TSV2-12)$
 $w3 = 15 \cdot (TSV3-12)$

$w4 = 15 \cdot (TSV4-12)$
 $w5 = 15 \cdot (TSV5-12)$
 $w6 = 15 \cdot (TSV6-12)$

$w7 = 15 \cdot (TSV7-12)$
 $w8 = 15 \cdot (TSV8-12)$
 $w9 = 15 \cdot (TSV9-12)$

$w10 = 15 \cdot (TSV10-12)$
 $w11 = 15 \cdot (TSV11-12)$
 $w12 = 15 \cdot (TSV12-12)$

{Declinação (dec)}

$dec1 = 23.45 \cdot (\sin((n1-81) \cdot (360/365)))$
 $dec2 = 23.45 \cdot (\sin((n2-81) \cdot (360/365)))$
 $dec3 = 23.45 \cdot (\sin((n3-81) \cdot (360/365)))$

$dec4 = 23.45 \cdot (\sin((n4-81) \cdot (360/365)))$
 $dec5 = 23.45 \cdot (\sin((n5-81) \cdot (360/365)))$
 $dec6 = 23.45 \cdot (\sin((n6-81) \cdot (360/365)))$

$dec7 = 23.45 \cdot (\sin((n7-81) \cdot (360/365)))$
 $dec8 = 23.45 \cdot (\sin((n8-81) \cdot (360/365)))$
 $dec9 = 23.45 \cdot (\sin((n9-81) \cdot (360/365)))$

$dec10 = 23.45 \cdot (\sin((n10-81) \cdot (360/365)))$
 $dec11 = 23.45 \cdot (\sin((n11-81) \cdot (360/365)))$
 $dec12 = 23.45 \cdot (\sin((n12-81) \cdot (360/365)))$

{Angulo de zênite (Oz)}

Oz1 = arccos(cos(Lat)*cos(dec1)*cos(w1)+sin(Lat)*sin(dec1))
 Oz2 = arccos(cos(Lat)*cos(dec2)*cos(w2)+sin(Lat)*sin(dec2))
 Oz3 = arccos(cos(Lat)*cos(dec3)*cos(w3)+sin(Lat)*sin(dec3))

Oz4 = arccos(cos(Lat)*cos(dec4)*cos(w4)+sin(Lat)*sin(dec4))
 Oz5 = arccos(cos(Lat)*cos(dec5)*cos(w5)+sin(Lat)*sin(dec5))
 Oz6 = arccos(cos(Lat)*cos(dec6)*cos(w6)+sin(Lat)*sin(dec6))

Oz7 = arccos(cos(Lat)*cos(dec7)*cos(w7)+sin(Lat)*sin(dec7))
 Oz8 = arccos(cos(Lat)*cos(dec8)*cos(w8)+sin(Lat)*sin(dec8))
 Oz9 = arccos(cos(Lat)*cos(dec9)*cos(w9)+sin(Lat)*sin(dec9))

Oz10 = arccos(cos(Lat)*cos(dec10)*cos(w10)+sin(Lat)*sin(dec10))
 Oz11 = arccos(cos(Lat)*cos(dec11)*cos(w11)+sin(Lat)*sin(dec11))
 Oz12 = arccos(cos(Lat)*cos(dec12)*cos(w12)+sin(Lat)*sin(dec12))

{Massa de Ar - AM}

AM01 = 1/cos(Oz1){Jan 6}
 AM02 = 1/cos(Oz2){Jan 26}
 AM03 = 1/cos(Oz3){Mar 6}
 AM04 = 1/cos(Oz4){Mar 21}
 AM05 = 1/cos(Oz5){Abr 22}
 AM06 = 1/cos(Oz6){Mai 22}
 AM07 = 1/cos(Oz7){Jun 11}
 AM08 = 1/cos(Oz8){Jun 18}
 AM09 = 1/cos(Oz9){Set 15}
 AM10 = 1/cos(Oz10){Set 23}
 AM11 = 1/cos(Oz11){Out 24}
 AM12 = 1/cos(Oz12){Dez 7}

**APÊNDICE B – EXEMPLO DE CÓDIGO INPUT DO SMARTS DE CACHOEIRA
PAULISTA/SP**

```
'INPE-JUN-2016'      !CARD 1 SIMULAÇÃO CACHOEIRA PAULISTA - INPE
1                   !CARD 2 ISPR
934.9 0.545 0.      !CARD 2A SITE PRESSURE - ALTITUDE - HEIGHT
1                   !CARD 3 IATMOS
'TRL'               !CARD 3A TRL (TROPICAL)
0                   !CARD 4 IH20
1.0044              !CARD 4A AVERAGE OF WATER VAPOR
0                   !CARD 5 IO3
0 0.251             !CARD 5A IALT AND AVERAGE OF OZONE DIVIDED BY 1000
1                   !CARD 6 IGAS
401.24              !CARD 7 QCO2 (PPMV)
0                   !CARD 7A ISPCTR
'S&F_URBAN'         !CARD 8 AEROS (AEROSOL MODEL)
5                   !CARD 9 ITURB - AEROSOL OPTICAL DEEP AT 550 NM - TAU550
0.049               !CARD 9A TURBIDITY COEFF
-1                  !CARD 10 IALBDX - ALBEDO
0.13046             !CARD 10A ALBEDO
1                   !CARD 10B ITILT
-1 0. 0.            !CARD 10C TILT VARIABLES (IALBDG, RECEIVER'S TILT & SURFACE
AZIMUTH)
0.13046             !CARD 10D LOCAL BROADBAND LAMBERTIAN FOREGROUND ALBEDO
FOR TILTED PLANE.
300 1700 1 1367     !CARD 11 MIN & MAX WAVELENGTHS, SUN-EARTH DISTANCE
CORRECTION, SOLAR CONSTANT
3                   !CARD 12 IPRT PRINT
300 1700 1          !CARD12A MIN & MAX WAVELENGTHS; IDEAL PRINTING STEP SIZE
35                  !CARD12B NUMBER OF VARIABLES TO PRINT
1 2 4 6 8 10 11 12 13 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 35 36 38 39 40 41 42 43
                   !CARD12C VARIABLE CODES FOR OUTPUT
0                   !CARD 13 ICIRC
0                   !CARD 14 ISCAN
0                   !CARD 15 ILLUM
0                   !CARD 16 IUV
2                   !CARD 17 IMASS
1.433               !CARD 17A AIR MASS OF 15TH DAY AT 12 OCLOCK OF EACH MONTH
```

APÊNDICE C – EXEMPLO CÓDIGO OUTPUT DO SMARTS DE CACHOEIRA PAULISTA/SP

***** SMARTS, version 2.9.5 *****

Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine

Chris A. Gueymard, Solar Consulting Services

December 2005

This model is documented in FSEC Report PF-270-95
and in a Solar Energy paper, vol. 71, No.5, 325-346 (2001)

NOTE: These references describe v. 2.8 or earlier!!!

See the User's Manual for details on the considerable
changes that followed...

Reference for this run: INPE-JUN-2016

* ATMOSPHERE : TRL AEROSOL TYPE: S&F_URBAN

* INPUTS:

Pressure (mb) = 934.900 Ground Altitude (km) = 0.5450

Height above ground (km) = 0.0000

Relative Humidity (%) = 74.086 Precipitable Water (cm) = 1.0044

Ozone (atm-cm) = 0.2510 or 251.0 Dobson Units

AEROSOLS: Optical Depth at 500 nm = 0.0547 Optical depth at 550 nm = 0.0490

Angstrom's Beta = 0.0197 Schuepp's B = 0.0237

Meteorological Range (km) = 240.0 Visibility (km) = 183.8

Alpha1 = 0.9600 Alpha2 = 1.4705 Mean Angstrom's Alpha = 1.2152

Season = SPRING/SUMMER

* TEMPERATURES:

Instantaneous at site's altitude = 296.4 K

Daily average (reference) at site's altitude = 296.4 K

Stratospheric Ozone and NO2 (effective) = 229.4 K

The following spectral variables will be output to file: SMARTS95.ext.txt "lista de variaveis"

ZONAL ALBEDO (constant and Lambertian) = 0.130

LOCAL ALBEDO (constant and Lambertian) = 0.130

```
=====
=====
=====
=====
```

* SOLAR POSITION (deg.):

Zenith Angle (apparent) = 45.790 Azimuth (from North) = 180.00

RELATIVE OPTICAL MASSES:

- Rayleigh = 1.433

- Water Vapor = 1.434

- Ozone = 1.431

- NO2 = 1.433

- Aerosols = 1.434

CO2 Mixing Ratio (ppmv): 401.2

Total column abundances (atm-cm) for all gases except H2O, and for normal/standard conditions:

BrO CH2O CH4 ClNO3 CO CO2 HNO2 HNO3 NH3

0.2500E-05 0.3000E-03 0.1220E+01 0.1200E-03 0.7836E-01 0.2972E+03 0.1000E-03 0.3772E-03 0.1388E-03

NO NO2 NO3 N2 N2O O2 O3 O4 SO2

0.2986E-03 0.2098E-03 0.5000E-04 0.3184E+06 0.2270E+00 0.1548E+06 0.2510E+00 0.1548E+06 0.8961E-04

* ANGLES (deg.) FOR TILTED SURFACE CALCULATIONS:

Surface Tilt = 0.000 Surface Azimuth (from North) = 0.000

Incidence Angle = 45.790

Diffuse irradiance ratios (tilted plane/horizontal):

1.0000 (isotropic approximate conversion--for reference)

1.0001 (anisotropic conversion model--used here)

* * * * *

** SPECTRUM:

Total (0-100 μm) Extraterrestrial Irradiance used here = 1367.00 W/m²

(i.e., 1.0000 times the selected solar constant, 1367.00 W/m², due to the actual Sun-Earth distance.)

Source for selected solar spectrum: Gueymard_2003

To account for the chosen Solar Constant value, the selected solar spectrum has been uniformly multiplied by this scaling coefficient = 1.0007

*** IRRADIANCES IN W/m² nm FOR A GIVEN WAVELENGTH (in nm)

“VALORES DELETADOS – equivalente a 30 paginas”

Wavelength Range = 300.0 to 1700.0 nm; Number of Wavelengths = 1502

*** BROADBAND IRRADIANCES (W/m²):

* DIRECT BEAM AT NORMAL INCIDENCE:

Extraterrestrial = 1222.39 Terrestrial = 906.98 Atmospheric Transmittance = 0.7420

* FOR THE HORIZONTAL PLANE:

Direct Beam = 632.42 Diffuse = 73.86 Global = 706.28 Clearness index, K_T = 0.5167

Diffuse irradiance origination details:

Sky diffuse = 66.47 Back-scattered diffuse = 7.39

* FOR THE TILTED PLANE:

Direct Beam = 632.42 Sky Diffuse = 73.86 Ground Reflected = 0.00 Global = 706.28