



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.05.20.52-TDI

INFLUÊNCIA DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Guilherme Marques Neves

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Waldeir Amaral Vilela, e Enio Bueno Pereira, aprovada em 20 de maio de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LKTTU8>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.05.20.52-TDI

INFLUÊNCIA DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Guilherme Marques Neves

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Waldeir Amaral Vilela, e Enio Bueno Pereira, aprovada em 20 de maio de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LKTTU8>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Neves, Guilherme Marques.

N414i Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos / Guilherme Marques Neves. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xl + 198 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.05.20.52-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Waldeir Amaral Vilela, e Enio Bueno Pereira.

1. Energia solar. 2. Módulos fotovoltaicos. 3. Espectro da radiação solar. I.Título.

CDU 551.521.1



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

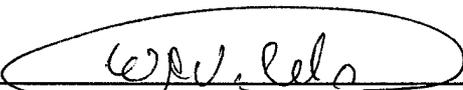
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Guilherme Marques Neves**

Título: " INFLUÊNCIA DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR EM MÓDULOS FOTVOLTAICOS".

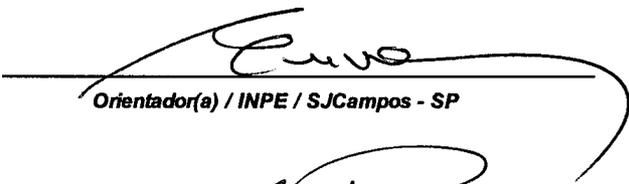
Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores**

Dr. Waldeir Amaral Vilela



Presidente / Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Enio Bueno Pereira



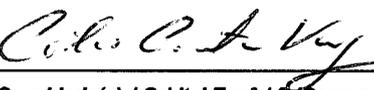
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Luiz Ângelo Berni



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Celio Costa Vaz



Convidado(a) / Orbital Eng^a / SJC Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 20 de Maio de 2016

“The sun will be the fuel of the future”.

Anônimo, 1876

A meu avô José Edimar das Neves (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, por todo apoio dado para a realização deste sonho. Eles foram fundamentais.

Sou grato também ao Dr. Luiz Angelo Berni, por todas as vezes que me auxiliou na realização do projeto e por todas as dicas.

Ao Dr. Nelson Veissid, por todas as vezes que me ajudou, possibilitando que a realização deste trabalho.

Ao Dr. Antonio Fernando Beloto, por todos os conselhos e auxílios com processos burocráticos.

Ao Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, por ceder os módulos fotovoltaicos de Silício estudados nesta dissertação e por terem realizados os levantamentos das curvas I x V.

À Orbital Engenharia, por nos auxiliar nas soldagens das células utilizadas nos minimódulos de Arseneto de Gálio e tripla junção.

Ao Laboratório de Instrumentação Meteorológica, que me ajudou durante todo o período de realização deste trabalho e que foram tão solícitos durante a construção dos sistemas de aquisição de dados.

À ETE, na pessoa de Mario Ferreira Baruel, por ceder as células de Arseneto de Gálio e tripla junção que foram utilizadas nos minimódulos fotovoltaicos.

Ao João Caetano, pelos auxílios em informática, ao Jean Lucas por ter me auxiliado nesta empreitada com ânimo e disposição e ao Dalmo Pasin que com presteza ajudou no desenvolvimento dos sistemas.

Ao Tiago Paes, pelos conselhos que me tornaram um mestrando melhor.

Ao Projeto Sonda, por ceder gentilmente os dados de radiação da estação de Cachoeira Paulista.

A todos os meus amigos inpeanos que, com paciência, me ajudaram a perseverar na carreira acadêmica.

E por último, mas não menos importante, eu gostaria de agradecer aos meus orientadores Dr. Waldeir Amaral Vilela e Dr. Enio Bueno Pereira por terem batalhado e se dedicado para a realização deste trabalho. Muito obrigado por

terem contribuído não somente para a minha formação como profissional, mas para a minha formação como cidadão. Serei para sempre grato pela oportunidade e pela confiança.

RESUMO

O mercado fotovoltaico global tem crescido bastante nos últimos anos e a geração de energia elétrica a partir dos recursos solares tem se mostrado muito promissora apesar de alguns problemas que limitam sua utilização. Para que este mercado continue crescendo e se desenvolvendo, um maior conhecimento a respeito do funcionamento em campo dos módulos fotovoltaicos se faz necessário para que tecnologias e metodologias possam se tornar cada vez mais eficientes e melhores. Levando em consideração que os efeitos causados pelo espectro da radiação solar nos módulos fotovoltaicos, diferentemente da Irradiância e da temperatura, não são bem conhecidos, este trabalho teve como principal objetivo estudá-los, compreender suas principais diferenças com o padrão e conhecer seus efeitos nos dispositivos fotovoltaicos. Para tanto um sistema de aquisição de dados foi desenvolvido e montado em Cachoeira Paulista – SP onde dados espectrais foram coletados e seis módulos de tecnologias diferentes (a-Si, μ -Si, p-Si, m-Si, GaAs e tripla junção) foram monitorados. Com os dados obtidos parâmetros como o Fator de Formato Espectral Relativo (FFER), a Energia Média dos Fótons (APE) e o Fator Espectral Corrigido (FEC) foram calculados e utilizados nos estudos realizados. Com os resultados destes estudos, pôde-se conhecer algumas características dos espectros solares de Cachoeira Paulista e observar seus efeitos causados nos módulos fotovoltaicos. Efeitos causados por alguns elementos atmosféricos (como o vapor d'água) também foram observados em ambos.

Palavras-chave: Energia solar. Módulos fotovoltaicos. Espectro da radiação solar.

SOLAR SPECTRUM RADIATION INFLUENCE ON PHOTOVOLTAIC MODULES

ABSTRACT

The global photovoltaic market has grown considerably in recent years and the generation of electricity from solar resources has proven to be very promising despite some problems that limit their use. For the growth and development of PV market, a greater knowledge on the field operation of PV modules is necessary to help on developing and improving new approaches in PV technologies. Considering that the spectral effects of solar radiation on photovoltaic modules have not yet been thoroughly studied, this project aimed to understand the main differences between observed spectra with respect to the ASTM standard and to analyze their effects on photovoltaic devices. To achieve this goal, a data acquisition system was developed and assembled in Cachoeira Paulista – SP, where spectral data have been collected, and six different kinds of photovoltaic modules (a-Si, μ -Si, p-Si, m-Si, GaAs and triple junction) have been monitored. The collected data were used to calculate parameters such as Relative Spectral Form Factor (FFER), Average Photon Energy (APE) and Corrected Spectral Factor (FEC), that were used in this study. With this information, some characteristics of the solar spectrum in Cachoeira Paulista influenced by atmospheric parameters (like water vapor) could be identified, as well as their effects on photovoltaic modules.

Keywords: Solar energy. Photovoltaic modules. Solar radiation's spectrum.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Consumo global de energia no mundo em 2012.....	5
Figura 2.2 – Emissão dos gases do efeito estufa entre os anos de 1990 e 2010 discriminado com a quantidade de cada um deles.....	6
Figura 2.3 – Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.....	13
Figura 2.4 – Matriz energética brasileira.	16
Figura 2.5 – Espectro eletromagnético.....	19
Figura 2.6 – Exemplo físico da cavidade que simula o comportamento de um corpo negro.	22
Figura 2.7 – Espectros eletromagnéticos emitidos por Corpos Negros em diversos valores de temperatura.	24
Figura 2.8 – Variação da Irradiância no topo da atmosfera com os dias do ano.	27
Figura 2.9 – Movimento de Translação da Terra ao redor do Sol.	28
Figura 2.10 – Esfera Celestial aonde estão representadas os ângulos trigonométricos válidos para o hemisfério norte.	31
Figura 2.11 – Espectro Extraterrestre no topo da atmosfera.....	32
Figura 2.12 – Variação da Constante Solar com o passar dos anos.....	34
Figura 2.13 – Esquema simplificado com as interações entre as ondas eletromagnéticas provenientes do Sol e o planeta Terra.	35
Figura 2.14 – Espectros AM0 e AM1.5G.....	36
Figura 2.15 – Variação da distância percorrida pela radiação na atmosfera terrestre de acordo com o ângulo zenital.	41
Figura 2.16 – Transmissão da mistura de gases que compõem a atmosfera. .	44
Figura 2.17 – Espectro AM0, AM1.5 Global e AM1.5 Direto.	46
Figura 2.18 – Distribuição espectral da radiação solar global para AM=1 em Albuquerque (USA), Porto Alegre e Cuiabá.	47

Figura 2.19 – Separação da radiação solar nas suas duas componentes: a radiação direta e difusa.	48
Figura 2.20 – Distribuição espectral das componentes da radiação solar.	49
Figura 2.21 – Efeito da Massa de Ar no Espectro Solar.....	50
Figura 2.22 – Variação da Massa de Ar entre os horários das 10:00 e 14:00 para os meses de janeiro a junho em (A) e de julho a dezembro em (B).	50
Figura 2.23 – Influência da quantidade de vapor de água atmosférico no formato do espectro solar.....	53
Figura 2.24 – Profundidade Óptica dos Aerossóis.	54
Figura 2.25 – Efeito do POA no espectro solar na superfície terrestre.	54
Figura 2.26 – Curvas espectrais com diferentes intensidades e mesmo formato e APE.....	57
Figura 2.27 – Curvas espectrais normalizadas diferentes valores de APE.	57
Figura 2.28 – Variação do APE com as grandezas AM, K_T , w e POA.....	58
Figura 2.29 – Configurações dos dispositivos fotovoltaicos.....	59
Figura 2.30 – Crescimento cumulativo da capacidade instalada entre os anos de 2003 e 2013.	61
Figura 2.31 – Processo de conversão da radiação solar em corrente elétrica em células fotovoltaicas.	62
Figura 2.32 – Circuito eletrônico que simula uma célula fotovoltaica ideal em (A) e uma célula real em (B).	63
Figura 2.33 – Curva I x V de uma célula solar fotovoltaica aonde são indicados os seus principais parâmetros.....	65
Figura 2.34 – Efeito na curva I x V da resistência em série em (A) e em paralelo em (B).	69
Figura 2.35 – Eficiência no processo de conversão da energia solar em elétrica de acordo com os valores de Energia de Banda Proibida de alguns semicondutores.....	71
Figura 2.36 – Resposta Espectral de uma célula solar ideal de uma célula real.	72

Figura 2.37 – Região de aproveitamento do espectro solar incidente por uma célula de silício cristalino.....	73
Figura 2.38 – Respostas espectrais para diversas tecnologias de células solares fotovoltaicas em (A) e para uma tecnologia de tripla junção em (B).	74
Figura 2.39 – Curvas I x V de células solares de Silício para diferentes intensidade de radiação.	75
Figura 2.40 – Influências da temperatura na curva I x V de uma célula fotovoltaica.	76
Figura 2.41 – Esquema de uma célula cristalina de Silício.	80
Figura 2.42 – Processo simplificado da produção do módulo CIGS.	82
Figura 2.43 – Estrutura de uma célula de a-Si:H.....	83
Figura 2.44 – Estrutura de uma célula feita com CdTe.	84
Figura 2.45 – Estrutura de uma célula CIGS.....	85
Figura 2.46 – Esquema de uma célula fotovoltaica de tripla junção.....	86
Figura 2.47 – Relação entre os valores de E_G e as faixas espectrais absorvidas por cada camada de uma célula de tripla junção.	87
Figura 2.48 – Resultados encontrados por Nofuentes e colaboradores.....	96
Figura 2.49 – Resultados encontrados por Dirnberger e colaboradores.	97
Figura 2.50 – Resultados encontrados por Ishii e colaboradores.....	98
Figura 2.51 – Resultados encontrados por Betts.	99
Figura 3.1 – Minimódulos especiais de células de TJ e GaAs.	103
Figura 3.2 – Minimódulos e suas partes e componentes.	104
Figura 3.3 – Esquema do UCDE.	107
Figura 3.4 – Desenho esquemático ilustrativo da Interface Óptica – (A) Vista lateral externa e (B) secção transversal.	108
Figura 3.5 – Foto da interface óptica com o cordão óptico.....	109
Figura 3.6 – Transmitância Espectral Absoluta do difusor de teflon utilizado na Interface Óptica.	110
Figura 3.7 – Reflectância do espelho de primeira face fabricado pela Edmund Optics.	111

Figura 3.8 – (A) Bancada Óptica utilizado para a obtenção da resposta angular da Interface, (B) detalhe do deslocamento da Interface durante a medição da curva da resposta angular, onde o difusor é iluminado pelo feixe luminoso durante todo o deslocamento (de -90° a $+90^\circ$).	112
Figura 3.9 – Erro relativo à lei dos cossenos para a Interface Óptica desenvolvida.	113
Figura 3.10 – Foto do computador, espectrômetro e acionador do UCDE.....	114
Figura 3.11 – Esquema do sistema utilizado para calibrar o conjunto formado pelo espectrômetro, cordão óptico e interface óptica.	115
Figura 3.12 – Curva espectral de calibração utilizada.	116
Figura 3.13 – Diagrama elétrico do acionador automático do espectrômetro composto pelo Arduino, RTC e por um leitor LCD.	118
Figura 3.14 – Esquema do UCDD.....	119
Figura 3.15 – Coletor de Dados CR1000 utilizado.	120
Figura 3.16 – Foto do multiplexador AM16/32B.	121
Figura 3.17 – Rádio RF401 utilizado.	122
Figura 3.18 – Reta de carga sobre a curva $I \times V$ utilizada para obter o valor da resistência de carga dos módulos fotovoltaicos.	123
Figura 3.19 – Banco de carga – (A) vista frontal e (B) vista lateral.	124
Figura 4.1 – Espectros médios das 12:00h coletados sob céu limpo para os meses de fevereiro e julho de 2015.	134
Figura 4.2 – Espectros médios normalizado das 12:00h coletados sob céu limpo para os meses de fevereiro e julho de 2015.	134
Figura 4.3 – FFER do espectro médio das 12:00h para o mês de fevereiro com as indicações das regiões espectrais que sofrem absorções.	135
Figura 4.4 – FFER do espectro médio das 12:00h para o mês de fevereiro com as indicações das regiões espectrais que sofrem espalhamento.	135
Figura 4.5 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de fevereiro para a condição de céu limpo.	136

Figura 4.6 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de fevereiro para a condição de céu parcialmente nublado.	137
Figura 4.7 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de fevereiro para a condição de céu nublado.	137
Figura 4.8 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de julho para a condição de céu limpo.	138
Figura 4.9 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de julho para a condição de céu parcialmente nublado.	138
Figura 4.10 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de julho para a condição de céu nublado. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.	139
Figura 4.11 – Variação do APE médio de acordo com o horário do dia.	141
Figura 4.12 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de fevereiro.	142
Figura 4.13 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de abril.	142
Figura 4.14 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de julho.	143
Figura 4.15 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de setembro.	143
Figura 4.16 – Variação da Energia Média dos Fótons para o horário das 12:00h ao longo dos meses para as condições de céu limpo.	144
Figura 4.17 – Curvas do FFER calculadas para vários meses com dados das 12:00h coletados sob a condição de céu limpo. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.	145
Figura 4.18 – Variação da Energia Média dos Fótons de acordo com o Índice de Limpidez ao longo dos meses para o horário das 12:00h.	147

Figura 4.19 – Curvas do FFER obtidas para diferentes condições de céu no mês de fevereiro. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.	147
Figura 4.20 – Curvas do FFER obtidas para diferentes condições de céu no mês de julho. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.	148
Figura 4.21 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício amorfo.	150
Figura 4.22 – Variação da I_{CC} coletada em campo devidamente corrigida com a temperatura e irradiância para o módulo de a-Si com a energia média dos fótons.	152
Figura 4.23 – Exemplo da variação do Fator Espectral Corrigido médio com os horários de medição para o módulo de a-Si.	153
Figura 4.24 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com a condição de céu limpo para o módulo de a-Si.	154
Figura 4.25 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o módulo de a-Si.	156
Figura A.1 – Curvas $I \times V$ sob o espectro AM1.5G dos módulos de Silício – (A) amorfo, (B) mono cristalino, (C) poli cristalino, (D) micro cristalino.	171
Figura A.2 – Curvas $I \times V$ sob o espectro AM1.5G dos minimódulos de Arseneto de Gálio – (A) 1, (B) 2, e de tripla junção (C) 1, (D) 2.	172
Figura A.3 – Curvas $I \times V$ sob o espectro AM1.5G do módulo de Silício amorfo.	172
Figura A.4 – Curvas $I \times V$ sob o espectro AM1.5G do módulos de Silício micro cristalino.	173
Figura A.5 – Curvas $I \times V$ sob o espectro AM1.5G do módulos de Silício poli cristalino.	173
Figura A.6 – Curvas $I \times V$ sob o espectro AM1.5G do módulo de Silício mono cristalino.	174

Figura A.7 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de Arseneto de Gálio 1.....	174
Figura A.8 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de Arseneto de Gálio 2.....	175
Figura A.9 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de tripla junção 1.....	175
Figura A.10 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de tripla junção 2.....	176
Figura A.11 – Curvas I x V sob o espectro AM0 dos módulos de Silício – (A) amorfo, (B) mono cristalino, (C) poli cristalino e (D) micro cristalino.	176
Figura A.12 – Curvas I x V sob o espectro AM0 dos minimódulos de Arseneto de Gálio – (A) 1, (B) 2, e tripla junção - (C) 1 e (D) 2.	177
Figura B.1 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00 sob condição de céu ensolarado para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho e julho.	179
Figura B.2 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00 sob condição de céu ensolarado para os meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro.	179
Figura B.3 – Espectros médios normalizados da irradiância solar coletados às 12:00h sob condição de céu ensolarado para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho e julho.....	180
Figura B.4 – Espectros médios normalizados da irradiância solar coletados às 12:00h sob condição de céu ensolarado para os meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.	180
Figura B.5 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de fevereiro.	181

Figura B.6 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de abril.....	181
Figura B.7 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de julho.....	182
Figura B.8 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de setembro.	182
Figura B.9 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de fevereiro.....	183
Figura B.10 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de abril.....	183
Figura B.11 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de julho.....	184
Figura B.12 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de setembro.....	184
Figura C.1 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício amorfo. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.	185
Figura C.2 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício micro cristalino. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.	185

Figura C.3 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício poli cristalino. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.	186
Figura C.4 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício mono cristalino. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.	186
Figura C.5 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.	186
Figura C.6 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de tripla junção 1. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.	187
Figura C.7 – Variação da I_{cc} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício amorfo. A linha representa a I_{cc} no STC.	187
Figura C.8 – Variação da I_{cc} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício micro cristalino. A linha representa a I_{cc} no STC.	188
Figura C.9 – Variação da I_{cc} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício poli cristalino. A linha representa a I_{cc} no STC.	188
Figura C.10 – Variação da I_{cc} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício mono cristalino. A linha representa a I_{cc} no STC.	189
Figura C.11 – Variação da I_{cc} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1. A linha representa a I_{cc} no STC.	189

Figura C.12 – Variação da I_{cc} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de tripla junção 1. A linha representa a I_{cc} no STC.	190
Figura D.1 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício amorfo.	191
Figura D.2 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício micro cristalino.	191
Figura D.3 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício poli cristalino.	192
Figura D.4 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício mono cristalino.	192
Figura D.5 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do minimódulo de Arseneto de Gálio 1.....	192
Figura D.6 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do minimódulo de tripla junção 1.....	193
Figura D.7 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício amorfo.....	193
Figura D.8 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício micro cristalino.	193
Figura D.9 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício poli cristalino.	194
Figura D.10 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício mono cristalino.	194
Figura D.11 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1.	194
Figura D.12 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o minimódulo de tripla junção 1.....	195
Figura E.1 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o módulo de Silício amorfo.....	197
Figura E.2 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o módulo de Silício micro cristalino.	197

Figura E.3 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o módulo de Silício poli cristalino.	197
Figura E.4 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o módulo de Silício mono cristalino.	198
Figura E.5 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1.	198
Figura E.6 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o minimódulo de tripla junção 1.	198

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Potencial teórico das energias renováveis.	8
Tabela 2.2 – Subdivisões do espectro da radiação térmica de acordo com as normas ISO e CIE.	21
Tabela 2.3 – Fontes Radiativas nas regiões do UV, VIS e IV.	26
Tabela 2.4 – Constituintes permanentes da Atmosfera.....	37
Tabela 2.5 – Constituintes variáveis da Atmosfera.	38
Tabela 2.6 – Aerossóis atmosféricos.	39
Tabela 2.7 – Valor da Energia Média dos Fótons para o Espectro Padrão AM1.5G para diferentes faixas espectrais.....	56
Tabela 2.8 – Vantagens e desvantagens apresentadas pelos dispositivos fotovoltaicos.	60
Tabela 2.9 – Evolução da capacidade total instalada no mundo de várias energias renováveis entre os anos de 2004 e 2013.....	61
Tabela 2.10 – Energia de Banda Proibida para vários semicondutores.....	71
Tabela 2.11 – Condições Padrões de Testes (STC) para a avaliação dos dispositivos fotovoltaicos.....	88
Tabela 2.12 – Eficiências de células solares terrestres. Valores obtidos sob o STC.	90
Tabela 3.1 – Dados dos módulos de uso terrestre e células de uso espacial informados pelos fabricantes.....	102
Tabela 3.2 – Especificações dos Simuladores Solares do IEEE e do LIT.....	104
Tabela 3.3 – Características dos módulos fotovoltaicos obtidos a partir das curvas I x V sob os espectros AM1.5G e AM0.	105
Tabela 3.4 – Especificações do Arduino UNO.	117
Tabela 3.5 – Especificações do CR1000.	120
Tabela 3.6 – Intervalo de leitura do Coletor de Dados e suas respectivas resoluções.	121
Tabela 3.7 – Especificações dos termopares utilizados no UCDD.....	122

Tabela 3.8 – Valores calculados das resistências de carga para cada módulo.	124
Tabela 3.9 – Valores medidos das resistências utilizadas no Banco de Carga.	125
Tabela 3.10 – Especificações do radiômetro CM11 da Kipp & Zonen.	125
Tabela 3.11 – Dados coletados pelo Saded.....	126

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a-Si	Silício amorfo
a-Si:H	Silício amorfo hidrogenado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIST	<i>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology</i>
AM	Massa Ar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Energia Média dos Fótons
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBERS	Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CdTe	Telureto de Cádmio
CIE	<i>International Commission on Illumination</i>
CIGS	Disseleneto de Cobre – Índio – Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre-Índio
DSSC	Células sensibilizadas por corante
E_G	Energia de Banda Proibida
FEC	Fator Espectral Corrigido
FF	Fator de Forma
FFER	Fator de Formato Espectral Relativo
FR4	Placa de tecido de vidro recoberta com resina epóxi
FWHM	Largura à meia altura
GaAs	Arseneto de Gálio
Ge	Germânio
HFC	Hidrofluorcarboneto
I _{CC}	Corrente de Curto Circuito
IEEE	Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo
I _{FG}	Corrente Fotogerada
I _{MP}	Corrente de máxima potência
InGaP	Fosfeto de Índio Gálio
InGaAs	Arseneto de Índio Gálio

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITO	Óxido de Índio-Estanho
IV	Infravermelho
IV-A	Região do espectro que, de acordo com a norma CIE, situa-se entre 700 e 1400 nm
IV-B	Região do espectro que, de acordo com a norma CIE, situa-se entre 1400 e 3000 nm
IV-C	Região do espectro que, de acordo com a norma CIE, situa-se entre 3000 e 1000000 nm
IVD	Região do espectro que, de acordo com a norma ISO, situa-se entre 50000 e 1000000 nm
IVM	Região do espectro que, de acordo com a norma ISO, situa-se entre 3000 e 50000 nm
IVP	Região do espectro que, de acordo com a norma ISO, situa-se entre 780 e 3000 nm
LAPPS	<i>Large Area Pulsed Solar Simulator</i>
LAS	Laboratório Associado de Sensores e Materiais
LCD	Display de cristal líquido
LIM	Laboratório de Instrumentação Meteorológica
LIT	Laboratório de Integração e Teste
m-Si	Silício mono cristalino
MME	Ministério de Minas e Energia
MODTRAN	<i>Moderate Resolution Atmospheric Transmission</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
p-Si	Silício poli cristalino
PFC	Perfluorocarbono
P _{MP}	Máxima Potência do módulo fotovoltaico
POA	Profundidade Óptica dos Aerossóis
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
PV	<i>Photovoltaic</i>
PVUSA	<i>Photovoltaics for Utility Scale Applications</i>

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RE	Resposta Espectral
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SACI	Satélite Avançado de Comunicações Interdisciplinares
Saded	Sistema de aquisição de dados espectrais e de desempenho de módulos fotovoltaicos
SF	Fator Espectral
SMARTS2	<i>Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
SRC	<i>Standard Reporting Conditions</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TCO	Óxido Transparente e Condutor
Teflon	Politetrafluoretileno
TJ	Tripla Junção
TSI	Irradiância Solar Total
UCDD	Unidade de Coleta de Dados de Desempenho
UCDE	Unidade de Coleta de Dados Espectrais
UV	Ultravioleta
UV-A	Região do espectro que, de acordo com a norma ISO, situa-se entre 315 e 400 nm
UV-A1	Região do espectro que, de acordo com a norma CIE, situa-se entre 315 e 340 nm
UV-A2	Região do espectro que, de acordo com a norma CIE, situa-se entre 340 e 400 nm
UV-B	Região do espectro que, de acordo com as normas ISO e CIE, situa-se entre 280 e 315 nm
UV-C	Região do espectro que, de acordo com as normas ISO e CIE, situa-se entre 100 e 280 nm
V _{CA}	Tensão de Circuito Aberto
V _{MP}	Tensão de Máxima Potência
VIS	Vísivel
μp – Si	Silício micro cristalino

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m ²)
APE	Energia média dos fótons (eV)
c	Velocidade da luz (2,9979246 x 10 ⁸ m/s)
dz	Elemento infinitesimal da altura (m)
E	Energia (J)
h	Constante de Planck (6,626176 x 10 ⁻³⁴ Js)
k	Constante de Boltzmann (1,380662 x 10 ⁻²³ J/K)
FEC	Fator Espectral Corrigido
FF	Fator de Forma
FFER	Fator de Formato Espectral Relativo
g	Gravidade terrestre (9,8 m/s ²)
G	Irradiância (W/m ²)
G(λ)	Irradiância espectral (W/m ²)
M	Parâmetro de descasamento espectral
n	Fator de idealidade do diodo
q	Carga do elétron (1,6 x 10 ⁻¹⁹ C)
r	Distância Terra-Sol (Km)
RE(λ)	Resposta espectral (A/Wnm)
RH	Umidade relativa (%)
SF	Fator espectral
α	Ângulo Solar de Altitude (°)
δ	Declinação solar
η	Eficiência (%)
λ	Comprimento de onda da radiação eletromagnética (nm)
ν	Frequência da radiação eletromagnética (Hz)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (5,670400 (40) x 10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
φ	Latitude local (°)
Φ	Fluxo de fótons (m ⁻² s ⁻¹)
ψ	Ângulo azimutal
ω	Ângulo horário

d_n	Dia do ano no qual se deseja determinar alguma grandeza astronômica, como o Fator de Correção da Excentricidade ou Declinação Solar
E_0	Fator de Correção da Excentricidade
E_G	Energia da Banda Proibida (eV)
G_0	Irradiância no topo da atmosfera (W/m^2)
G_{CN}	Irradiância total emitida por um Corpo Negro em (W/m^2)
G_{CS}	Constante Solar ($1367 W/m^2$)
G_{STC}	Irradiância na condição padrão (W/m^2)
G_T	Irradiância na superfície terrestre (W/m^2)
G_λ	Intensidade da radiação espalhada em um determinado comprimento de onda λ (W/m^2nm)
H_s	Horário local (h)
I_{CC}	Corrente de curto circuito (A)
$I_{CC\ STC}$	Corrente de curto circuito na condição padrão (A)
I_D	Corrente de saturação reversa do diodo (A)
I_{FG}	Corrente fotogerada (A)
I_{MP}	Corrente de máxima potência (A)
I_T	Corrente total gerada por uma célula fotovoltaica (A)
K_T	Índice de limpidez
$M_{CN\lambda}$	Exitância espectral emitida pelo Corpo Negro ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)
P_{IN}	Potência máxima que chega ao módulo (W)
P_{MAX}	Potência máxima na condição medida (W)
$P_{MAX\ STC}$	Potência máxima na condição padrão (W)
P_{MP}	Máxima Potência do módulo fotovoltaico (W)
r_0	Distância Terra-Sol média em (Km)
R_M	Razão de Mistura (ppm)
R_P	Resistências em Paralelo (Ω)
R_S	Resistências em Série (Ω)
T_{STC}	Temperatura do dispositivo fotovoltaico na condição padrão ($^{\circ}C$)
V_{CA}	Tensão de circuito aberto (V)
$V_{CA\ STC}$	Tensão de circuito aberto na condição padrão (V)

V_{MP}	Tensão de máxima potência (V)
α_A	Coeficiente de absorção (mm^{-1})
α_T	Coeficiente térmico da corrente, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
β_T	Coeficiente térmico da tensão, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
γ_T	Coeficiente térmico da potência, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
η_0	Número de onda
λ_G	Comprimentos de onda equivalente à Energia de Banda Proibida (nm)
θ_z	Ângulo zenital
ω_l	Ângulo horário para o qual o G_0 é calculado

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 DESENVOLVIMENTO	5
2.1. A ENERGIA SOLAR NO MUNDO	5
2.1.1. Mudanças climáticas causadas pelos Combustíveis Fósseis	6
2.1.2. Fontes Alternativas de Energia	7
2.1.3. Energia solar no mundo	9
2.1.3.1. Disponibilidade da energia solar	10
2.1.3.2. Aproveitamento da energia solar.....	10
2.1.3.3. Obstáculos para a utilização da energia solar	11
2.1.4. A energia solar no Brasil	12
2.1.4.1. A crise hídrica como estímulo para o mercado fotovoltaico nacional	15
2.2. A RADIAÇÃO SOLAR E SUA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL	17
2.2.1. Radiação Eletromagnética	17
2.2.1.1. O espectro eletromagnético	18
2.2.1.2. Radiação Térmica	19
2.2.1.3. Radiação do Corpo Negro.....	21
2.2.1.4. Fontes de Radiação	25
2.2.2. O Sol	26
2.2.2.1. Relações Geométricas Sol - Terra	26
2.2.2.2. Irradiância no topo da atmosfera.....	31
2.2.3. O Sol como fonte de radiação	32
2.2.3.1. Espectro solar no topo da atmosfera.....	32
2.2.3.2. A constante solar e suas variações.....	33
2.3. EFEITOS ATMOSFÉRICOS SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	34
2.3.1. Constituintes Atmosféricos.....	36
2.3.1.1. Gases.....	36

2.3.1.2.	Particulados.....	38
2.3.2.	Processos de interação radiação atmosfera	40
2.3.2.1.	Espalhamento Atmosférico.....	41
2.3.2.2.	Absorção Atmosférica	43
2.3.3.	Espectro solar na superfície terrestre.....	46
2.3.3.1.	O espectro AM1.5G.....	46
2.3.3.2.	Componentes da radiação solar na superfície terrestre	48
2.3.4.	Variações espectrais relevantes para a geração fotovoltaica.....	49
2.3.4.1.	Caminho na atmosfera	49
2.3.4.2.	Índice de Limpeza	51
2.3.4.3.	Índice de Água Precipitável.....	52
2.3.4.4.	Profundidade Óptica dos Aerossóis	53
2.3.5.	Caracterização do espectro solar.....	54
2.3.5.1.	Influência dos parâmetros atmosféricos no valor do APE	58
2.4.	ENERGIA FOTOVOLTAICA	59
2.4.1.	Células Fotovoltaicas	62
2.4.1.1.	Circuito Eletrônico Equivalente das Células Solares.....	63
2.4.1.2.	Curva I x V.....	65
2.4.1.3.	Energias de banda proibida (Gap)	70
2.4.1.4.	Resposta Espectral	71
2.4.1.5.	Influência dos parâmetros externos nas características elétricas dos dispositivos fotovoltaicos	74
2.4.2.	Tecnologias Fotovoltaicas	77
2.4.2.1.	Células fotovoltaicas de primeira geração.....	79
2.4.2.2.	Células fotovoltaicas de segunda geração	81
2.4.2.3.	Células fotovoltaicas de terceira geração.....	86
2.4.3.	Avaliação dos Dispositivos Fotovoltaicos	87
2.4.3.1.	Eficiência	90
2.4.3.2.	Limitações das condições padrões de teste.....	91
2.4.4.	Influências das variações espectrais nos dispositivos fotovoltaicos	92

3	METODOLOGIA	101
3.1.	TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS AVALIADAS	101
3.1.1.	Confecção dos minimódulos de Arseneto de Gálio e Tripla Junção	102
3.1.2.	Caracterização dos Módulos Fotovoltaicos	104
3.2.	DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO SISTEMA DE COLETA DE DADOS	106
3.2.1.	Unidade de Coleta de Dados Espectrais - UCDE	106
3.2.1.1.	Interface Óptica	107
3.2.1.2.	Espectrômetro	113
3.2.1.3.	Acionador Automático do Espectrômetro	116
3.2.2.	Unidade de Coleta de Dados de Desempenho - UCDD.....	118
3.2.2.1.	Coletor de Dados e Multiplexador	119
3.2.2.2.	Rádios e Antenas	122
3.2.2.3.	Sensores de temperatura	122
3.2.2.4.	Banco de Carga	123
3.2.2.5.	Radiômetro.....	125
3.3.	ANÁLISE DOS DADOS	125
3.3.1.	Agrupamento dos Dados.....	126
3.3.2.	Fatores calculados	127
3.3.2.1.	Fatores para a avaliação das variações do espectro	127
3.3.2.2.	Fator para avaliação da influência espectral no desempenho dos módulos.....	129
3.3.3.	Processo de Análise.....	131
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	133
4.1.	ESTUDO DOS ESPECTROS	133
4.1.1.	Comparação do espectro de Cachoeira Paulista com o padrão AM1.5G	136
4.1.2.	Influência do parâmetro Massa Ar nos espectros solares	140
4.1.3.	Influência das condições de céu no espectro solar	146
4.2.	INFLUÊNCIA DO ESPECTRO NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ...	149

4.2.1.	Influência do espectro da radiação solar nos módulos fotovoltaicos	149
4.2.2.	Influência da Massa Ar, vapor de água e das núvens nos módulos fotovoltaicos	152
5	CONCLUSÕES.....	157
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
	ANEXO A – CARACTERÍSTICAS I x V DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	171
A.1	Curvas I x V obtidas sob o Simulador Solar de modelo Sol 2mx2m da Optosol.....	171
A.2	Curvas I x V obtidas sob o Simulador Solar de modelo HighLight LMT da PASAN	172
A.3	Curvas I x V obtidas sob o Simulador Solar de modelo LAPPS da Alpha – Ômega	176
	ANEXO B – DADOS ESPECTRAIS COLETADOS	179
B.1	Variações espectrais ao longo do ano	179
B.2	Variações espectrais ao longo das horas	181
B.3	Variações espectrais de acordo com as condições de céu.....	183
	ANEXO C – RELAÇÃO DO APE COM OS VALORES DE FEC E CORRENTE DE CURTO CIRCUITO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	185
C.1	Gráficos da relação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons	185
C.2	Gráficos da relação da Corrente de Curto Circuito Medida em campo corrigida em irradiância e temperatura com a Energia Média dos Fótons	187
	ANEXO D – VARIAÇÃO DO FEC COM O TEMPO	191
D.1	Gráficos da variação do FEC médio com os horários de medição	191
D.2	Gráficos da variação do FEC com os meses de medição	193
	ANEXO E – VARIAÇÃO DO FEC COM A CONDIÇÃO DE CÉU	197

1 INTRODUÇÃO

O aumento da quantidade de gases poluentes na atmosfera como resultado da emissão causada por atividades humanas, entre elas aquelas associadas à demanda de energia, é tida como uma das principais causas relacionadas ao aquecimento global. A elevação da temperatura média da atmosfera e dos oceanos pode trazer uma série de mudanças no clima com impactos significativos ao ambiente e à economia. Por isso há uma preocupação por parte de várias nações em minimizar a quantidade de gases do efeito estufa lançados na atmosfera, e a utilização de fontes renováveis de energia é uma das medidas mitigatórias mais imediatas a serem tomadas.

Dentre as várias opções de fontes de energia renovável conhecidas pelo homem, o aproveitamento da energia proveniente do Sol é uma das que mais tem se popularizado ao redor do mundo. Ela possui um mercado que tem apresentado elevadas taxas de crescimento e nos últimos tempos passou a ter papéis cada vez mais expressivos na matriz energética de alguns países como a Itália e a Grécia. O crescimento que este mercado vem experimentando é o resultado de incentivos governamentais e de pesquisas por parte de centros de pesquisas privados e governamentais que tem desenvolvido novas tecnologias e processos produtivos mais baratos destinados à exploração e utilização dessa fonte inesgotável de energia.

No Brasil, apesar dos elevados níveis de insolação, a energia solar ainda não possui participação significativa em sua matriz energética, que é predominantemente baseada na geração hídrica. Dentre os fatores que colaboram para que isto aconteça, pode-se citar o elevado custo dos dispositivos fotovoltaicos, ausência de uma indústria nacional para o setor, competição com a geração hidrelétrica, questões socioculturais e incentivos governamentais insuficientes ou ineficazes. Devido à queda significativa do volume de chuvas que ocorreu no país no final do período chuvoso entre o ano de 2014 e 2015, o Brasil passou a sofrer uma crise hídrica de grandes proporções que veio a prejudicar o setor de geração

elétrica. Isso levou a utilização de geradores com combustíveis fósseis, que além de poluírem o meio ambiente tiveram alto impacto no preço da energia elétrica. Tendo este panorama em vista e objetivando contribuir com a redução das emissões de gases do efeito estufa e aumentar a utilização de fontes alternativas, o Ministério de Minas e Energia lançou em dezembro de 2015 o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD). Dentro deste programa algumas ações vêm sendo tomadas, como leilões de energia para a produção de eletricidade utilizando módulos fotovoltaicos e a instalação de sistemas de geração solar flutuantes nos lagos das usinas hidrelétricas de energia de Sobradinho (Bahia – Brasil) e Balbina (Amazonas – Brasil) (MME, 2015; ANA, 2014; CERQUEIRA, 2015).

Apesar das taxas favoráveis de crescimento do mercado fotovoltaico mundial e de sua popularização, a geração a partir de módulos solares representa uma pequena parcela do total de energia produzida no mundo devido a alguns fatores que acabam limitando sua utilização, como os elevados custos de produção e instalação e a intermitência dos recursos solares (REN21, 2014, MIT, 2015). Com o intuito de minimizar estes problemas e aumentar a viabilidade de se utilizar esta forma de energia, muitas pesquisas e desenvolvimentos vêm sendo realizados.

Um tema que vêm sendo alvo de muitas pesquisas por ser importante para melhores avaliações da capacidade de geração e melhor retorno ao investimento é o estudo do desempenho em campo de módulos fotovoltaicos. Esse desempenho é estimado através do valor da eficiência energética declarada, medida em laboratório sob o STC - Standard Test Conditions¹. Porém, apesar de padronizarem os métodos de medição permitindo que a eficiência de tecnologias diferentes de células fotovoltaicas possa ser comparada em qualquer laboratório especializado, as condições do STC não são representativas das que ocorrem em campo na maioria das aplicações. Deste modo a performance dos dispositivos em

¹ As condições padronizadas pelo STC são a Irradiância, temperatura e o espectro utilizados durante os processos de avaliação dos módulos e devem valer 1000 W/m², 25°C e ser o AM1.5G, respectivamente.

campo nem sempre corresponde a eficiência obtida sob as condições do STC, o que pode frustrar investidores, agentes do governo e engenheiros do setor energético com relação às suas expectativas.

As pesquisas mais recentes sobre o funcionamento dos módulos em campo vêm contribuindo para uma melhor compreensão da influência de fatores ambientais na geração elétrica de sistemas fotovoltaicos. Dos parâmetros que mais afetam o desempenho de um módulo fotovoltaico, como a irradiância, temperatura, ângulo de incidência, espectro solar, etc., somente a influência da variação do espectro solar em campo ainda não é bem compreendida e nem considerada na avaliação da eficiência de um sistema fotovoltaico (BETTS, 2004; ISHII, et al., 2014; DIRNBERGER, et al., 2015). Por isso nos últimos anos alguns estudos têm sido realizados em busca de uma melhor compreensão dos efeitos que os diferentes espectros de irradiação solar causam nos módulos e até que ponto suas alterações podem afetar suas eficiências.

Resultados de pesquisas mais recentes vêm demonstrando que a influência das variações espectrais podem ser significativas dependendo da resposta espectral da célula solar utilizada. Dependendo da tecnologia adotada, observa-se que o desempenho irá variar de acordo com a localização, com o nível de poluição, quantidade de queimadas e outras atividades humanas, mostrando que o desempenho dos módulos podem variar bastante de uma região para outra (BETTS, 2004; ISHII, et al., 2014; DIRNBERGER, et al., 2015).

Com a finalidade de contribuir com o desenvolvimento do setor de energia solar no Brasil, este trabalho foi realizado com os seguintes objetivos: o de conhecer os espectros solares para uma localidade brasileira próxima a um centro consumidor, identificando as principais diferenças entre eles e o espectro AM1.5G, padrão G173-03 recomendado pela ASTM; analisar as principais variações dos espectros e identificar os elementos atmosféricos que os causaram; estudar os efeitos que os espectros solares causam na corrente de curto circuito dos módulos fotovoltaicos, identificando sob quais condições atmosféricas estes efeitos

foram mais pronunciados e quais das tecnologias fotovoltaicas se mostraram mais vulneráveis às essas variações.

Para atingir os objetivos deste projeto foi necessário desenvolver uma metodologia para medições e análise dos dados. Para tanto foi concebido um sistema de aquisição de espectro e um sistema para coleta de dados para várias tecnologias de módulos fotovoltaicos em operação. O local escolhido para instalação dos sistemas de aquisição de dados foi o Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM no campus do INPE em Cachoeira Paulista – SP próximo a uma estação de coleta de dados radiométricos e meteorológicos da rede SONDA, que fornece dados suplementares. Através dele foi possível coletar espectros solares em diversas condições ambientais ao longo do ano de 2015, dados de irradiância e de corrente de curto circuito e temperatura para seis módulos com tecnologias fotovoltaicas diferentes. Também foram desenvolvidos dois parâmetros para analisar as diferenças entre os espectros coletados em campo e o padrão AM1.5G recomendado pela ASTM além de auxiliar nos estudos das variações dos espectros. Estes parâmetros também foram utilizados para analisar a influência das variações espectrais na performance dos módulos fotovoltaicos em conjunto com um terceiro parâmetro desenvolvido para esta finalidade.

Com estes parâmetros e com os dados coletados espera-se contribuir das seguintes maneiras: oferecer uma metodologia para análise dos espectros da radiação solar e suas influências em módulos fotovoltaicos de diversas tecnologias; criar um primeiro banco de dados espectrais obtido em caráter experimental que irá permitir uma melhor compreensão do espectro solar e sua variabilidade para a região de Cachoeira Paulista visando buscar uma primeira referência para o sudeste brasileiro e, no futuro, continuar esse estudo em outras regiões e localidades.

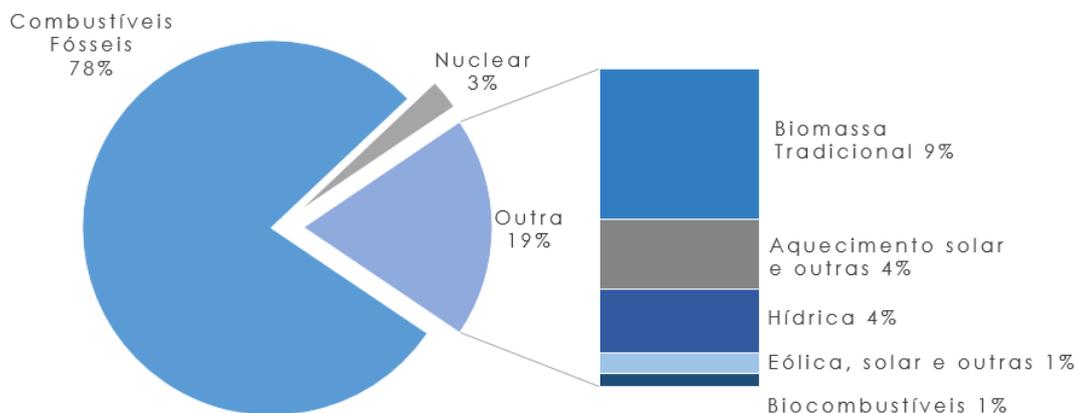
2 DESENVOLVIMENTO

2.1. A ENERGIA SOLAR NO MUNDO

A humanidade tem utilizado muitos dos recursos terrestres para se manter e se desenvolver, sendo a energia um dos mais importantes e necessários. Com ela consegue-se dar qualidade de vida às pessoas (garantindo saúde, conforto, etc.) e produtividade. Por isso, para que haja o desenvolvimento social e econômico das nações, a demanda por energia deve ser suprida (IPCC, 2007).

A demanda por energia vem crescendo com o passar do tempo e desde a revolução industrial o homem tem utilizado cada vez mais energia, tendo como principais fontes os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás). Os combustíveis fósseis apresentam dois fatores práticos que levaram à sua grande utilização: suas elevadas densidades energéticas e facilidade de transporte e armazenamento. Para exemplificar cita-se a gasolina, que em um litro fornece cerca de 35 MJ, valor que é mais que o dobro do que o fornecido por um quilograma de madeira ou dez horas de irradiação do Sol em um metro quadrado. Além disso, ela apresenta a conveniência de ser de fácil armazenamento e transporte (IEA, 2011). Tais vantagens contribuíram para a utilização maciça dos combustíveis fósseis, sendo que no ano de 2012, eles representavam cerca de 78,4% de todo o consumo de energia no mundo conforme mostra a Figura 2.1 (REN21, 2014).

Figura 2.1 – Consumo global de energia no mundo em 2012.

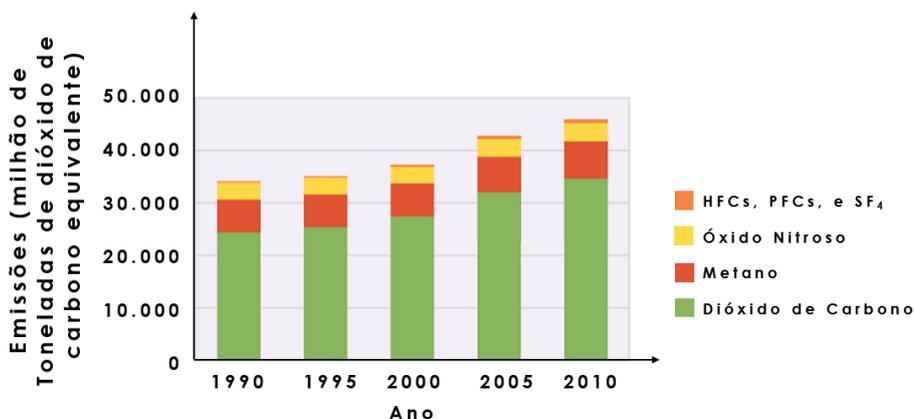


Fonte: Adaptado de REN21 (2014).

2.1.1. Mudanças climáticas causadas pelos Combustíveis Fósseis

Para que a energia seja obtida dos combustíveis fósseis é necessário queimá-los. Este processo de queima gera alguns resíduos indesejáveis, como os gases conhecidos por causar o “Efeito Estufa”, como, por exemplo, o Dióxido de Carbono (CO₂), o Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), etc. Estes gases apresentam grande capacidade de absorver partes da radiação transferida para a atmosfera, mantendo o planeta aquecido e auxiliando na manutenção da vida. Monitoramentos realizados por diversas instituições ao redor do mundo constataram um aumento em suas concentrações quando comparados com dados pré-revolução industrial e, de acordo com eles, o CO₂ apresentou um aumento de 40% em sua concentração, o CH₄ de 150% e o N₂O de 20% (IPCC, 2013). A Figura 2.2 traz um gráfico com a emissão destes gases entre 1990 e 2010, onde se observa que o gás mais emitido foi o CO₂.

Figura 2.2 – Emissão dos gases do efeito estufa entre os anos de 1990 e 2010 discriminado com a quantidade de cada um deles.



Fonte: Adaptado de EPA (2014).

Em conjunto com o aumento da quantidade de gases como o CO₂ na atmosfera, evidências de um aquecimento em escala global vêm sendo observadas. A elevação da temperatura da atmosfera e dos oceanos, retrocesso dos glaciares, diminuição da área coberta pelo gelo marinho nos polos e o aumento no nível dos mares são algumas evidências que podem ser citadas. Todos estes fatos levam à conclusão de que o planeta Terra como um todo está mais quente que no século XIX. Pesquisas climáticas

baseadas em medições diretas ou realizadas por satélites mostram que a Temperatura Global Média da Terra² aumentou 0,85°C no período entre 1850 e 2012 (IPCC, 2013).

2.1.2. Fontes Alternativas de Energia

Combustíveis fósseis são considerados os maiores contribuintes para a emissão de gases nocivos à saúde e causadores do aquecimento global, correspondendo a 56,6% de toda a emissão relacionada às atividades humanas (IPCC, 2012). Além disso, o setor que mais tem contribuído para tais emissões é o relacionado à geração e uso da energia (incluindo os combustíveis utilizados pelos veículos), que em 2010 representou cerca de 71% da emissão de gases do efeito estufa (EPA, 2014).

Em grandes quantidades esses gases podem vir a causar danos ao meio ambiente e por isso reduzir as taxas de emissão é uma das principais medidas mitigatórias a serem tomadas. Além disso, os combustíveis fósseis têm como inconveniente em longo prazo o fato de serem recursos finitos e, apesar de não se saber o tempo que irão durar os estoques naturais, no futuro a tendência é que seu preço se eleve por se tornarem cada vez mais escassos, podendo vir a ser menos viáveis que as fontes alternativas, tais como as renováveis (IEA, 2011). Desta forma, tendo estes problemas em vista, faz-se necessário tomar uma série de medidas que venham suprir a crescente demanda por energia de forma sustentável e sem contribuir para as mudanças climáticas. (IPCC, 2007, 2012). Uma dessas medidas envolve substituir fontes de energia com alta liberação de gases conhecidos como “gases do efeito estufa” por fontes alternativas de energia menos impactantes ao sistema climático global.

As fontes alternativas de energia podem substituir, em parte, os combustíveis fósseis na geração de calor (como a biomassa e energia solar térmica) ou de eletricidade (como a energia eólica, fotovoltaica, hidrelétrica, etc.), suprimindo assim as demandas de maneira segura e com baixos

² Temperatura média global considerando tanto a superfície dos continentes quanto dos mares e oceanos.

impactos ambientais. Elas são definidas como fontes cuja energia é retirada de processos geofísicos (como os ventos e fontes de calor geotérmicos), processos biológicos (como a biomassa) ou do Sol (radiação solar), e que se renovam naturalmente com uma frequência maior ou igual à sua taxa de consumo (IPCC, 2007, 2012) e, por conta disso são também conhecidas como “fontes renováveis” de energia.

As maneiras de se aproveitar as fontes renováveis envolvem uma grande gama de tecnologias e podem se basear nos recursos hídricos, como a hidrelétrica, a geotérmica que utiliza o calor geotérmico fornecido pelo manto terrestre, a eólica que aproveita os ventos, entre outras. Todas elas são utilizadas em maior ou menor grau dependendo de uma série de fatores, como disponibilidade de recursos naturais, interesse do mercado, disponibilidade e custos da tecnologia, etc. No ano de 2013, estima-se que elas correspondiam à cerca de 19% de todo o consumo de energia no mundo (vide Figura 2.1), sendo a biomassa a mais utilizada (IPCC, 2012).

A grande maioria das fontes de energia renováveis apresenta um potencial que supera a demanda mundial conforme apresentado na Tabela 2.1. Entre as fontes alternativas, a energia solar é a que mais se destaca devido ao seu elevado potencial. Embora todas elas se mostrem capazes de suprir as necessidades da humanidade, o grande desafio é o de aproveitar tais capacidades de uma maneira economicamente sustentável (IPCC, 2012).

Tabela 2.1 – Potencial teórico das energias renováveis.

Energia Renovável	Fluxo Anual (EJ/ano)	Fluxo de energia anual / quantidade utilizada de energia em 2008 pela humanidade
Bioenergia	1548	3,1
Energia Solar	3900000	7900
Energia Geotérmica	1400	2,8
Energia Hídrica	147	0,3
Energia dos Oceanos	7400	15
Energia Eólica	6000	12

Fonte: Adaptada de IPCC (2012).

Apesar de apresentarem potenciais capazes de satisfazer as necessidades energéticas, os custos de grande parte dessas fontes alternativas ainda são maiores que as dos combustíveis fósseis, embora algumas delas já estejam próximas da paridade tarifária, podendo ser consideradas economicamente competitivas como a energia eólica por exemplo. Os preços destas tecnologias vêm caindo devido às pesquisas e inovações na área e, principalmente, à políticas governamentais de incentivo. Porém, variações nos custos podem mudar de uma região para outra no globo devido à vários fatores, como as características da fonte de energia, a localização próxima ou distante dos centros consumidores, o tipo da tecnologia utilizada, a disponibilidade de recursos naturais, etc. (IEA, 2011).

As mudanças climáticas poderão afetar os níveis de produção de várias fontes renováveis de energia em maior ou menor grau, já que muitas delas dependem do clima. Porém a natureza e magnitude desses impactos ainda são incertas visto que estudos a este respeito são recentes. De maneira geral, energias baseadas na biomassa, radiação solar e hidrelétricas podem vir a ser impactadas, e os efeitos podem variar entre as localidades do globo (IPCC, 2012).

2.1.3. Energia solar no mundo

A energia solar é toda energia que o Sol emite em forma de ondas eletromagnéticas para o espaço. Todos os planetas do Sistema Solar, inclusive a Terra, recebem estas ondas que acabam sendo fonte para vários processos físicos e químicos que ocorrem em suas superfícies. No nosso planeta, os raios solares são responsáveis por desencadear vários processos, como, por exemplo, a evaporação da água, que é a origem do seu ciclo na atmosfera; o movimento das massas de ar e o desenvolvimento da vida. Desta forma, a energia produzida pelo Sol pode ser considerada como a responsável direta ou indiretamente por várias outras fontes de energia utilizadas pelo planeta ou pelo próprio homem (como a energia eólica, hidrelétrica, etc.) (PINHO; GALDINO, 2014).

Apesar de possuir um grande potencial, a geração de energia empregando tecnologia solar ainda representa uma pequena porcentagem de participação na matriz energética em escala global utilizada pelo homem. Mas a tendência que se apresenta é do crescimento dessa participação, com a redução de custos e a melhoria de eficiência nos processos de conversão. Atualmente vários países vêm investindo na energia solar em aquecimento de água ou geração elétrica por ser uma fonte alternativa capaz de contribuir para suprir suas necessidades energéticas de maneira segura e sustentável (IPCC, 2012; MIT, 2015).

2.1.3.1. Disponibilidade da energia solar

Considerando o consumo energético humano, potencialmente os recursos energéticos solares são abundantes. Em apenas uma hora o Sol envia à Terra uma quantidade de energia maior do que toda a população mundial consumiria em um ano inteiro. Cerca de 885 TWh de energia atinge a superfície terrestre por ano, quantidade 7900 vezes maior que o consumo global de energia em 2008 (IEA, 2014).

Os recursos solares são acessíveis a todos os países, sendo melhor distribuído ao redor do globo que outras fontes como a água ou os ventos (MIT, 2015). Assim, seu aproveitamento poderá contribuir significativamente para reduzir a dependência de fontes que são de difícil acesso para determinadas regiões do planeta (IEA, 2014).

2.1.3.2. Aproveitamento da energia solar

A energia solar pode ser aproveitada de diversas maneiras pelo homem. A partir deste recurso energético é possível se obter calor, iluminação, eletricidade e outros benefícios utilizando diversas tecnologias (IPCC, 2012; PINHO; GALDINO, 2014). Dentre as formas de se aproveitar a energia solar, destacam-se:

A) Aproveitamento de maneira passiva que envolve a absorção, estocagem e distribuição da energia sem a utilização de elementos mecânicos. Como

exemplo pode-se citar a utilização planejada de janelas para aumentar a intensidade e tempo da iluminação de espaços fechados durante o dia;

B) Aproveitamento de maneira ativa que utiliza a radiação solar em conjunto com elementos mecânicos para gerar ou retirar calor. Um exemplo são os aquecedores solares para água de chuveiro onde a água que passa por serpentinas dentro de um coletor solar é aquecida e distribuída pela residência para utilização;

C) Geração Elétrica a partir do efeito fotovoltaico onde a radiação solar é convertida em eletricidade através de dispositivos eletrônicos conhecidos como células solares com e sem a utilização de lentes concentradoras. Como exemplos podem ser citados os módulos fotovoltaicos de silício que quando expostos à radiação solar produzem uma diferença de potencial em seus terminais;

D) Geração Elétrica a partir da concentração da potência solar aonde a irradiância solar direta é concentrada para que haja o aquecimento de um material sólido, líquido ou gasoso que é utilizado na produção de eletricidade. Como exemplo podem ser citados os Sistemas de Energia Solar Concentrados nos quais vários espelhos refletem a radiação solar para um único ponto onde um líquido é aquecido e utilizado para mover turbinas, gerando eletricidade;

Cada uma das tecnologias de aproveitamento da energia solar apresenta um nível de desenvolvimento tecnológico diferente, sendo que sua utilização depende das condições locais e de políticas de incentivo por parte dos governos. Algumas delas já se encontram difundidas em alguns países apresentando competitividade em seus respectivos mercados energéticos (IPCC, 2012).

2.1.3.3. Obstáculos para a utilização da energia solar

De maneira geral, o aproveitamento intensivo da energia solar apresenta alguns obstáculos que em um primeiro momento podem vir a limitar seu uso por parte de alguns países. Para superá-los e tornar suas matrizes

energéticas mais sustentáveis, vários governos ao redor do globo vêm adotando políticas de incentivo. Como exemplo, podemos citar os seguintes obstáculos (MIT, 2015):

A) Custo: os custos dos equipamentos para aproveitamento da energia solar vêm caindo de maneira acentuada nos últimos anos, porém utilizar a energia solar para gerar eletricidade ainda supera o das energias convencionais na maioria dos países. Por isso, as contínuas quedas nos custos e políticas de incentivo são fundamentais para que no futuro ela se torne competitiva economicamente, possibilitando sua popularização;

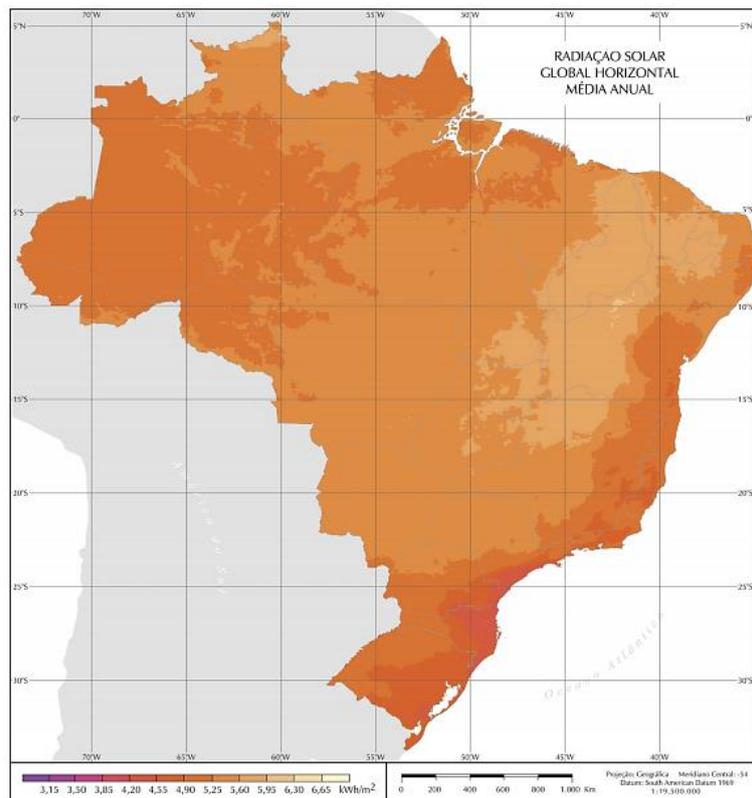
B) Intermitência: os recursos solares variam a todo o momento devido a uma série de fatores astronômicos e ambientais, de forma que a energia gerada por essa fonte não atende a definição de Energia Assegurada da ANEEL, aplicada para as usinas hidrelétricas³. Esta característica é o maior obstáculo para a utilização da energia solar como fonte única de suprimento de energia elétrica. Uma solução é utilizá-la em conjunto com outra fonte, de modo a garantir o suprimento energético assegurado ou, de utilizar-se de um esquema de energia distribuída no Sistema Interligado Nacional – SIN (para o caso do Brasil) (ONS, 2015).

2.1.4. A energia solar no Brasil

O Brasil possui elevados índices de insolação. Apesar de ser um país com dimensões continentais e diferentes características climáticas ao longo de seu território, ele apresenta condições ideais para o aproveitamento da energia solar. A média anual de irradiação global no Brasil apresenta boa uniformidade conforme ilustrado pela Figura 2.3. Os níveis nacionais de irradiação solar global incidente em qualquer parte do território ficam entre 1500 KWh/m² e 2500 KWh/m², valores que são muito maiores que de países europeus que fazem grande utilização de recursos solares como a Alemanha, que tem esses valores entre 900 KWh/m² e 1250 kWh/m² (PEREIRA et al., 2006).

³ Energia Assegurada do sistema elétrico brasileiro é a máxima produção de energia que pode ser mantida continuamente pelas usinas ao longo dos anos.

Figura 2.3 – Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.



Fonte: Pereira, et al. (2006).

No Brasil o mercado da energia elétrica de origem fotovoltaica ainda é incipiente, mas nos últimos anos vem surgindo um aumento do interesse por esta modalidade de produção de energia. Existem alguns fatores que impedem o desenvolvimento significativo deste mercado no país como o custo relativamente elevado desta tecnologia, o custo mais baixo da geração hidrelétrica, questões sociais e culturais, políticas de incentivo insuficientes e a baixa quantidade de pesquisa e de profissionais especializados nessa área. A presença de fortes incentivos em outros países para utilização de fontes renováveis em suas matrizes energéticas é resultado de possuírem uma dependência muito grande dos combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo, que são de alto impacto ambiental e, muitas vezes, dependentes de fornecedores externos, comprometendo a segurança energética desses países. Já no Brasil, uma vez que nossa matriz energética tem como principal fonte de energia elétrica a hidrelétrica

que é uma fonte de energia renovável e abundante no país, isso não acontece. (WALDEIR, 2010; PERLOTTI, et al., 2012; EPE, 2014).

Tendo em vista o grande potencial solar brasileiro e um mercado consumidor em expansão, há expectativas de que o país torne-se um grande produtor deste tipo de energia. Várias empresas internacionais têm manifestado interesse no Brasil e por isso vêm instalando representantes comerciais no país (PERLOTTI, et al., 2012). Há também esforços de centros de pesquisas e agências nacionais para que a energia fotovoltaica seja inserida na matriz energética brasileira através do SIN (Sistema Interligado Nacional). Os avanços alcançados nos últimos anos contemplaram ações oriundas de múltiplos agentes, em diversas esferas, destacando-se a regulatória, tributária, normativa, de pesquisa e desenvolvimento e de fomento econômico (EPE, 2014).

Estima-se que o valor da capacidade instalada no país até o final de 2011 era de aproximadamente 31,5 MW, sendo que 30 MW deste valor correspondia à sistemas não conectados à rede contra 1,5 MW de conectados. A grande maioria desta capacidade corresponde a vários projetos de pequeno porte, sendo a maioria deles para o suprimento de eletricidade em comunidades rurais e/ou isoladas do Norte e Nordeste do Brasil. Dentre as finalidades de tais projetos encontram-se o bombeamento de água para o consumo doméstico, irrigação e piscicultura; iluminação de ruas e praças; suprimento de energia para escolas, postos de saúde, etc.; ou o suprimento de energia para domicílios (PERLOTTI, et al., 2012).

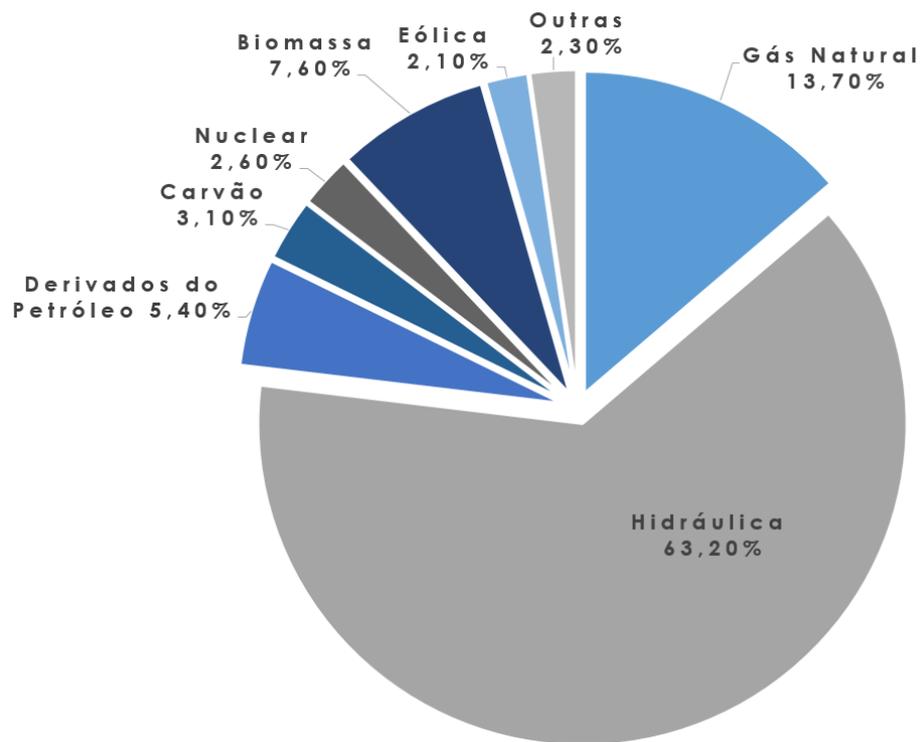
Algumas instituições de pesquisa em todo o Brasil vêm montando sistemas fotovoltaicos em suas dependências para fins de pesquisa. Elas utilizam de fundos de Pesquisa e Desenvolvimento concedidos pelo governo e por concessionárias de energia elétrica, que tem interesse nessa fonte alternativa. Atualmente vários sistemas de pequeno porte se encontram em funcionamento no Brasil em todas as regiões, sendo que a maioria deles apresentam uma geração de até 10kWp (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.4.1. A crise hídrica como estímulo para o mercado fotovoltaico nacional

O Brasil possui uma grande quantidade de recursos hídricos. Seus rios são em grande quantidade e muito caudalosos, fatores que propiciam a implantação de usinas hidrelétricas. Em 2013, o Brasil era o segundo país com a maior capacidade e geração de energia hidráulica do mundo (415 TWh), perdendo apenas pra China (905 TWh) (REN21, 2014; Em Discussão!, 2015).

Apesar de todos os benefícios que a geração hidráulica possui (dentre eles o fato de ser uma fonte renovável, limpa e de custo relativamente baixo) ela apresenta problemas, como, por exemplo, a necessidade de grandes extensões de reservatório que tem impactos ambientais e sociais por muitas vezes ocupar terras agriculturáveis ou área de florestas nativas como o caso da usina de Belo Monte. Também apresenta uma forte dependência dos ciclos de chuva e em épocas de estiagens atípicas isto se torna um problema crítico. No final do período chuvoso entre o ano de 2014 e 2015 no Sudeste brasileiro houve uma queda expressiva no volume de chuvas e o Brasil passou a sofrer uma crise hídrica, que prejudicou bastante o setor de geração elétrica. No final do ano de 2014, a capacidade instalada de energia hidrelétrica brasileira compreendia, segundo informações da ANEEL - *Agência Nacional de Energia Elétrica*, aproximadamente 63,2% da capacidade instalada total no país (vide Figura 2.4). Assim, mais da metade da matriz energética elétrica brasileira é dependente dos ciclos das chuvas, comprometendo nossa segurança energética no caso de baixos índices pluviométricos.

Figura 2.4 – Matriz energética brasileira.



Fonte: Adaptado de EPE (2015).

Tendo em vista a questão da segurança energética, visando reduzir as emissões de gases do efeito estufa e aumentar a participação das energias alternativas nas matrizes energéticas e elétricas do país, o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou em dezembro de 2015 o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD). Através deste programa o governo pretende estimular a geração de energia a partir de fontes renováveis (com ênfase na fotovoltaica) pelos próprios consumidores. Algumas ações já vêm sendo tomadas para o cumprimento deste projeto como, por exemplo, o estabelecimento de instruções por parte do MME para a qualificação de projetos fotovoltaicos visando a participação em leilões de produção de eletricidade utilizando tecnologia solar (os últimos leilões que ocorreram em 2014 e 2015 acrescentaram mais de 20 MWp de energia elétrica fotovoltaica para a matriz de energia elétrica nacional). Além disso, um sistema de geração solar flutuante de 10MWp vem sendo implantado nos lagos das usinas hidrelétricas de energia de Sobradinho (Bahia – Brasil) e Balbina (Amazonas – Brasil) (ProGD, 2015; ANA, 2014; CERQUEIRA, 2015). Se considerarmos que as mudanças

climáticas podem alterar o ciclo das chuvas e conseqüentemente o volume de água dos reservatórios das usinas hidroelétricas, diversificar a matriz energética e diminuir a dependência das hidrelétricas pode ser um fator crucial no futuro para manter um suprimento seguro de energia elétrica.

2.2. A RADIAÇÃO SOLAR E SUA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL

A distribuição espectral da radiação solar se assemelha à de um Corpo Negro à 5800 K e apresenta variações ao longo do tempo como resultado de alguns fenômenos intrínsecos ao Sol. Conhecer o Sol e como a energia fornecida por ele varia em função das relações astronômicas entre ele e a Terra e processos físicos ocorridos na atmosfera é importante para o desenvolvimento da geração fotovoltaica.

2.2.1. Radiação Eletromagnética

A radiação eletromagnética 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. Caso haja um meio, este deve ser pelo menos parcialmente transparente para que a transferência de energia ocorra (FRITSCHEN; GAY, 1979). A onda eletromagnética é formada por dois campos oscilantes e perpendiculares entre si (um elétrico e um magnético) que viajam com uma velocidade de $2,99792458 \times 10^8$ m/s no vácuo. As ondas eletromagnéticas (ou radiação eletromagnética) geralmente são caracterizadas pela sua frequência ν ou comprimento de onda λ . Essas duas propriedades se relacionam de acordo com a Equação 2.1. (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

$$\lambda = c/\nu \quad (2.1)$$

Sendo:

λ : Comprimento de onda

ν : Frequência de oscilação da onda

c : Velocidade de propagação da onda no meio no qual ela se propaga

A radiação eletromagnética apresenta como principal característica a habilidade de se comportar ora como onda ora como partícula. A sua propagação pode ser descrita da melhor maneira utilizando-se um modelo ondulatório baseado na física clássica, porém, para os processos físicos de emissão ou absorção da luz, é necessário considerar sua natureza corpuscular explicada pela física quântica. Neste caso, a energia transportada pela onda eletromagnética é concentrada em pacotes discretos conhecidos como fótons. Estes possuem energia proporcional à frequência da onda que os caracterizam, podendo ser calculada através da equação 2.2 (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

Com:

E : Energia transportada pela onda (J)

h : Constante de Planck = $6,6256 \times 10^{-34}$ Js

ν : frequência da onda (Hz)

c : velocidade da luz = 299792458 m/s

λ : comprimento de onda (m)

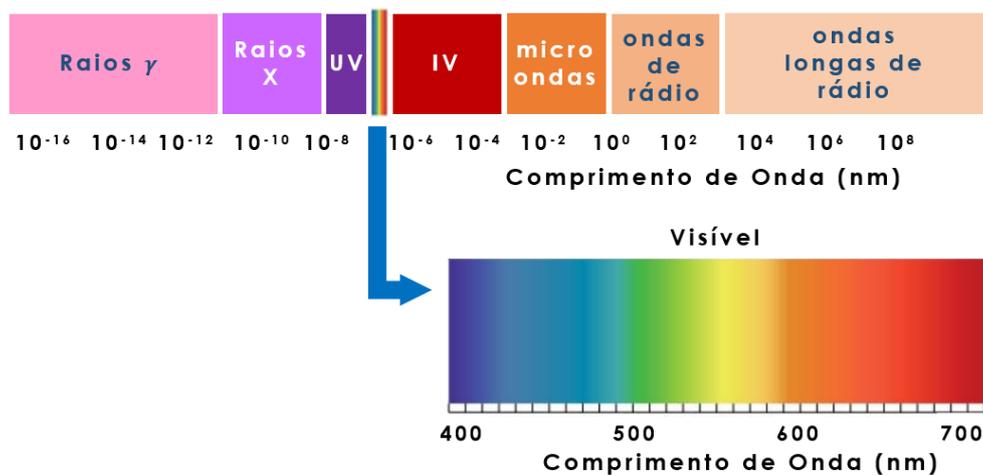
De acordo com a Equação 2.2 a energia dos fótons é quantizada e inversamente proporcional ao valor do comprimento de onda. Deste modo radiações com menores valores de λ apresentam as maiores energias.

2.2.1.1. O 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. Por conveniência, este espectro é classificado em várias regiões de acordo com o tipo de interação que a

radiação eletromagnética tem com a matéria em: Raios γ ; Raios X; Ultravioleta (UV); Visível (VIS); Infravermelho; Micro-Ondas ou Ondas de Rádio. Tal classificação ocorre em forma de intervalos de comprimento de onda (λ), frequência (ν) ou número de onda ($\eta_0 = 1/\lambda$) que não possuem limites fixos e podem acabar se sobrepondo (HARVEY, 2009). Na Figura 2.5 é mostrada uma ilustração do espectro eletromagnético e suas regiões.

Figura 2.5 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Harvey (2009).

2.2.1.2. Radiação Térmica

Toda a matéria acima da temperatura do Zero Absoluto (-273,15°C) emite radiação eletromagnética para o meio como resultado da constante agitação dos átomos ou moléculas que a compõem (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Como eles são constituídos por partículas que possuem carga (como os prótons e os elétrons), o movimento de agitação acelera tais partículas gerando as ondas eletromagnéticas. Essa radiação é conhecida como Radiação Térmica e quanto maior for a temperatura, maior será a emissão (EISBERG; RESNICK, 1985).

A emissão da radiação térmica para a matéria no estado condensado (isto é, sólido ou líquido) ocorre de maneira contínua ao longo de todos os comprimentos de onda (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Sendo que as características deste espectro serão dependentes da composição da matéria em um menor grau, mas dependerá muito da temperatura na qual

ela se encontra (EISBERG; RESNICK, 1985). O intervalo de emissão será de 0,1 μm a 1000 μm do espectro eletromagnético, compreendendo as regiões do ultravioleta, visível e do infravermelho (IQBAL, 1983).

A região do espectro ultravioleta possui os menores comprimentos de onda, e por consequência os fótons mais energéticos. De maneira geral, essa região do espectro é prejudicial aos seres vivos na Terra. A região do visível do espectro é conhecida como luz e possui a capacidade de interagir com células receptoras fotossensíveis⁴ presentes na retina do olho humano e dos animais em geral. (BERNI, 2014; GENTIL, 2008). A luz é dividida em cores de acordo com a sensação que os fótons com diferentes níveis de energia dessa região provocam no sistema visual do ser humano. Por exemplo, as radiações da banda entre 400 nm até 500 nm são capazes de transmitir as várias sensações de azul e ciano enquanto que as bandas entre 500 nm e 600 nm nos transmitem as várias sensações de verde e amarelo (KLEIN, 2010).

A região do espectro conhecida como infravermelho possui os comprimentos de onda mais longos da radiação térmica e por consequência, menores níveis de energia. Esta parte do espectro é muito utilizada pelo homem em várias áreas, como na eletrônica, na medicina, no sensoriamento remoto, etc. É nessa faixa espectral que os corpos à temperatura ambiente emitem radiação, incluindo o planeta Terra, de acordo com as leis de Stefan-Boltzmann e do deslocamento de Wien, como será visto adiante. (NASA, 2012).

As três regiões citadas podem ser divididas também em sub-regiões, sendo essa divisão arbitrária e dependente da norma adotada como referência. Na Tabela 2.2 seguem as classificações utilizadas pela ISO – *International Organization for Standardization* e pela CIE – *International Commission on Illumination*. Como pode ser observado na tabela, apesar das

⁴ Células Fotossensíveis são as responsáveis por transformar o estímulo luminoso em elétrico para o cérebro. Há dois tipos dessas células: os bastonetes e os cones. Os primeiros atuam em baixa iluminação e fornecem a percepção de contraste, sem distinguir cores. Já os segundos trabalham sob níveis mais altos de iluminação e fornecem uma visão mais detalhada com melhor distinção das cores. (Gentil, 2008)

classificações serem muito semelhantes, elas trazem valores de intervalos diferentes, o que pode dificultar comparações de resultados de medidas espectrais. Neste trabalho foi utilizada a classificação ISO pelo fato de a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT adotá-la.

Tabela 2.2 – Subdivisões do espectro da radiação térmica de acordo com as normas ISO e CIE.

Região do Espectro	λ (nm)		ISO	CIE		
	ISO	CIE	Classificação	λ (nm)	Classificação	λ (nm)
Ultravioleta	100-400	100-400	UV-C	100-280	UV-C	100-280
			UV-B	280-315	UV-B	280-315
			UV-A	315-400	UV-A1	315-340
					UV-A2	340-400
Visível	400-780	400-700	VIS	400-780	VIS	400-700
Infra Vermelho	780-1000000	700-1000000	IV Próximo (IVP)	780-3000	IV-A	700-1400
			IV Médio (IVM)	3000-50000	IV-B	1400-3000
			IV Distante (IVD)	50000-1000000	IV-C	3000-1000000

Fonte: Adaptado de Robles-Kelly e Huynh (2013).

É importante ressaltar que a emissão de radiação através da temperatura no qual o corpo se encontra não é a única forma de produzir radiação eletromagnética na região do Ultravioleta, Visível e Infravermelho.

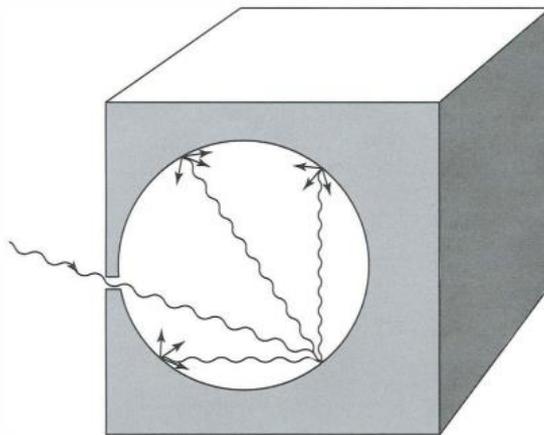
2.2.1.3. Radiação do Corpo Negro

De maneira geral, o formato do espectro da radiação térmica emitida por um corpo irá depender em maior grau de sua temperatura e em menor grau de sua composição. Porém, há corpos que emitem um espectro de caráter universal. Tais corpos são chamados de Corpos Negros e independentemente de sua composição química, todos eles sempre irão emitir o mesmo espectro da radiação se estiverem na mesma temperatura (EISBERG; RESNICK, 1985).

Corpos Negros são os corpos que absorvem o máximo da radiação incidente sobre eles e que, no equilíbrio, emitem o máximo de radiação em

todas as direções e comprimentos de onda. Um exemplo de Corpo Negro muito estudado na área da Física é o de uma cavidade com um pequeno orifício de entrada como ilustrado pela Figura 2.6. Toda onda eletromagnética que passar pelo orifício e atingir a superfície interna da cavidade será refletida ao mesmo tempo em que terá uma fração de sua energia absorvida. Este processo se repetirá indefinidamente (independentemente do material e do acabamento superficial da região interna) até que toda radiação seja absorvida pelas paredes da cavidade. A probabilidade de que as ondas escapem é tão pequena que o buraco possui uma coloração escura, justamente pelo fato de toda radiação ter sido absorvida em seu interior (EISBERG; RESNICK, 1985; LIOU, 2002; BERNI, 2014; CHEN, 2011).

Figura 2.6 – Exemplo físico da cavidade que simula o comportamento de um corpo negro.



Fonte: Liou (2002)

Uma das utilizações do Corpo Negro é na caracterização da distribuição espectral gerada por fontes reais (como o Sol, a Terra e as lâmpadas), aonde seus espectros são comparados entre si. Por isso conhecer as características de emissão do Corpo Negro é muito importante, assim como as relações matemáticas que as descrevem. A distribuição espectral emitida por um Corpo Negro no vácuo em qualquer temperatura é descrita pela equação de Planck abaixo (IQBAL, 1983; KLEIN, 2010):

$$M_{\text{cn}\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [e^{(hc/\lambda kT)} - 1]} \quad (2.3)$$

Onde:

$M_{\text{cn}\lambda}$: Exitância espectral emitida pelo Corpo Negro ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)

h : Constante de Planck = $6,626176 \times 10^{-34}$ (Js)

c : Velocidade da Luz no vácuo = $2,9979246 \times 10^8$ m/s

k : Constante de Boltzmann = $1,380662 \times 10^{-23}$ J/K

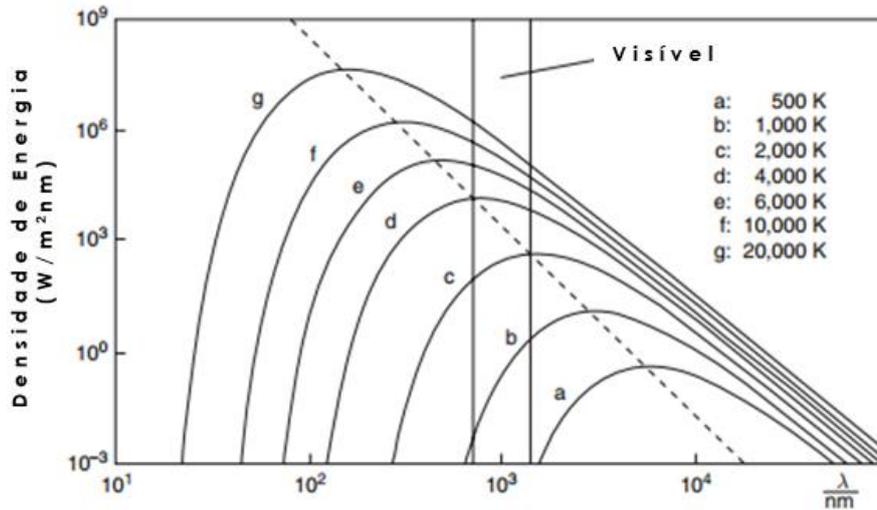
λ : Comprimento de Onda em μm

T : Temperatura em K

A equação 2.3 relaciona a Exitância⁵ de um Corpo Negro com o valor de sua temperatura, sendo capaz de descrever a curva do espectro eletromagnético produzido. Gráficos com estes espectros determinados para vários valores de temperatura são mostrados na Figura 2.7. Nela pode ser percebido que os maiores valores de Irradiância espectral estão relacionados com os menores valores de λ e, conforme a temperatura aumenta, a posição da máxima emissão desloca para os menores comprimentos de onda.

⁵ A grandeza radiométrica chamada de Exitância se refere à energia emitida por um corpo ou superfície por unidade de área e, além de utilizar as mesmas unidades físicas, possui uma definição próxima à da Irradiância. Esta, por sua vez, é definida como toda a energia que chega à um corpo ou superfície por unidade de área (Berni, 2014). Por isso ambas serão representadas pela mesma variável G e serão utilizadas neste trabalho pra se referir à energia emitida pelo Sol e recebida pela Terra.

Figura 2.7 – Espectros eletromagnéticos emitidos por Corpos Negros em diversos valores de temperatura.



Fonte: Adaptado de Klein (2010).

A posição de máxima emissão pode ser determinada através da lei do deslocamento de Wien dada pela Equação 2.4:

$$\lambda_{\text{máx}} T \cong 2897 \mu\text{mK} \quad (2.4)$$

Onde:

$\lambda_{\text{máx}}$: Comprimento de onda aonde ocorre a emissão máxima (μm)

T : Temperatura do corpo (K)

Esta lei irá determinar para qual valor de comprimento de onda ocorrerá a mais alta emissão, sendo que tal valor de λ será inversamente proporcional à temperatura do corpo. Ou seja, conforme a temperatura do corpo aumenta, o comprimento de onda de máxima emissão se torna menor. De acordo com ela, a máxima emissão do Sol (que está a 5.800 K) ocorre em 500 nm, enquanto que para a Terra (que está a 288 K) esse valor é de 10.000 nm (IQBAL, 1983).

Para obter a Irradiância Total emitida pelo Corpo Negro, basta integrar a Equação 2.3 ao longo de todos os valores assumidos por λ . Ao efetuar tal operação, encontra-se a Equação 2.5, conhecida como Lei de Stefan-

Boltzmann (IQBAL, 1983). Ela descreve a potência por unidade de área total G_{cn} emitida pela superfície de um corpo negro ideal.

$$G_{cn} = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

Onde:

G_{cn} : Irradiância total emitida pelo Corpo Negro em Wm^{-2}

σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,670400 (40) \times 10^{-8} W/m^2K^4$

T : Temperatura em K

Uma outra grandeza relacionada à emissão dos corpos que apresenta importância pra área fotovoltaica é o Fluxo de Fótons. Isso porque com ele é possível determinar a quantidade de elétrons gerados no processo de conversão fotovoltaica. Ele pode ser calculado através da Equação 2.6 (PVEDUCATION, 2015).

$$\Phi = \frac{G\lambda}{hc} \quad (2.6)$$

Onde:

Φ : Fluxo de fótons ($m^{-2}s^{-1}$)

G : Irradiância (W/m^2)

λ : Comprimento de onda (m)

h : Constante de Planck = $6,626176 \times 10^{-34}$ (Js)

c : Velocidade da Luz = $299\ 792\ 458$ m/s

2.2.1.4. Fontes de Radiação

As ondas eletromagnéticas podem ser geradas devido aos mais diversos processos físicos. Os corpos que são utilizados para este fim são chamados de fontes de radiação e podem ser de origem natural ou artificial. Por exemplo, o Urânio encontrado na natureza é um exemplo de fonte natural enquanto que as lâmpadas são fontes artificiais.

As fontes que geram radiação dentro das regiões do Ultravioleta, Visível ou Infravermelho podem ser classificadas em dois tipos de acordo com o processo de emissão: as Térmicas, que emitem devido à agitação térmica de seus átomos ou moléculas; e as Luminescentes, que emitem devido ao decaimento de seus átomos ionizados de níveis de energias maiores para níveis menores. Alguns exemplos dessas fontes seguem na Tabela 2.3. (KLEIN, 2010; PALMER; GRANT, 2009).

Tabela 2.3 – Fontes Radiativas nas regiões do UV, VIS e IV.

Fontes	Naturais	Artificiais
Térmicas	Sol	Lâmpadas de Tungstênio
	Planeta Terra	Lenha
Luminescentes	Aurora Boreal	Laser
	Vagalumes	Lâmpadas de descargas a gás

Fonte: Adaptado de Palmer e Grant (2009)

2.2.2. O Sol

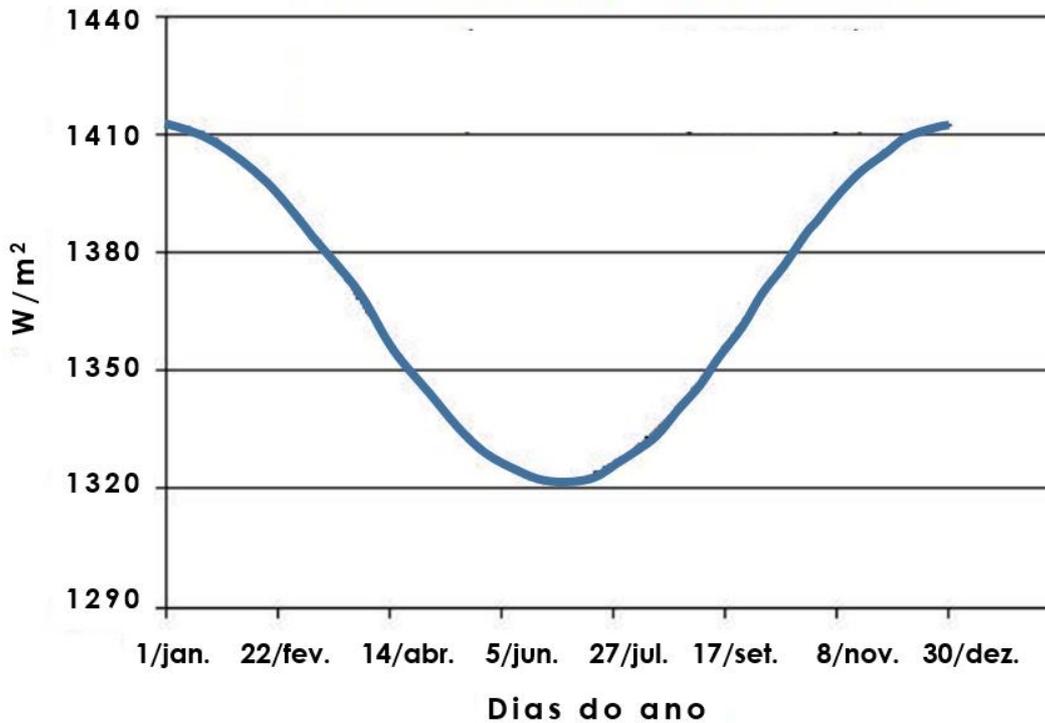
O Sol é a fonte de energia mais importante para a humanidade e para o planeta Terra. Ele é basicamente uma esfera de gás ionizado com elevadas temperaturas. Sua massa é de aproximadamente $1,989 \times 10^{30}$ kg, da qual 91,2% é Hidrogênio, 8,7% é Hélio e o restante são componentes minoritários como os metais pesados, o Oxigênio e o Carbono (PINHO; GALDINO, 2014). Seu diâmetro é de $1,392 \times 10^9$ m e sua distância média em relação ao planeta Terra é de $1,499 \times 10^{11}$ m (YAMASOE, 2006).

2.2.2.1. Relações Geométricas Sol - Terra

A radiação solar que chega ao topo da atmosfera terrestre varia ao longo do ano devido ao movimento da Terra ao redor do Sol e é inversamente proporcional à distância da Terra ao Sol ao quadrado (IQBAL, 1983). As oscilações neste valor são ilustradas na Figura 2.8 abaixo e, conforme pode ser visto, ele oscila entre máximos e mínimos em função dos dias do ano. O outro movimento da Terra é o que ela faz em torno de si mesma, que é responsável pela variação da Irradiância ao longo do dia. As dinâmicas entre a Terra e o Sol acabam criando uma série de relações que afetam a

intensidade da radiação que chega em vários pontos da superfície terrestre. Elas devem ser consideradas em estudos que visem estimar os recursos solares.

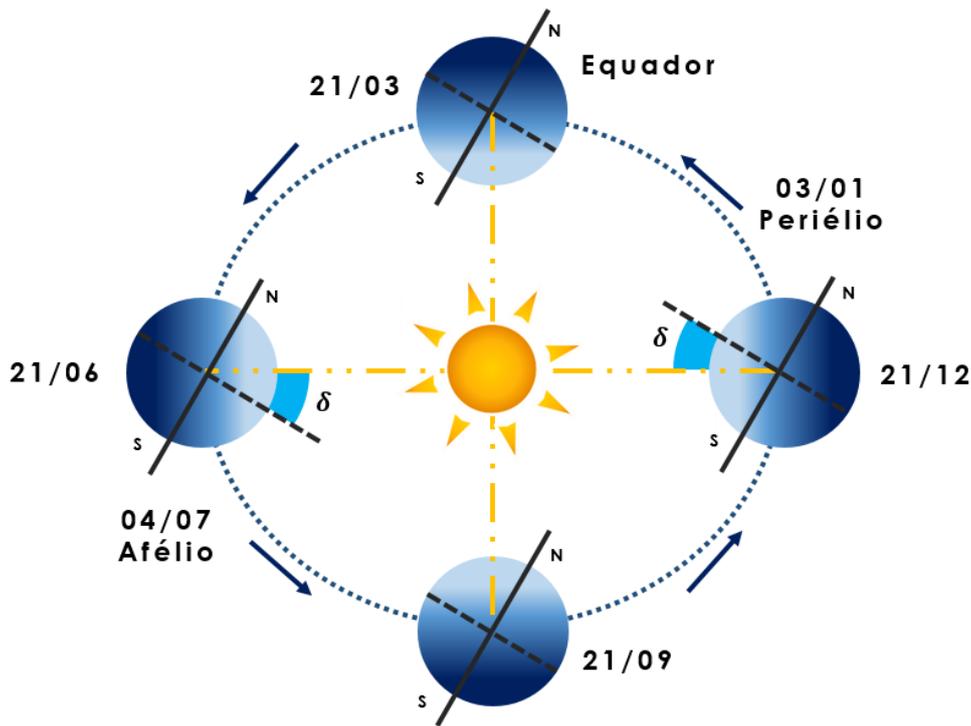
Figura 2.8 – Variação da Irradiância no topo da atmosfera com os dias do ano.



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

O movimento da Terra ao redor do Sol é conhecido como movimento de Translação e dá origem aos anos. Este movimento descreve uma órbita ligeiramente elíptica de distância média $r_0 = 1,496 \times 10^8$ Km cuja excentricidade é de aproximadamente 0,017. Pelo fato da órbita ser elíptica, o nosso planeta estará mais próximo do Sol no ponto da sua rota conhecido como Periélio (dia 3 de Janeiro) e mais distante no ponto chamado de Afélio (que acontece no dia 4 de Julho) conforme ilustrado na Figura 2.9 (PINHO; GALDINO, 2014; IQBAL, 1983).

Figura 2.9 – Movimento de Translação da Terra ao redor do Sol.



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

Para fins de cálculo, ter uma equação que modelasse este movimento de modo a se obter a distância Terra-Sol em qualquer dia do ano seria ideal. Desta forma, uma série de equações com as mais diversas complexidades foram desenvolvidas e encontram-se disponíveis na literatura. Neste trabalho, uma expressão simplificada de uma grandeza chamada de Fator de Correção da Excentricidade será utilizada. Ela é dada pela Equação 2.7 (IQBAL, 1983):

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos \left[\frac{2\pi d_n}{365} \right] \quad (2.7)$$

Onde:

E_0 : Fator de Correção da Excentricidade

r_0 : Distância Terra-Sol média (Km)

r : Distância Terra-Sol em um determinado dia d_n (Km)

d_n : Dia do ano no qual se deseja saber o valor da distância Terra-Sol. Ele deve ser contado de 1 a 365, como por exemplo, o dia 31/12 que é o 365° dia do ano.

Além do movimento de Translação, a Terra também apresenta o movimento de Rotação, aonde ela gira em torno de seu eixo dando origem aos dias. A inclinação que o eixo deste movimento de rotação da Terra faz com a normal do plano no qual seu movimento de Translação está contido é de 23,45° e se mantém inalterado ao longo do ano. Porém, a linha que interliga os centros da Terra e do Sol varia a cada instante entre + 23,45° (aonde ocorre o Solstício de Inverno no Hemisfério Sul) e - 23,45° (aonde ocorre o Solstício de Verão no Hemisfério Sul) e é chamada de Ângulo de Declinação δ . Este ângulo assume valor 0 nos equinócios de Outono e Primavera. Na Figura 2.10 é possível ver a sua representação. Expressões para calcular o valor de δ foram desenvolvidas por vários autores. Neste trabalho, a fórmula utilizada é a dada pela Equação 2.8 (PINHO; GALDINO, 2014; IQBAL, 1983):

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.8)$$

Onde:

δ : Declinação solar;

d_n : Dia do ano no qual se deseja saber o valor do Ângulo de Declinação. Ele deve ser contado de 1 a 365, como, por exemplo, o dia 31/12 que é o 365° dia do ano;

O movimento aparente do Sol para um observador na superfície terrestre também irá influenciar na intensidade da radiação solar que chega em um determinado ponto nesta superfície. Por isso, faz-se necessário definir algumas relações trigonométricas entre a posição aparente do Sol no céu e o plano que contém o ponto citado. As relações trigonométricas definidas a seguir estão representadas na Figura 2.10 (IQBAL, 1983; WALDEIR, 2010; PEREIRA, et al., 2014; PINHO; GALDINO, 2014):

A) Ângulo Solar de Altitude (α): Ângulo formado pelos raios solares e suas projeções no Horizonte Celestial do observador. Sua variação também é de 0° a 90° e é o ângulo complementar do Ângulo Zenital (θ_z), ou seja, $\alpha + \theta_z = 90^\circ$;

B) Ângulo Azimutal (ψ): Ângulo formado entre a projeção dos raios solares no Horizonte Celestial do Observador e o eixo que compreende o Norte e o Sul. Sua convenção é 0° no Norte indo para o Sul, aonde valores positivos deste ângulo são encontrados nos quadrantes no qual o Leste se faz presente. Sua variação é entre 0° e $\pm 180^\circ$;

C) Ângulo Horário (ω): Ângulo formado entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol medido em graus no Polo Celestial. Ele pode ser calculado através da equação 2.9;

$$\omega = (H_s - 12) \times 15^\circ \quad (2.9)$$

Onde:

ω : Ângulo Horário

H_s : Horário Local

D) Ângulo Zenital (θ_z): Ângulo formado pelos raios solares e a normal do observador na superfície terrestre aonde a medida é realizada. Sua variação pode ser de 0° a 90° . Ele pode ser calculado através da equação 2.10;

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos\varphi\cos\omega\cos\delta + \sin\varphi\sin\omega) \quad (2.10)$$

Onde:

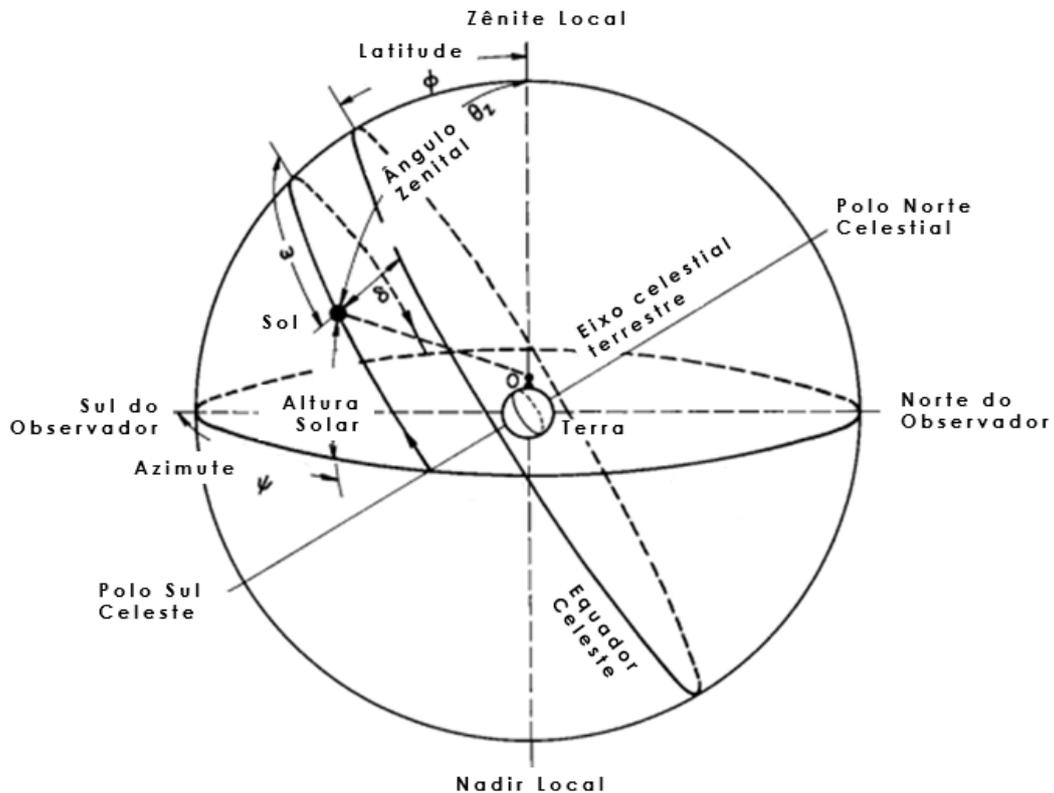
θ_z : Ângulo Zenital

φ : Latitude do Local

ω : Ângulo Horário

δ : Declinação Solar

Figura 2.10 – Esfera Celestial aonde estão representadas os ângulos trigonométricos válidos para o hemisfério norte.



Fonte: Adaptado de Iqbal (1983).

2.2.2.2. Irradiância no topo da atmosfera

O valor da irradiância solar global no topo da atmosfera pode ser calculada através da Equação 2.11 abaixo, que depende dos ângulos descritos anteriormente (IQBAL, 1983).

$$G_0 = G_{CS}E_0\left(\sin\delta \sin\varphi + \left(\frac{24}{\pi}\right)\sin\left(\frac{\pi}{24}\right)\cos\delta \cos\varphi \cos\omega_i\right) \quad (2.11)$$

Aonde

G_0 : Irradiância global no topo da atmosfera (W/m^2)

G_{CS} : Constante Solar = $1367 W/m^2$

E_0 : Fator de Correção da Excentricidade da Terra

δ : Ângulo de declinação solar

φ : Latitude do local para o qual o H_0 está sendo calculado

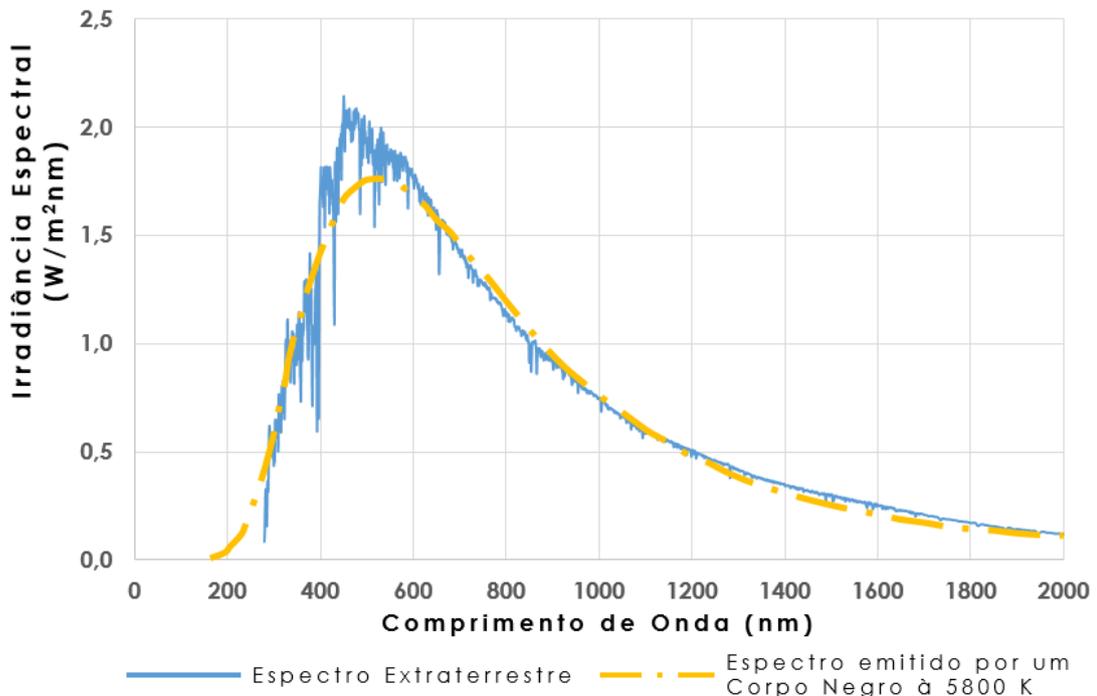
ω_i : Ângulo horário para o qual o G_0 está sendo calculado

2.2.3. O Sol como fonte de radiação

2.2.3.1. Espectro solar no topo da atmosfera

A fim de determinar o espectro solar dentro e fora da atmosfera, muitas pesquisas com os mais variados métodos foram realizadas. Medições em várias altitudes, acima da camada atmosférica e no solo foram feitas, além de medidas extra-atmosféricas realizadas em foguetes sondas. Com o intuito de criar um padrão que pudesse ser utilizado por várias áreas interessadas, a *American Society for Testing and Materials – ASTM* desenvolveu um espectro para as condições no topo da atmosfera terrestre com base em dados de satélites, aviões de altas altitudes, foguetes, telescópios e modelos matemáticos. Este espectro recebeu o nome de espectro solar padrão extraterrestre ou Irradiância Espectral Solar de Massa Ar Zero e é descrito na Norma ASTM E490-00a (ASTM, 2014). Na Figura 2.11 é possível ver um gráfico com tal espectro e a curva de emissão de um corpo negro a 5800 K para comparação.

Figura 2.11 – Espectro Extraterrestre no topo da atmosfera.



Fonte: Adaptado de Iqbal (1983).

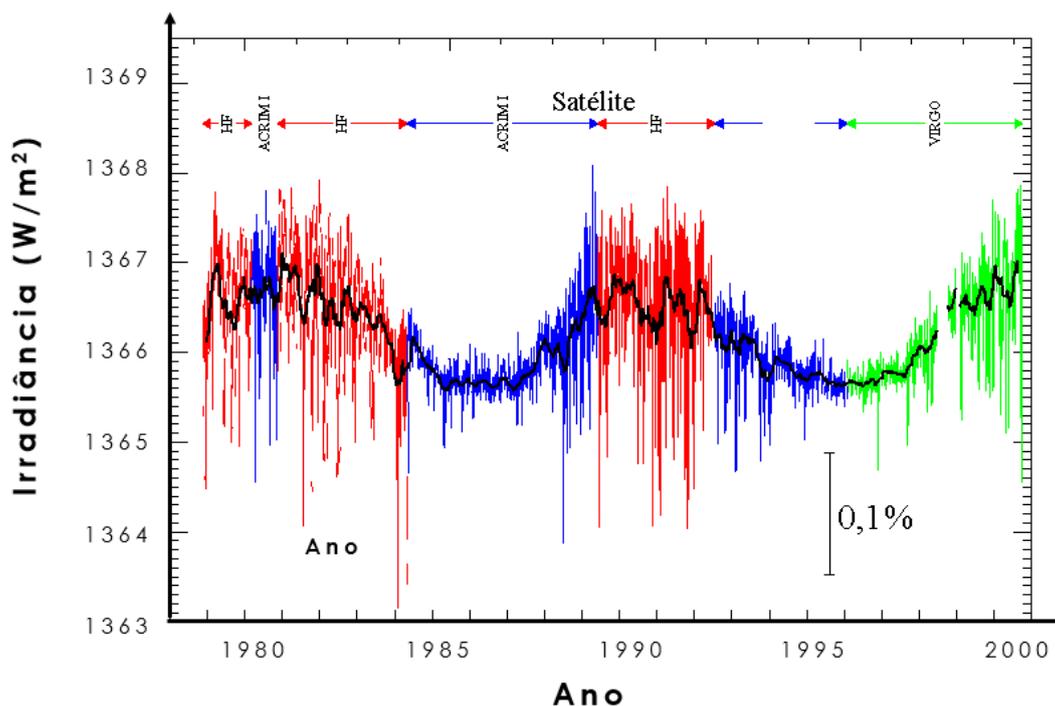
O espectro solar no topo da atmosfera terrestre consiste em 9% de radiação UV, 46% de radiação VIS e 46% de Infravermelho. Sendo que abaixo de 300 nm a energia associadas a estas ondas corresponde a somente 1,2 % da energia total do espectro solar, enquanto que acima de 2400 nm corresponde a 4% (WALDEIR, 2010; IQBAL, 1983).

2.2.3.2. A constante solar e suas variações

O espectro solar extraterrestre integrado ao longo de todos os comprimentos de onda dá o valor da grandeza conhecida como Irradiância Solar Extraterrestre Total (do inglês *Total Solar Irradiance* - TSI) (WALDEIR, 2010). Segundo Hathaway (2010) esta grandeza é definida como a energia radiante emitida pelo Sol em todos os comprimentos de onda que atravessam uma área de um metro quadrado por segundo fora da atmosfera terrestre. Devido as atividade solares, esta grandeza varia ao longo do tempo em um ciclo de 11 anos e, por isso, seu valor médio conhecido como Constante Solar é mais utilizado. A Constante Solar também é padronizada pela ASTM na Norma ASTM E490-00a com o valor de 1366,1 W/m², tendo sido obtida a partir da média de medições diárias realizadas com seis satélites diferentes entre os anos de 1978 e 1998 (ASTM, 2014).

A variação da Irradiância Solar Extraterrestre Total está relacionada à quantidade de manchas solares que aparecem na Fotosfera do Sol. Essa quantidade é variável e passa por períodos de máximos aonde o número de manchas é grande, e mínimos, nos quais a ocorrência é baixa. A variação periódica na quantidade de Manchas é conhecida como Ciclo das Manchas Solares (LIOU, 2002; HATHAWAY, 2010). Na Figura 2.12 é possível ver um gráfico da oscilação do valor de TSI medido por vários satélites com o passar dos anos.

Figura 2.12 – Variação da Constante Solar com o passar dos anos.

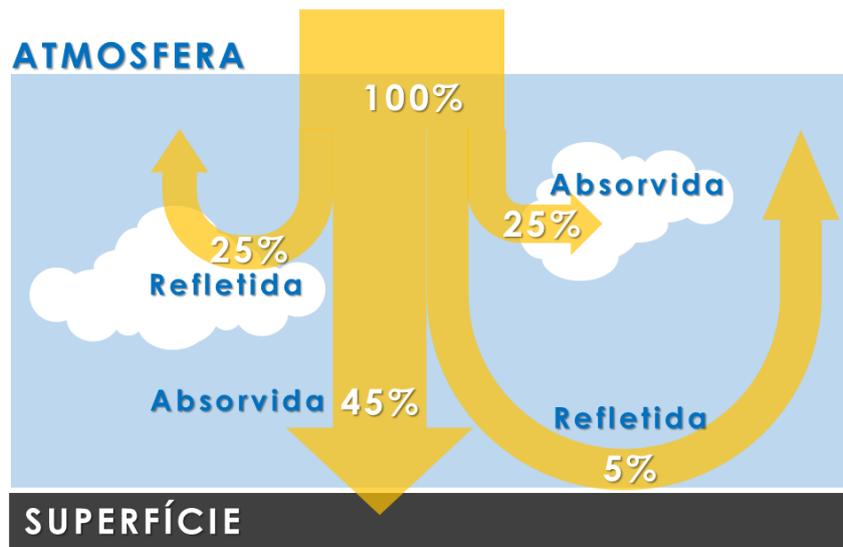


Fonte: UFRGS (2015)

2.3. EFEITOS ATMOSFÉRICOS SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar viaja grandes distâncias através do espaço e da atmosfera terrestre até atingir a superfície do planeta Terra. As variações que ela sofre fora da atmosfera são causadas basicamente pelas atividades solares e pelos movimentos terrestres. Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar passa a interagir com os vários componentes atmosféricos, tendo 30% de seu total refletido de volta para o espaço e os 70% restantes absorvido, transmitido ou espalhado. A Figura 2.13 traz um esquema simplificado das interações da radiação solar com o planeta Terra (PEREIRA, et al, 2006).

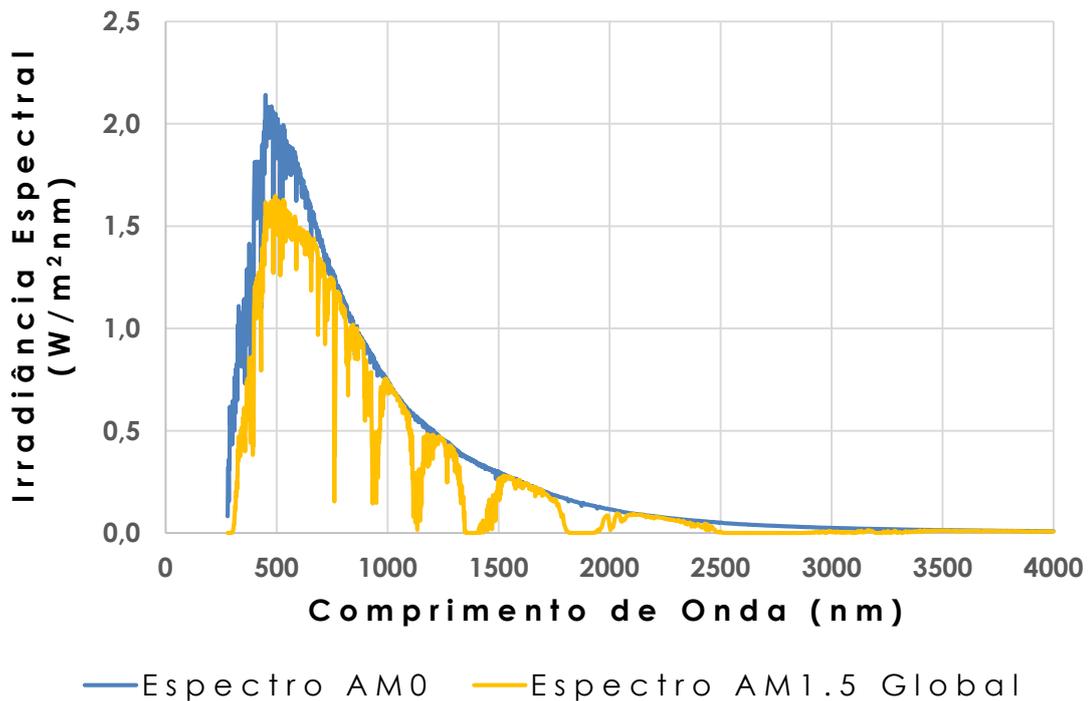
Figura 2.13 – Esquema simplificado com as interações entre as ondas eletromagnéticas provenientes do Sol e o planeta Terra.



Fonte: Pereira, et al. (2006).

O espectro extraterrestre apresenta diferenças significativas daquele encontrado da superfície terrestre. Isso acontece porque a atmosfera também exerce influência na distribuição espectral da radiação solar, que causa atenuações e distorções em seu formato. Na Figura 2.14 pode ser observado que a intensidade da Irradiância torna-se mais baixa em determinados intervalos espectrais. Estas mudanças são causadas pelo espalhamento e absorção por parte de alguns gases e particulados atmosféricos e a intensidade de seus efeitos varia com o tempo e a localização geográfica.

Figura 2.14 – Espectros AM0 e AM1.5G.



Fonte: Adaptado de ASTM (2012; 2014)

2.3.1. Constituintes Atmosféricos

A atmosfera terrestre é composta por vários gases e contém particulados sólidos e líquidos que ficam em suspensão no ar. Apesar de alguns desses elementos que compõem a atmosfera estarem em baixa fração de massa ou volume, eles acabam influenciando consideravelmente o espectro da radiação solar que chega à superfície terrestre.

2.3.1.1. Gases

Os gases que compõem a atmosfera podem ser divididos entre os que possuem uma concentração permanente e os que possuem concentrações variáveis. Os gases permanentes não apresentam variações significativas em suas concentrações e constituem 99% do volume da atmosfera. Eles estão listados na Tabela 2.4 com suas respectivas concentrações (LIOU, 2002).

Tabela 2.4 – Constituintes permanentes da Atmosfera.

Gás	Símbolo Químico	Proporção do Volume (%)
Nitrogênio	N ₂	78,084
Oxigênio	O ₂	20,948
Argônio	Ar	0,934
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,032
Neônio	Ne	18,18 x 10 ⁻⁴
Hélio	He	5,24 x 10 ⁻⁴
Criptônio	Kr	1,14 x 10 ⁻⁴
Xenônio	Xe	0,089 x 10 ⁻⁴
Hidrogênio	H ₂	0,5 x 10 ⁻⁴
Metano	CH ₄	1,7 x 10 ⁻⁴
Óxido Nitroso	N ₂ O	0,3 x 10 ⁻⁴
Monóxido de Carbono	CO	0,08 x 10 ⁻⁴

Fonte: Adaptado de Liou (2002).

Apesar de serem considerados como gases permanentes, o Dióxido de Carbono (CO₂), o Metano (CH₄) e o Óxido Nitroso (N₂O), são gases também gerados pela poluição humana e por isso suas concentrações tem crescido com o passar dos anos.

Já os gases variáveis encontram-se em proporções que variam de acordo com diversos fatores, como localização geográfica, altitude, estação do ano, clima, hora do dia, etc. As proporções destes gases são menores em comparação aos gases permanentes, porém seus efeitos no espectro solar podem ser mais significativos dependendo do gás (McCARTNEY, 1983). Na Tabela 2.5 encontra-se uma relação de gases variáveis presentes na atmosfera e suas respectivas proporções.

Tabela 2.5 – Constituintes variáveis da Atmosfera.

Gás	Símbolo Químico	Proporção do Volume (%)
Ozônio	O ₃	0-12 x 10 ⁻⁴
Vapor de Água	H ₂ O	0-0,04
Ácido Nítrico	HNO ₃	Traços
Amônia	NH ₃	0,004 x 10 ⁻⁴
Sulfato de Hidrogênio	H ₂ S	0,00005 x 10 ⁻⁴
Dióxido de Enxofre	SO ₂	0,001 x 10 ⁻⁴
Dióxido de Nitrogênio	NO ₂	0,001 x 10 ⁻⁴
Óxido Nítrico	NO	0,0005 x 10 ⁻⁴
Clorofluorcarbonos	(CFCl ₃ , CF ₂ Cl ₂ , CH ₃ CCl ₃ , CCl ₄ , etc.)	Traços

Fonte: Adaptado de Liou (2002)

2.3.1.2. Particulados

A atmosfera possui vários particulados em suspensão em meio a sua mistura de gases. Os particulados podem ser classificados em aerossóis, nuvens e hidrometeoros e apresentam uma distribuição totalmente variável ao longo do globo terrestre. Muitos deles exercem grande influência no balanço energético da atmosfera e no clima por aumentarem o espalhamento da radiação solar.

2.3.1.2.1. Aerossóis

Os aerossóis atmosféricos são particulados sólidos ou líquidos suspensos em meio aos gases atmosféricos cujo tamanho pode variar entre aproximadamente 10⁻³ μm e 20 μm. Eles se originam através de processos naturais ou atividades humanas. Na Tabela 2.6 seguem exemplos de aerossóis com diferentes origens e fontes com seus possíveis tempo de permanência na atmosfera. (LIOU, 2002; YAMASOE, 2006; IPCC, 2013).

Tabela 2.6 – Aerossóis atmosféricos.

Origem	Aerossol	Fonte	Tempo de Vida na Atmosfera
Lançado como partícula na Atmosfera	Poeira Mineral	Processo Natural	De 1 a 7 dias
	Maresia	Processo Natural	De 1 a 7 dias
	Fuligem	Atividades Humanas	De 7 a 10 dias
Nucleados a partir de gases presentes na Atmosfera	Sulfatos	Atividades Humanas	Aproximadamente 7 dias
	Nitratos	Atividades Humanas	Aproximadamente 7 dias
	Amônia	Atividades Humanas	De 7 a 10 dias*

Fonte: Adaptado de IPCC (2013) e Felix e Cardoso (2004).

Dentre as principais fontes naturais de aerossóis destacam-se os vulcões, a poeira levantada pelo vento, os incêndios naturais, maresia, etc. Já as fontes artificiais são a queima de combustíveis fósseis, processos industriais, queima de biomassa, etc. Com a inserção dos aerossóis na atmosfera, eles podem vir a ficar suspensos por até cerca de uma semana, tempo no qual podem vir a sofrer uma série de transformações químicas ou físicas. Por fim eles são retirados da atmosfera através de deposição seca (sedimentação e difusão) ou úmida (neve e chuva) (YAMASOE, 2006).

A concentração dos aerossóis varia de região para região por depender de suas fontes, do tempo de suspensão e das transformações que podem vir a sofrer. Os locais com as maiores ocorrências destes elementos são as regiões desérticas e urbanas por possuírem fontes emissoras intensamente ativas. Um fator que irá influenciar bastante não só na ocorrência de aerossóis, mas em seus tamanhos é o vapor de água. Este elemento possui a característica de condensar sobre outros particulados, aumentando-os (LIOU, 2002; YAMASOE, 2006; IQBAL, 1983).

2.3.1.2.2. Nuvens

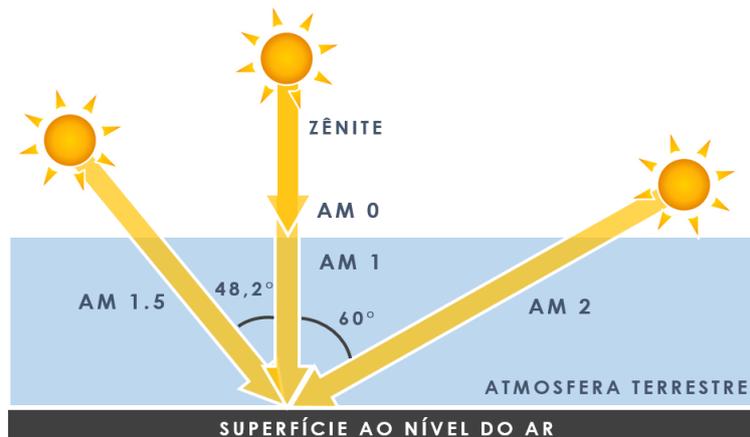
As nuvens são aglomerados de particulados de água, gelo ou uma mistura de ambos e cobrem mais de 50% da superfície terrestre em suspensão. Elas são muito importantes para a manutenção da temperatura ao redor do

globo por conta de suas interações com a radiação solar: elas refletem, absorvem e espalham a radiação de maneira muito significativa. Além disso, elas acabam distribuindo a água para várias regiões do planeta, auxiliando também na manutenção da vida em todo o globo (YAMASOE, 2006; IPCC, 2013). As nuvens podem ser classificadas de acordo com a altura na qual se encontra na atmosfera em nuvens altas (acima de 6 km do solo), médias (entre 2 e 6 km do solo) ou baixas (abaixo de 2 km do solo) ou ainda de acordo com seus formatos em Cirrus, Altocumulus, Altostratus, etc (LIOU, 2002).

2.3.2. Processos de interação radiação atmosfera

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. A absorção consiste na conversão de parte da energia solar em energia interna dos átomos/moléculas, podendo vir a transferi-la para seu redor como calor. Já o espalhamento tira as ondas de suas trajetórias iniciais, redistribuindo-a em várias direções. Estes dois fenômenos são causados pelos componentes atmosféricos e a maneira como vão ocorrer depende das características físicas dos elementos atmosféricos (como o tamanho das partículas, composição química, etc.) e a quantidade na qual se encontra na atmosfera (HORVARTH, 1993; YAMASOE, 2006). As intensidades destes processos irão depender da distância percorrida pela radiação na atmosfera, sendo que quanto maior for a distância percorrida, uma maior quantidade de interações irão ocorrer. Essa distância é denominada Massa Ar (AM) e varia com a latitude, hora do dia e dia do ano por conta de sua dependência com o ângulo zenital (MEAKIN; COUTTS, 1990; IQBAL, 1983). Na Figura 2.15 segue uma ilustração que mostra a variação de AM com o ângulo zenital.

Figura 2.15 – Variação da distância percorrida pela radiação na atmosfera terrestre de acordo com o ângulo zenital.



Fonte: Adaptado de Vilela (2010).

O valor de AM pode ser obtido através da relação matemática dada pela Equação 2.12. Esta relação não considera esfericidade do planeta Terra e assume que a atmosfera é totalmente homogênea e não refrativa. Devido a esses pressupostos, o seu erro é de 0,25% quando θ_z vale 60° e aumenta para 10% quando θ_z vale 85° . Deste modo, sua utilização fica restrita a valores mais baixos do ângulo zenital (IQBAL, 1983).

$$AM = 1/\cos\theta_z \quad (2.12)$$

Sendo:

AM : Massa de ar

θ_z : Ângulo Zenital

2.3.2.1. Espalhamento Atmosférico

O espalhamento é o fenômeno no qual as ondas eletromagnéticas são desviadas de suas trajetórias originais por gases, aerossóis ou nuvens para as mais diversas direções. Este processo pode acontecer uma única vez ou repetidas vezes e, de toda a radiação espalhada pela atmosfera, uma parte será enviada de volta ao espaço, outra atingirá o solo como Radiação Difusa e uma terceira parte será absorvida pelos gases da atmosfera. Basicamente existem dois modelos matemáticos que descrevem tal

processo físico: o tratamento de Rayleigh e o de Mie (IQBAL, 1983; YAMASOE, 2006).

2.3.2.1.1. Espalhamento Rayleigh

O Espalhamento Rayleigh, também conhecido como espalhamento molecular, ocorre devido à interação da radiação solar com partículas esféricas que possuem diâmetros menores que $0,2\lambda$ e que espalham independentemente umas das outras (IQBAL, 1983; YAMASOE, 2006). A intensidade espalhada da radiação pelas partículas do ar em uma direção específica de acordo com o modelo de Rayleigh pode ser expressa simbolicamente pela Equação 2.13. De acordo com ela, a intensidade da radiação espalhada depende do comprimento de onda λ , dependência esta que leva a maiores níveis de espalhamento dos menores comprimentos de onda da radiação (LIOU, 2002).

$$G_{\lambda} \sim 1/\lambda^4 \quad (2.13)$$

Sendo:

G_{λ} : Intensidade da radiação espalhada em uma determinada direção

λ : Comprimento de onda (nm)

2.3.2.1.2. Espalhamento Mie

O Espalhamento Mie possui basicamente duas diferenças com relação ao espalhamento Rayleigh. A primeira é que ele tem uma dependência com o valor do comprimento de onda muito mais fraca, espalhando todos os comprimentos de onda de maneira mais uniforme. Já a segunda diferença é que há uma predominância de se espalhar a radiação na mesma direção e sentido oposto ao da incidência da radiação (TRAGER, 2007).

O espalhamento Mie é característico dos aerossóis e das nuvens por possuírem tamanhos maiores que as moléculas dos gases. É devido a este efeito que as nuvens apresentam cores brancas (a não ser que estejam

muito carregadas de vapor d'água) e lugares com grande concentração de aerossóis apresentam um céu com um tom esbranquiçado. O espalhamento Mie é menos dependente do valor de λ , de modo que todas as cores do visível são espalhadas da mesma maneira.

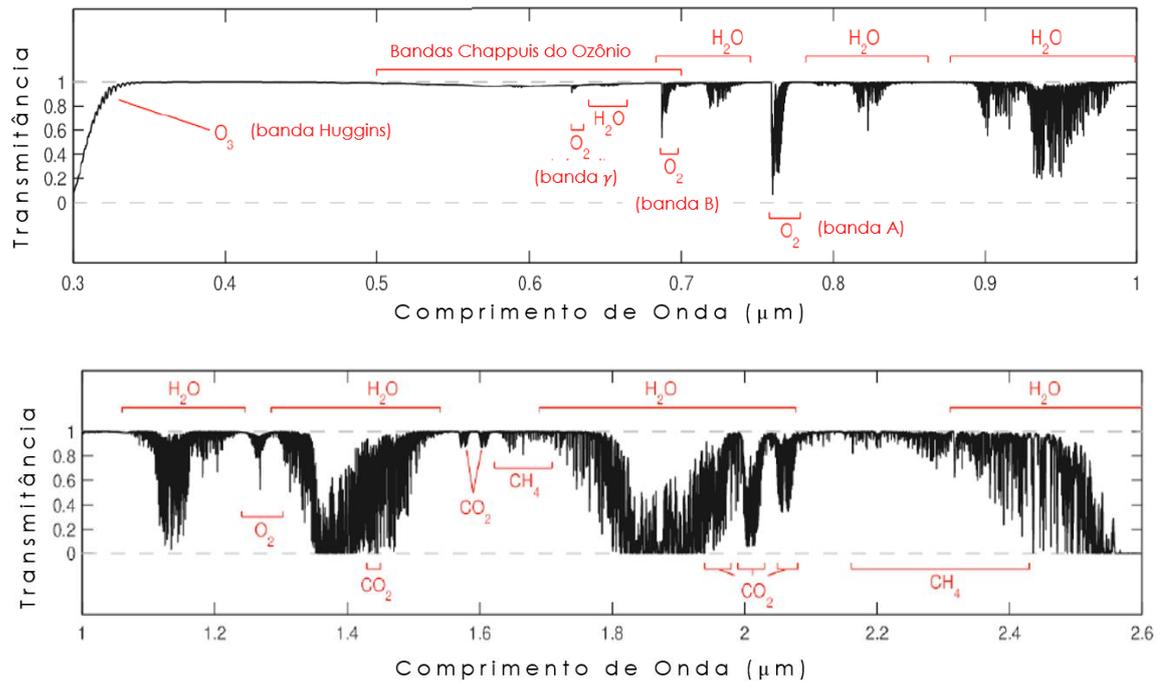
2.3.2.2. Absorção Atmosférica

Quando a radiação solar incide sobre as partículas da atmosfera, além do espalhamento, pode ocorrer a absorção da energia, que pode acontecer de modo contínuo (por exemplo, no caso dos aerossóis) ou de maneira discreta com absorção de certos comprimentos de onda (no caso dos gases) (IQBAL, 1983). Como exemplos de componentes da atmosfera que causam absorção da radiação podemos citar a Fuligem dentre os aerossóis e o Ozônio e o Oxigênio entre os gases.

2.3.2.2.1. Absorção pelos gases

A radiação eletromagnética somente será absorvida pelos gases se os fótons puderem ser utilizados para aumentar a sua energia interna, que é quantizada. Aumentar a energia interna significa que a molécula irá mudar um de seus estados eletrônicos, vibracionais ou rotacionais, passando de um nível mais baixo para um mais alto. Os fótons mais energéticos, como do Ultravioleta, provocam mudanças de estado eletrônico e os fótons do Infravermelho Próximo provocam mudança de estado vibracional e do Infravermelho Distante para a mudança de estado rotacional. Na região do visível, podem vir a ocorrer absorções, mas estas são pequenas (JACOB, 1999). Os gases que apresentam absorção na região espectral importante para a geração de energia fotovoltaica são o Oxigênio, Ozônio, Vapor de água e Dióxido de Carbono. A Figura 2.16 traz um gráfico com a transmitância atmosférica aonde são indicadas as linhas de absorção destes gases.

Figura 2.16 – Transmissão da mistura de gases que compõem a atmosfera.



Fonte: Adaptado de Noll (2014).

A) Absorção pelo Oxigênio: O Oxigênio (O₂) possui várias bandas de absorção ao longo da distribuição espectral da radiação solar. A mais importante delas se encontram na região do UV, que é responsável por bloquear toda radiação que chega à Terra com comprimentos de onda abaixo de 200 nm (LIOU, 2002; IQBAL, 1983).

No visível e no Infravermelho Próximo, o O₂ apresenta as seguintes bandas de absorção: banda γ que é situada no visível e centrada em 628 nm; banda B que é situada também no VIS e centrada em 688 nm; e banda A que é situada no Infravermelho próximo e centrada em 762 nm. Por estarem na parte mais intensa do espectro solar, seus efeitos podem ser facilmente percebidos (LIOU, 2002).

B) Absorção pelo Ozônio: O Ozônio (O₃) apresenta seis bandas de absorção: duas no UV, uma no VIS e IVP e três no IVD. Na região do Ultravioleta encontram-se as Bandas de Hartley, que vai de 200 a 300 nm, e de Muggins, que está entre 300 e 360 nm. A primeira é mais intensa que a segunda e é a responsável por proteger a Terra das radiações como o

UV-C e UV-B. No visível encontra-se a Banda de Chappuis que se estende desde 450 nm até 770 nm, cujo nível de absorção não é elevado. Já no IVD o O₃ absorve em regiões centradas em 4750 nm, 9600 nm e 14200 nm (LIOU, 2002, IQBAL, 1983, McCARTNEY, 1983).

C) Absorção pelo Vapor de Água: O vapor de água apresenta absorção em regiões desde o Visível até o Infravermelho Distante. No VIS e no IVP há bandas de absorção mais fracas, que ficam centradas em 720 nm e 820 nm, e mais significativas, como as centradas em 940 nm, 1100 nm, 1380 nm e 1870 nm. O vapor de água também apresenta absorção menos significativas em 2700 nm, 3200 nm e 6250 nm. (LIOU, 2002).

D) Absorção pelo Dióxido de Carbono: A absorção pelo Dióxido de Carbono (CO₂) vem recebendo muita atenção nas últimas décadas pelo fato de ser o gás mais produzido pela poluição ambiental e considerado o principal gás do efeito estufa. Suas bandas de absorção mais significativas se encontram no Infravermelho, sendo elas centradas em: 1400 nm, 1600 nm, 2000 nm, 2700 nm, 4300 nm e 15000 nm (LIOU, 2002; McCLARTNEY, 1983).

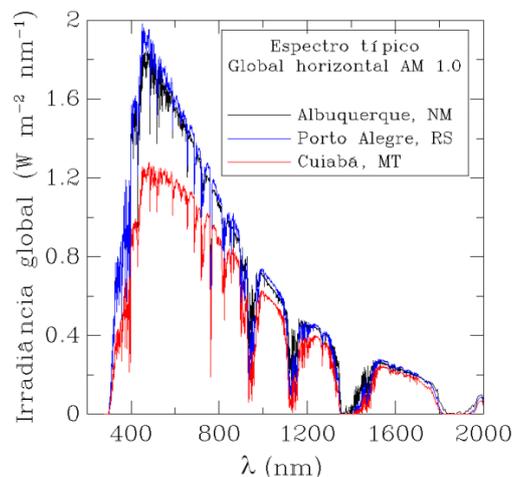
2.3.2.2.2. Absorção pelos aerossóis

Alguns aerossóis também são capazes de absorver a radiação eletromagnética incidente. Os maiores contribuintes para esta absorção são a Fuligem e a Poeira Mineral. A fonte do primeiro está relacionada ao processo de combustão fruto principalmente de atividades humanas, enquanto que o segundo é produzido pelos ventos. (MOOSMÜLLER, et al, 2009; HORVATH, 1993).

Embora os aerossóis que possuem a capacidade de absorver a radiação solar representem uma pequena parcela de todos os aerossóis atmosféricos, eles apresentam uma capacidade muito maior de absorver energia que os outros componentes da atmosfera. Deste modo, em regiões com elevadas concentrações destes elementos, a visibilidade é reduzida assim como a intensidade da radiação solar incidente. (HORVATH, 1993).

Este espectro padrão foi validado através de comparações com espectros levantados através de outro modelo de transferência radiativa, o MODTRAN – *Moderate Resolution Atmospheric Transmission* na versão 4.0 e medidos sob condições de céu limpo na cidade de Golden, EUA. Apesar de estar de acordo com o modelo citado e apresentar pequenas variações para espectros coletados nos Estados Unidos da América, o padrão proposto pela ASTM apresenta limitações quanto à sua aplicabilidade em regiões do mundo nas quais as condições atmosféricas diferem daquelas nas quais ele foi estabelecido. Isso ocorre porque os gases classificados como variáveis e os aerossóis presentes na atmosfera variam de acordo com a localidade, dia e época do ano. Como alguns deles apresentam significativa influência no espectro solar na superfície terrestre (como por exemplo a água) é de se esperar que o espectro gerado para a América do Norte não valha para regiões na América do Sul. Apesar disso, várias entidades da área da energia fotovoltaica continuam utilizando o padrão americano ao redor do globo, podendo levar a erros e falhas em seus projetos e pesquisas. Para ilustrar essa variação, Haag (2010) calculou através do SMARTS2 alguns espectros para as cidades de Albuquerque (Novo México, EUA), Porto Alegre (Rio Grande do Sul, Brasil) e Cuiabá (Mato Grosso, Brasil) utilizando AM = 1. A comparação entre os espectros segue na Figura 2.18 abaixo e como se pode observar, todos os três se diferem devido às atmosferas que são diferentes.

Figura 2.18 – Distribuição espectral da radiação solar global para AM=1 em Albuquerque (USA), Porto Alegre e Cuiabá.

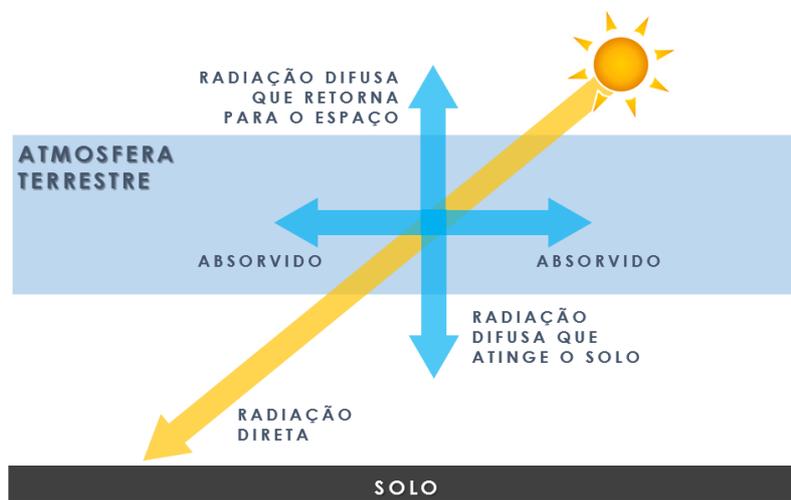


Fonte: Haag (2010)

2.3.3.2. Componentes da radiação solar na superfície terrestre

Uma das consequências do espalhamento sofrido pela radiação solar é a separação da radiação em duas componentes diferentes: a radiação direta e a difusa, que somadas resultam na radiação global. A primeira é composta pelo conjunto de ondas eletromagnéticas que não foram desviadas de sua trajetória original e em dias ensolarados sua participação na radiação global é superior à difusa. Na Figura 2.19 há um esquema que ilustra esta separação da radiação solar. (VILELA, 2010; PINHO; GALDINO, 2014).

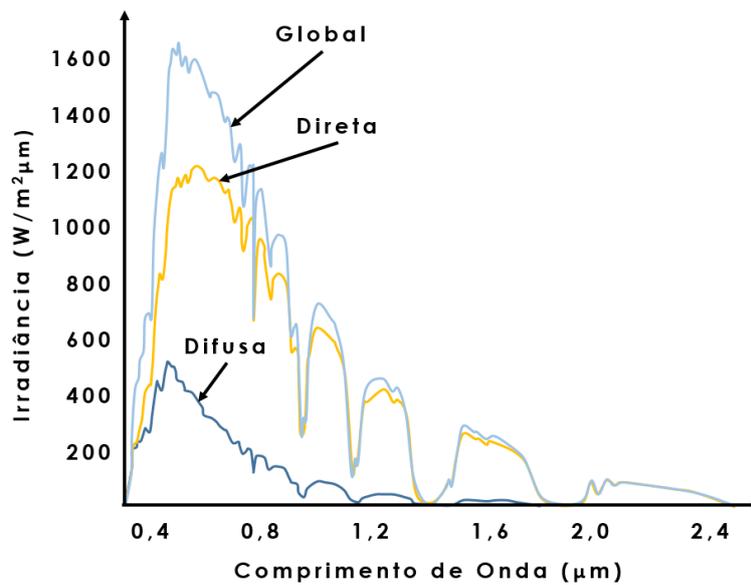
Figura 2.19 – Separação da radiação solar nas suas duas componentes: a radiação direta e difusa.



Fonte: Adaptado de Iqbal (1983).

A radiação difusa é composta pelas ondas que sofreram difusão na atmosfera como resultado dos processos de espalhamento Rayleigh e Mie e por isso incidem sobre a superfície terrestre vinda de todas as direções. A Figura 2.20 mostra as distribuições espectrais da radiação global e difusa e, conforme pode ser visto, a intensidade espectral da difusa tende a ser maior para os menores comprimentos de onda pelo fato de os espalhamentos serem mais eficientes para estes casos e sua participação na Radiação Global tende a ser maior em dias nublados por conta das nuvens.

Figura 2.20 – Distribuição espectral das componentes da radiação solar.



Fonte: Adaptado de Meakin e Coutts (1990).

2.3.4. Variações espectrais relevantes para a geração fotovoltaica

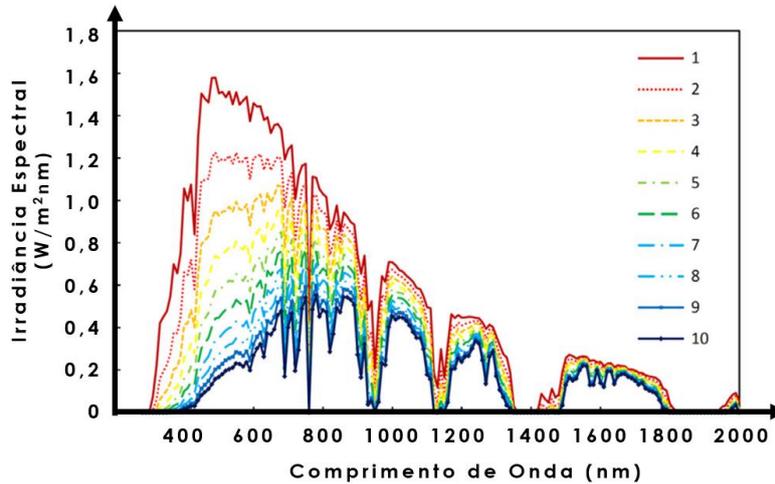
De todas as influências que o espectro solar pode sofrer, as mais significativas em aplicações fotovoltaicas são as causadas pelas nuvens, aerossóis, vapor de água e em alguns casos o CO₂. Isto porque eles têm maior absorção em certos comprimentos de onda que correspondem às partes do espectro solar aonde se situam as respostas espectrais de todas as tecnologias fotovoltaicas disponíveis. Esses componentes atmosféricos apresentam grande variabilidade no tempo e de uma localidade para outra, causando impactos diferentes no processo de geração elétrica dependendo de sua localização (MEAKIN; COUTTS, 1990). O efeito causado pelos elementos citados podem ser medidos através da massa ar, profundidade óptica dos aerossóis, água precipitável e índice de limpidez (FERNANDEZ, et al, 2014).

2.3.4.1. Caminho na atmosfera

Conforme explicado anteriormente, o caminho percorrido na atmosfera irá influenciar na quantidade de interações que a radiação irá sofrer com os gases e aerossóis. Por conta disso, atenuações como mostradas Figura 2.21 irão ocorrer. Nessa figura é possível ver espectros simulados com

seus valores de AM variando entre 1 e 10. Nota-se que a diminuição de intensidade ocorre ao longo de todo o espectro, sendo que os menores comprimentos de onda sofrem uma maior redução devido aos efeitos do espalhamento Rayleigh.

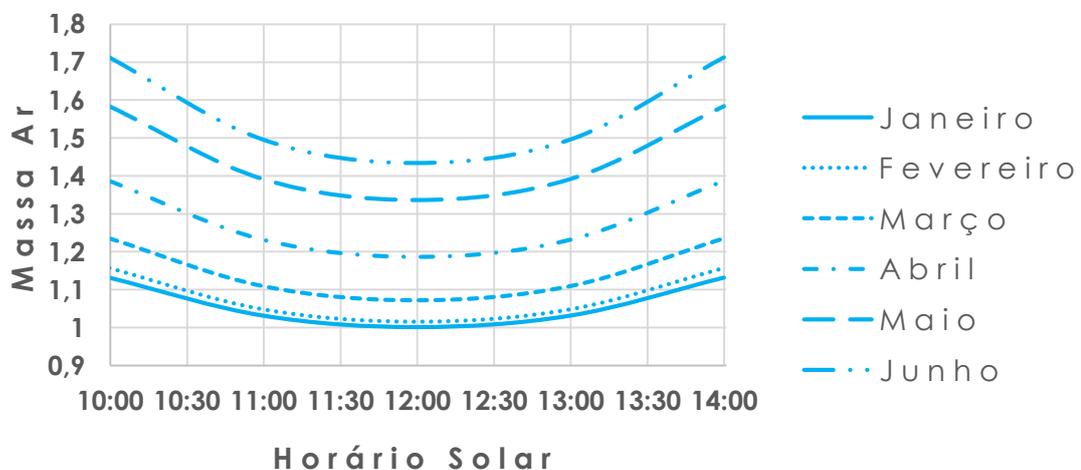
Figura 2.21 – Efeito da Massa de Ar no Espectro Solar.



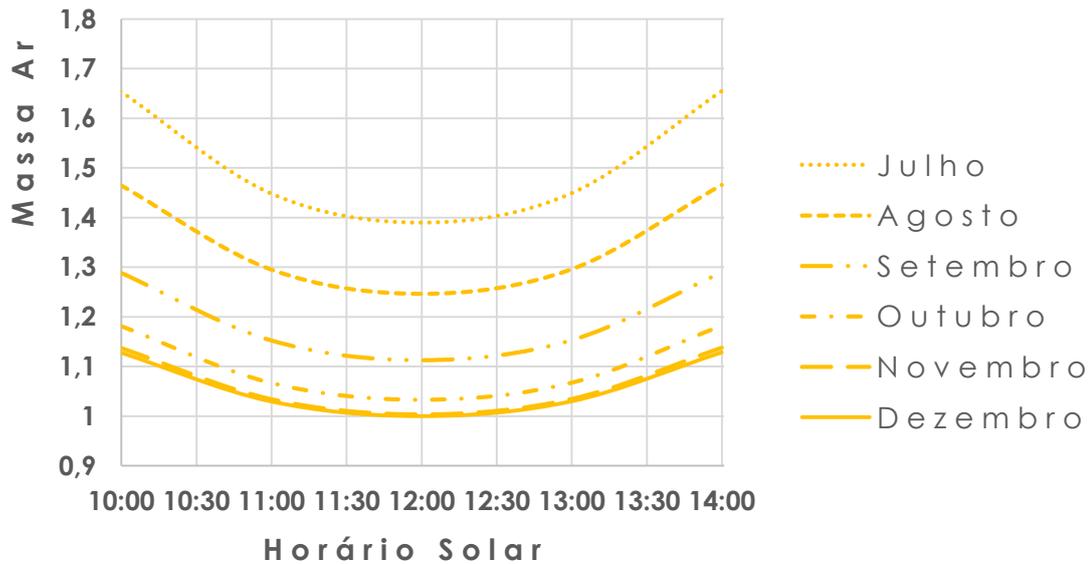
Fonte: Adaptado de Fernandez, et al. (2014).

Para conhecer como que este parâmetro varia ao longo do tempo, a equação 2.10 foi utilizada para calcular os valores de massa de ar para Cachoeira Paulista – SP em todos os dias do ano entre os horários das 10:00 e 14:00 horas. O valor da Massa Ar médio de cada mês para os horários citados seguem na Figura 2.22 – (a) para os meses entre janeiro e junho e na Figura 2.22 – (b) para os meses entre julho e dezembro.

Figura 2.22 – Variação da Massa de Ar entre os horários das 10:00 e 14:00 para os meses de janeiro a junho em (A) e de julho a dezembro em (B).



(A)



(B)

Fonte: Produção do autor.

2.3.4.2. Índice de Limpidez

Devido ao fato dos parâmetros atmosféricos variarem ao longo do tempo e no espaço, a intensidade da radiação solar que chega à superfície terrestre irá variar também em espectro e intensidade. Por isso, para estimar o percentual atenuado pela presença de nuvens, poluição, poeira, etc., o Índice de Limpidez ou Claridade (K_t) é utilizado (MARQUES, et al, 2000; SILVA, 2011). Ele é definido pela Equação 2.14 e indica a limpidez da atmosfera para a situação na qual é calculado (IQBAL, 1983).

$$K_t = \frac{G_T}{G_0} \quad (2.14)$$

Onde:

K_t = Índice de Limpidez

G_T = Irradiância na superfície terrestre (W/m^2). Este valor pode ser estimado ou medido.

G_0 = Irradiância no topo da atmosfera (W/m^2). Este valor é calculado de acordo com a fórmula 2.11.

O Índice de Limpeza também é bastante utilizado para determinar uma indicação do grau de nebulosidade do dia em determinado local, aonde seus valores mostram o tipo de cobertura de céu. Segundo Ricieri (1998) citado por Silva (2011), para a cidade de Botucatu – SP os valores de K_t menores que 0,3 indicam que o céu se encontra nublado, entre 0,3 e 0,65 indicam que o céu se encontra parcialmente nublado e maiores que 0,65 indicam que o céu se encontra limpo. Tendo em vista esta avaliação, o K_t , pode ser utilizado para indicar os efeitos provocados pelas nuvens no espectro eletromagnético, sendo que quanto menor for seu valor, maiores níveis de espalhamento da radiação irão ocorrer.

2.3.4.3. Índice de Água Precipitável

O vapor de água pode afetar significativamente o espectro em suas bandas de absorção (situadas em 720 nm, 820 nm, 940 nm, 1100 nm, 1380 nm e 1870 nm). A quantidade deste componente presente na atmosfera pode ser obtida através do Índice de Água Precipitável w dada pela Equação 2.15 abaixo (IQBAL, 1983):

$$w = \frac{1}{g} \int_0^{\infty} R_M dz \quad (2.15)$$

Onde:

w = Índice de Água Precipitável (μm)

g = Gravidade (m/s^2)

R_M = Razão de Mistura (ppm)

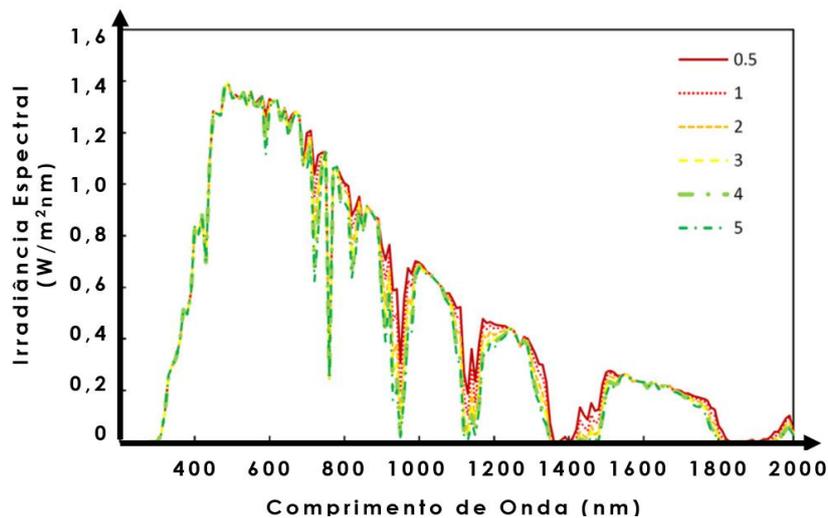
dz = Elemento Infinitesimal da Altura

A Razão de Mistura (R_M) corresponde à razão entre a massa de vapor de água e a massa total de gás seco presente em um metro cúbico. Assim:

$$R_M = \frac{\text{Massa de Vapor de Água}}{\text{Massa de Ar Seco}}$$

As consequências da variação de w entre os valores de 0,5 e 5 na distribuição da radiação solar segue na Figura 2.23. Conforme pode-se observar, o aumento no valor de w leva a uma maior extinção na região do Infravermelho nas bandas de absorção da água.

Figura 2.23 – Influência da quantidade de vapor de água atmosférico no formato do espectro solar.

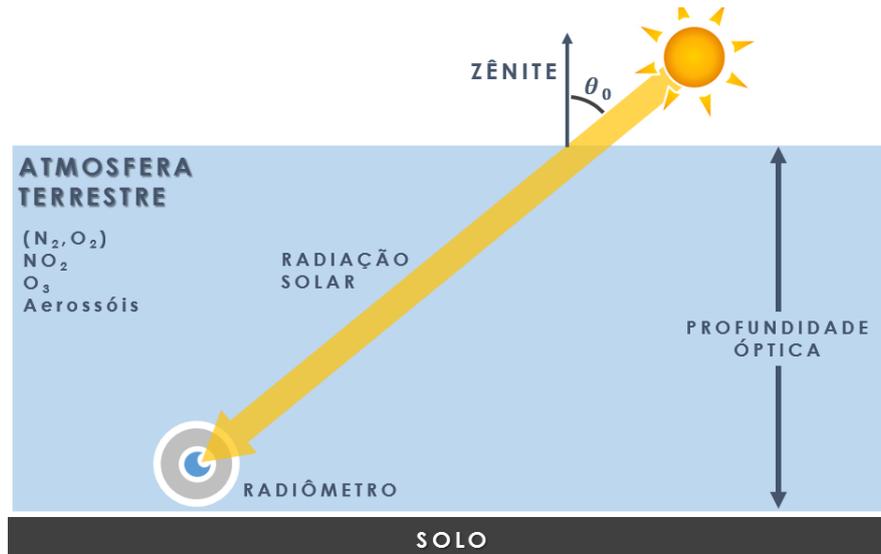


Fonte: Adaptado de Fernandez, et al. (2014).

2.3.4.4. Profundidade Óptica dos Aerossóis

Os aerossóis, assim como os gases, conseguem absorver e espalhar as ondas eletromagnéticas incidentes. Quando uma região da atmosfera se encontra com elevadas concentrações destes elementos, é dito que ela está turbida e a radiação é atenuada consideravelmente. Esta propriedade é chamada de Turbidez Atmosférica e pode ser medida através da Profundidade Óptica dos Aerossóis - POA. Este valor é adimensional e é proporcional à concentração de aerossóis presentes em uma coluna atmosférica vertical que se estende acima do local de medida conforme ilustrado pela Figura 2.24 (IQBAL, 1983; LIOU, 2002; SAYÃO, 2008).

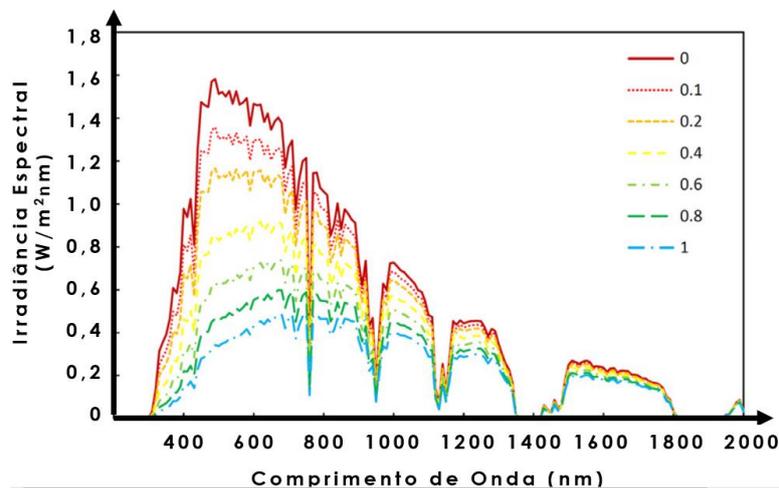
Figura 2.24 – Profundidade Óptica dos Aerossóis.



Fonte: Adaptado de Liou (2002)

O efeito causado no espectro solar pela quantidade de aerossóis na atmosfera segue na Figura 2.25 aonde o aumento no valor do POA representa uma queda na intensidade da radiação, principalmente para os menores comprimentos de onda.

Figura 2.25 – Efeito do POA no espectro solar na superfície terrestre.



Fonte: Adaptado de Fernandez, et al. (2014).

2.3.5. Caracterização do espectro solar

O espectro solar é representado por uma curva da irradiância espectral para cada valor de comprimento de onda. Considerando que a atmosfera

influência de várias maneiras no espectro da radiação solar que chega na superfície terrestre, estudos que visem avaliar o espectro e suas variações apresentam dificuldades de serem realizados devido a dois motivos:

- a) Dados espectrais normalmente são gráficos com uma grande quantidade de pontos. Deste modo, quão mais preciso for o processo de medição e quão maior for o comprimento da faixa de leitura do espectrômetro, maior será a quantidade de pontos, exigindo grande capacidade de processamento;
- b) Como as condições ambientais variam constantemente, uma grande massa de dados espectrais se fazem necessários para estudos mais completos. Fato que pode dificultar o processo de análise de dados, além de também exigir uma grande capacidade de processamento;

Assim, seria de grande utilidade caracterizar o espectro através de um único valor numérico, facilitando o estudo de suas variações. Além disso, comparações com outros parâmetros também representados por valores unitários (como o Índice de Limpeza, o Índice de Água Precipitável, Temperatura, entre outros que trazem muitas informações a respeito da atmosfera) seriam fáceis de serem realizados.

Tendo em vista os problemas citados, Jardine (2012) propôs uma alternativa para a caracterização do espectro: o chamado Energia Média dos Fótons ou APE (*Average Photon Energy*). A Energia Média dos Fótons representa através de um único valor a energia média dos fótons de todo um espectro solar e pode ser obtida através da Equação 2.16. Valores mais altos de APE indicam uma maior concentração de fótons mais energéticos, típicos das regiões do UV e VIS, ao passo que valores mais baixos de APE indicam maiores concentrações de fótons menos energéticos, encontrados em regiões do IVP. Deste modo, diz-se que quando um espectro apresenta menores valores de APE ele tem a coloração vermelha, por ser mais rico em fótons na região do Infravermelho. No caso de elevado valor de APE, diz-se que o espectro apresenta uma coloração azulada.

$$APE = \frac{\int_a^b G(\lambda)d\lambda}{\int_a^b \Phi(\lambda)d\lambda} \quad (2.16)$$

Sendo

APE : Energia média dos fótons (eV);

$G(\lambda)$: Irradiância Espectral (W/m²nm)

$\Phi(\lambda)$: Fluxo de Fótons Espectral (m⁻²nm⁻¹s⁻¹)

a e b : Intervalo de Integração (nm)

Conforme pode ser observado na Equação 2.16, o APE depende, além dos valores do Fluxo de Fótons e da Irradiância Espectral, do intervalo de integração de ambas as grandezas. Este intervalo corresponde à faixa de leitura do espectrômetro utilizado e, dependendo de seus valores, pode levar a diferentes valores de APE. Por exemplo, na Tabela 2.7 são apresentados alguns intervalos de comprimento de onda com valores da Energia Média dos Fótons para o espectro AM 1.5G (BETTS, 2004). A comparação de valores de APE para diferentes espectros só é possível de ser realizada quando os dois consideram a mesma faixa espectral. De acordo com Betts (2004), a melhor definição para o APE seria a utilização do espectro terrestre completo, indo de 300 a 4000 nm, porém espectrômetros que medem esta faixa tão longa são muito caros e, por conta disso, tais medidas são raramente efetuadas.

Tabela 2.7 – Valor da Energia Média dos Fótons para o Espectro Padrão AM1.5G para diferentes faixas espectrais.

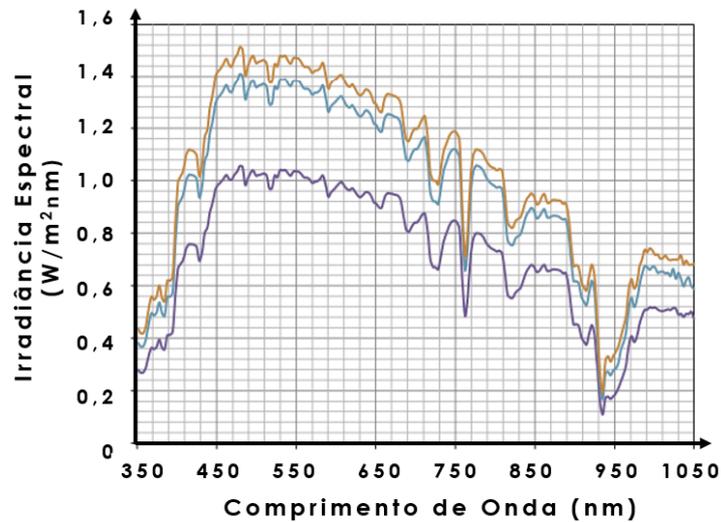
Faixa Espectral (nm)	Energia Média dos Fótons (eV)
300 – 4000	1,43
300 – 2500	1,48
300 – 1700	1,62
300 – 1100	1,86

Fonte: Betts (2004)

Outra característica deste parâmetro é o fato de ele trazer informações a respeito do formato do espectro como ilustrado pelas Figuras 2.26 e 2.27.

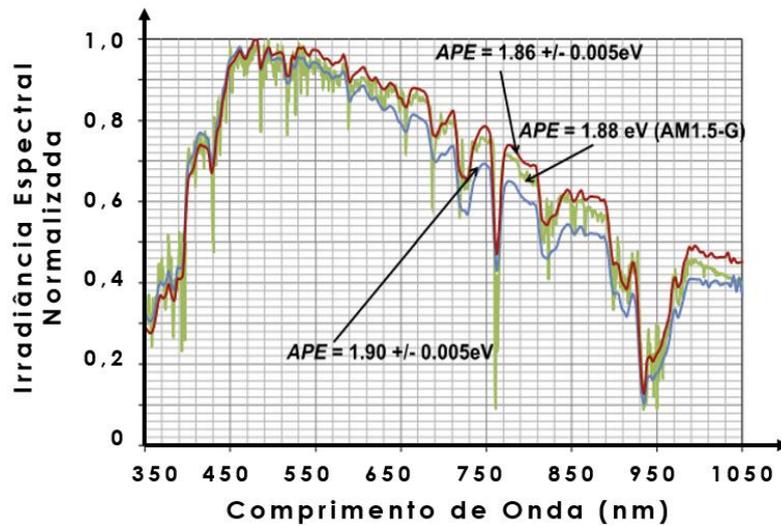
Na Figuras 2.26 observa-se três curvas espectrais com diferentes intensidades de Irradiância, porém com os mesmo valores de APE. Já na Figura 2.27 é possível observar três curvas normalizadas onde o espectro com menor valor de APE apresenta um formato com uma intensidade maior no infravermelho do que os espectros com maiores valores de APE.

Figura 2.26 – Curvas espectrais com diferentes intensidades e mesmo formato e APE.



Fonte: Nofuentes, et al. (2014)

Figura 2.27 – Curvas espectrais normalizadas diferentes valores de APE.



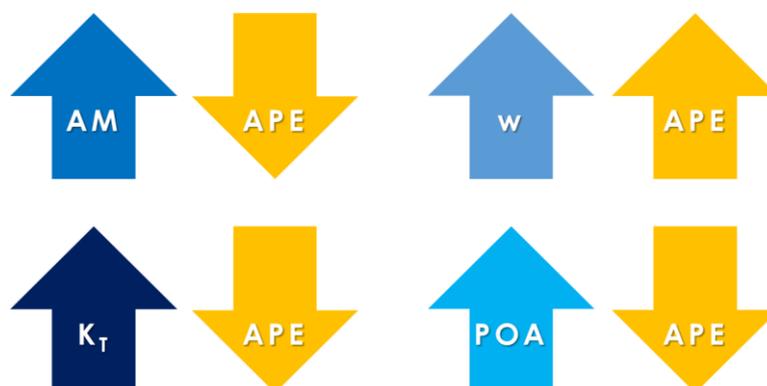
Fonte: Nofuentes, et al. (2014)

2.3.5.1. Influência dos parâmetros atmosféricos no valor do APE

De maneira geral, qualquer processo que venha a diminuir as regiões do Infravermelho tende a aumentar o valor do APE, ao passo que processos que diminuam a região do Ultravioleta ou Visível diminuem esse valor. O vapor d'água, além de contribuir para o espalhamento Rayleigh, apresenta faixas de absorção no IVP e por absorver os fótons de menor energia, acaba elevando a energia média do espectro. O mesmo acontece com as nuvens, que absorvem partes do Infravermelho e atenuam consideravelmente a intensidade da radiação. Esta atenuação é resultado do espalhamento Mie e ocorre de maneira mais homogênea ao longo do espectro, possuindo um efeito menor na variação do APE quando comparado com o outro tipo de espalhamento.

No caso dos aerossóis e os gases atmosféricos, eles atuam como centros de espalhamento da radiação sob o regime de Rayleigh ou Mie, atenuando os intervalos mais energéticos do espectro eletromagnético. Por isso, possuem o efeito de diminuir o valor do APE, de modo que, quão maior for o caminho percorrido na atmosfera pela radiação, menor será o valor da energia média dos fótons. Na Figura 2.28 segue um esquema que ilustra a variação do APE de acordo com o aumento nos valores de AM, K_T , w e POA.

Figura 2.28 – Variação do APE com as grandezas AM, K_T , w e POA.

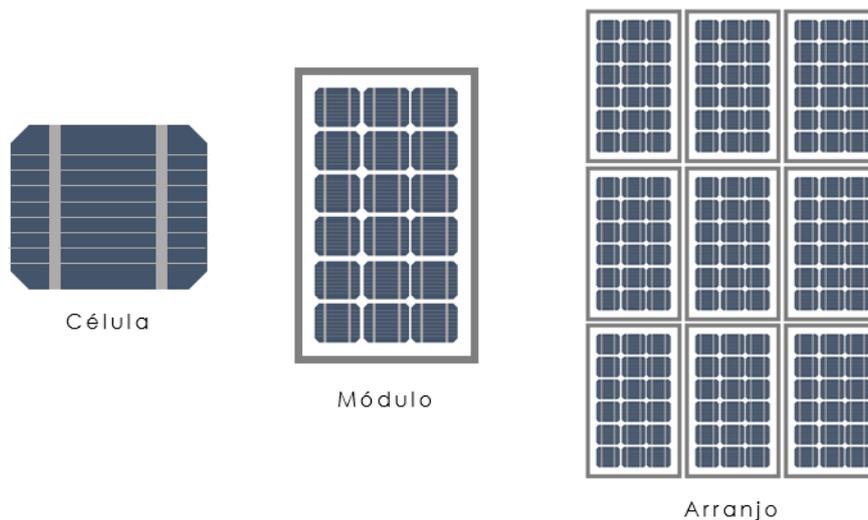


Fonte: Produção do Autor.

2.4. ENERGIA FOTOVOLTAICA

A geração elétrica fotovoltaica consiste na conversão direta da energia solar em eletricidade. Ela se dá através do efeito fotovoltaico em dispositivos eletrônicos denominados células solares (LUQUE; HEGEDUS, 2002; PINHO; GALDINO, 2014). Para que maiores potências possam ser obtidas, as células são associadas eletricamente umas às outras de modo a se obter módulos fotovoltaicos. Essas associações podem ser em série ou paralelo e são realizadas através de processos de soldagens. A tensão, corrente e a potência produzidas pelo módulo vão depender da quantidade de células e da quantidade de cada tipo de ligação. Após a soldagem, o conjunto é encapsulado para garantir sua proteção contra as ações do meio ambiente, além de receber resistência mecânica. Os módulos, por sua vez, também podem ser combinados em arranjos. A Figura 2.29 ilustra um esquema de tais combinações. Os sistemas de geração elétrica utilizam vários dispositivos como conversores, transformadores, sistemas de controle, entre outros, e podem ou não serem ligados diretamente à rede elétrica de distribuição pública (IEA, 2014; Pinho e Galdino, 2014; MIT, 2015)

Figura 2.29 – Configurações dos dispositivos fotovoltaicos.



Fonte: Produção do Autor.

As vantagens e desvantagens para utilização da energia solar fotovoltaica são descritas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Vantagens e desvantagens apresentadas pelos dispositivos fotovoltaicos.

Vantagens	Desvantagens
Geração sem a emissão de poluentes	Elevados custos
Geração sem a criação de ambiente nocivo ao ser humano	Geração intermitente
Fonte inesgotável de energia	Manipulação de elementos tóxicos durante fabricação das células
Possibilidade de utilização em sistemas com várias escalas de potência	
Possibilidade de geração descentralizada	

Fonte: Adaptado de Luque e Hegedus (2002).

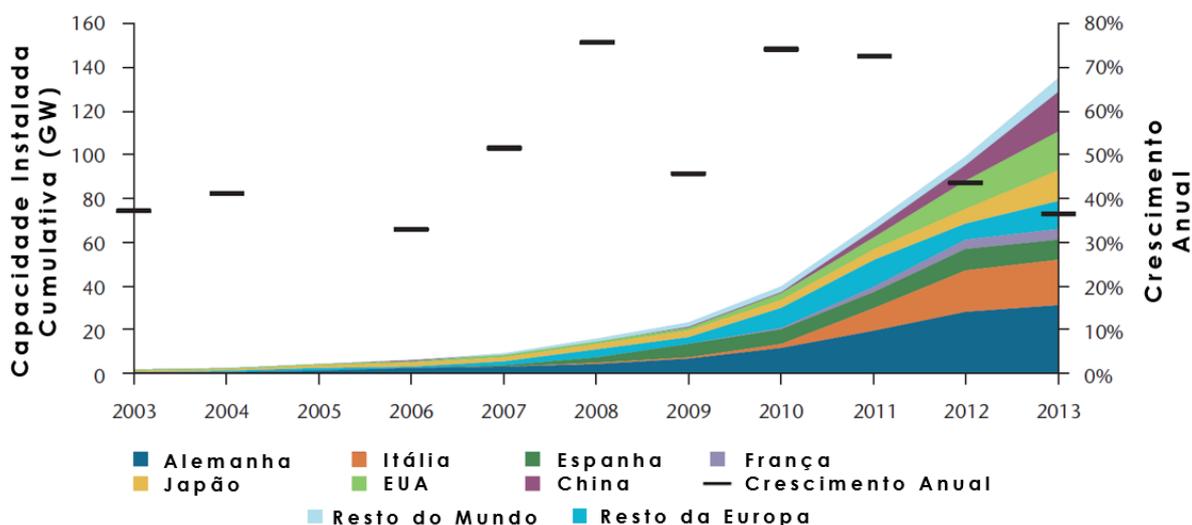
As vantagens deste tipo de geração energética somadas à necessidade de tornar suas matrizes mais sustentáveis levou a geração fotovoltaica a começar a ter papéis significativos na matriz energética de alguns países. Na Itália, por exemplo, a energia solar fotovoltaica é responsável por 7,8% da demanda de energia anual, enquanto que na Alemanha e Grécia este número vai para 5% e 6% respectivamente (REN21, 2014). De acordo com dados do relatório da Ren21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2014), a energia solar fotovoltaica foi a que teve o maior aumento na capacidade instalada total ao redor do mundo nos últimos dez anos (vide Tabela 2.9), indo de 2,6 GW em 2004 para 139 GW no final do ano de 2013, com crescimento a uma taxa média de 49% ao ano (vide Figura 2.30) (IEA, 2014). Este crescimento acelerado só foi possível devido a programas de incentivos adotados pelo governo de países como Alemanha, Austrália, China, etc. (EPA, 2014).

Tabela 2.9 – Evolução da capacidade total instalada no mundo de várias energias renováveis entre os anos de 2004 e 2013.

Energia	Capacidade Total Instalada no Mundo (GW)		Variação percentual
	Ano de 2004	Ano de 2013	
Hídrica	715	1000	40
Biomassa	<36	88	>144
Geotérmica	8,9	12	35
Solar Fotovoltaica	2,6	139	5246
Solar Térmica	0,4	3,4	750
Eólica	48	318	563

Fonte: Adaptado de REN21 (2014).

Figura 2.30 – Crescimento cumulativo da capacidade instalada entre os anos de 2003 e 2013.



Fonte: Adaptado de IEA (2014).

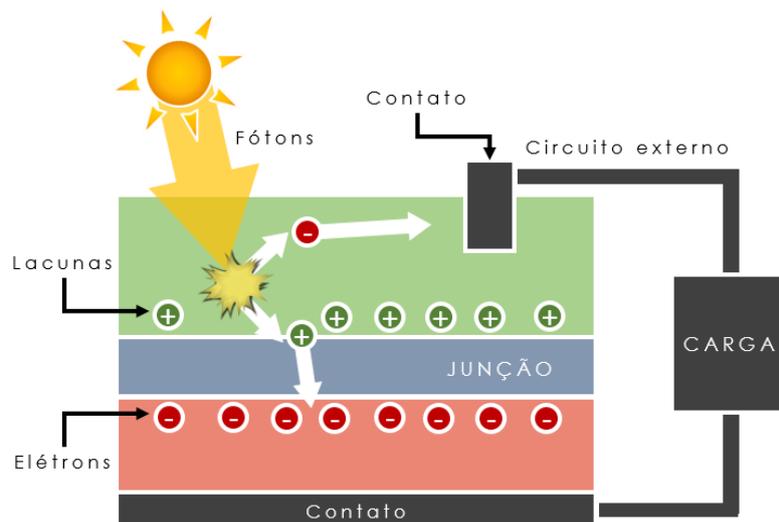
Além das altas taxas de crescimento da capacidade instalada, outro fator também chama a atenção nesse mercado: a queda nos preços dos módulos. Estes valores foram reduzidos para um quinto do valor original nos últimos seis anos, enquanto que para o sistema de geração como um todo o valor caiu para um terço. Estas quedas se devem aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e processos industriais mais econômicos e rápidos. Outro fator que contribuiu para a

queda nos preços foi a entrada da China neste mercado, pressionando os preços para baixo, elevando a oferta. (IEA, 2014; REN21, 2014).

2.4.1. Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos eletrônicos de estado sólido que transformam a radiação solar em corrente elétrica. Seu funcionamento ocorre basicamente em dois processos: o primeiro no qual os fótons da radiação incidente geram pares elétrons-lacuna através do efeito fotovoltaico; e o segundo aonde esses pares são separados pela diferença de potencial produzida pela junção p-n (lacunas vão para o terminal positivo enquanto que os elétrons vão para o negativo). A Figura 2.31 mostra um esquema que exemplifica o funcionamento das células fotovoltaicas. O processo de geração somente ocorre se os fótons possuírem uma energia igual ou maior que o valor de Energia da Banda Proibida do semiconductor (E_G) (AVRUTIN, et al., 2011; McEVOY, et al., 2012).

Figura 2.31 – Processo de conversão da radiação solar em corrente elétrica em células fotovoltaicas.



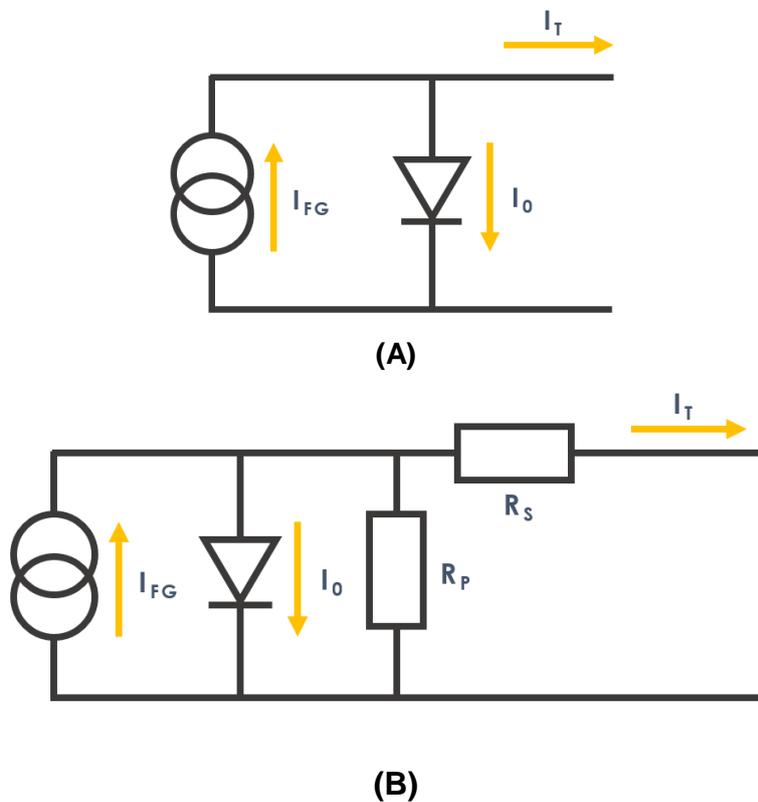
Fonte: Produção do Autor.

A estrutura básica de uma célula solar fotovoltaica é constituída por duas ou mais camadas de semicondutores (que juntos formam junções como a p-n, p-i-n, etc.), contatos metálicos superior e inferior e a camada antirreflexo (LUQUE; HEGEDUS, 2002).

2.4.1.1. Circuito Eletrônico Equivalente das Células Solares

As células solares fotovoltaicas ideais podem ser representadas pelo circuito eletrônico equivalente mostrado na Figura 2.32 – (A), que é constituído basicamente por uma fonte de corrente em paralelo a um diodo. A corrente total gerada pela célula é descrita pela Equação 2.17 e foi derivada da equação de Shockley para o diodo ideal. Ela depende da corrente fotogerada (I_{FG}), que é o fluxo de elétrons produzido pela absorção dos fótons incidentes sobre a célula, e da corrente de saturação reversa do diodo (I_0) (McEVOY, et al, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 2.32 – Circuito eletrônico que simula uma célula fotovoltaica ideal em (A) e uma célula real em (B).



Fonte: Adaptado de McEvoy, et al. (2012).

$$I_T(V) = I_{FG} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

Onde:

$I_T(V)$: Corrente total gerada pela célula fotovoltaica (A);

I_{FG} : Corrente Fotogerada (A);

I_D : Corrente de saturação reversa do diodo (A);

q : Carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T : Temperatura (K)

n : Fator de idealidade do diodo, geralmente situado entre 1 e 2;

Como pode ser visto na Equação 2.17 a corrente total produzida depende do valor da tensão V . Com esta relação obtém-se o gráfico da Corrente pela Tensão (curva $I \times V$) que traz informações a respeito do comportamento da célula.

Diferentemente das células ideais, as células reais possuem alguns fatores estruturais e físicos que influenciam em sua produção energética. Estes fatores acabam agindo como resistências que estão em série ou em paralelo com a célula conforme ilustrado pelo circuito equivalente da Figura 2.32 – (B). Dentre os fatores que levam a um acréscimo da resistência em série pode-se citar as perdas nos condutores metálicos e na resistência em paralelo às fugas de corrente na junção p-n. A equação que descreve a corrente total gerada neste caso é a Equação 2.18. (BELOTO, 1983; PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_T(V) = I_{FG} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)V}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2.18)$$

Onde:

$I_T(V)$: Corrente total gerada pela célula fotovoltaica (A);

I_{FG} : Corrente Fotogerada (A);

I_0 : Corrente de saturação reversa do diodo (A);

q : Carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T : Temperatura (K)

n : Fator de idealidade do diodo, geralmente situado entre 1 e 2;

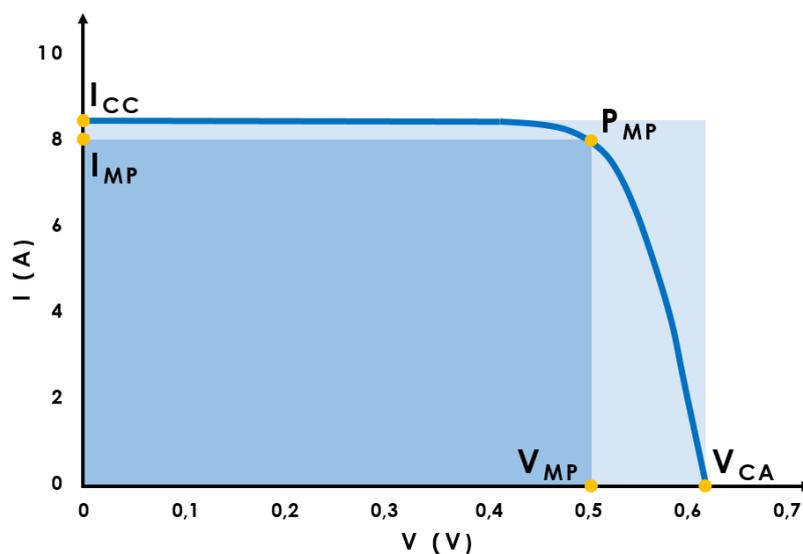
R_S : Resistências em Série (Ω)

R_P : Resistências em Paralelo (Ω)

2.4.1.2. Curva I x V

A curva I x V traz uma série de informações importantes a respeito das células fotovoltaicas. Com ela informações de como as células ou módulos funcionam sob diferentes condições de insolação, temperatura e carga podem ser obtidas. Seu formato depende da tecnologia de célula ou módulo utilizado e quão mais quadrada ela for, maior será o rendimento (ALVARENGA, 2014). Através desta curva alguns parâmetros importantes podem ser obtidos como os valores de corrente de curto circuito (I_{CC}), tensão de circuito aberto (V_{CA}), potência máxima produzida pela célula (P_{MP}), etc. Alguns destes parâmetros são mostrados na Figura 2.34 que traz uma curva I x V de uma célula solar e suas descrições seguem abaixo.

Figura 2.33 – Curva I x V de uma célula solar fotovoltaica aonde são indicados os seus principais parâmetros.



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

Os principais parâmetros de uma célula solar fotovoltaicas são:

A) Tensão de Circuito Aberto (V_{CA}): é a máxima tensão fornecida pela célula e somente pode ser obtida quando não há corrente circulando pelo circuito. Ela depende da corrente fotogerada e da corrente de saturação do diodo como mostrado pela Equação 2.19.

$$V_{CA} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{FG}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.19)$$

Onde:

V_{CA} : Tensão de circuito aberto (V)

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T : Temperatura (K)

q : Carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C

I_{FG} : Corrente Fotogerada (A);

I_D : Corrente de saturação reversa do diodo (A);

B) Corrente de Curto Circuito (I_{CC}): é a máxima corrente gerada pela célula fotovoltaica e pode ser medida quando os terminais da célula se encontram em curto-circuito. Ela depende do fluxo de fótons que incidem sobre o dispositivo (que varia de acordo com o espectro solar), da área e das propriedades ópticas (características de absorção e reflexão) do mesmo. Caso as perdas ópticas e as perdas ocasionadas pelas resistências em série e em paralelo sejam pequenas, a corrente de curto circuito será muito próxima da fotogerada e poderá ser descrita pela Equação 2.20 (PVEDUCATION, 2015; LEE, 2010; PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_{CC} \approx I_{FG} = A \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} G(\lambda) RE(\lambda) d\lambda \quad (2.20)$$

Onde:

I_{CC} : Corrente de curto circuito (A);

I_{FG} : Corrente fotogerada (A)

A : Área do dispositivo (m^2);

$G(\lambda)$: Irradiância Espectral (W/m^2nm);

$RE(\lambda)$: Resposta Espectral do dispositivo (A/Wnm);

λ_A e λ_B : Intervalo de comprimento de onda da Resposta Espectral (nm);

C) Fator de Forma (FF): é definido como a razão entre a máxima potência (P_{MP}) produzida pela célula e o produto entre a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto como descrito na Equação 2.21. Este valor é um indicativo do efeito das resistências em série e paralelo, sendo que quão maior for seu valor, menor serão as influências destas resistências e mais próximos serão os retângulos destacados na Figura 2.35.

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{CA}I_{CC}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{CA}I_{CC}} \quad (2.21)$$

Sendo:

FF : Fator de forma;

P_{MP} : Potência máxima (W);

V_{MP} : Tensão de máxima potência (V);

I_{MP} : Corrente de máxima potência (A);

V_{CA} : Tensão de circuito aberto (V);

I_{CC} : Corrente de curto circuito (A);

A potência máxima irá ocorrer sob as condições aonde a tensão e a corrente produzida pelo dispositivo são máximas ao mesmo tempo. Estes pontos se encontram representados na Figura 2.35.

D) Eficiência (η): ela indica o quão eficiente é o processo de conversão da energia solar em energia elétrica é definida como a razão entre a potência máxima produzida pela célula e a potência radiante que chega até ela (P_{IN}). A Equação 2.22 mostra esta razão, e normalmente o resultado é dado em percentual da energia convertida. Seu valor depende de vários fatores como o tipo de semicondutor utilizado, o processo de fabricação, presença de defeitos e impurezas no semicondutor, etc.

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{IN}} = \frac{V_{MP} I_{MP}}{A G} \quad (2.22)$$

Sendo:

η : Eficiência;

P_{MP} : Potência máxima produzida pelo módulo (W);

P_{IN} : Potência máxima que chega ao módulo (W);

V_{MP} : Tensão de máxima potência (V);

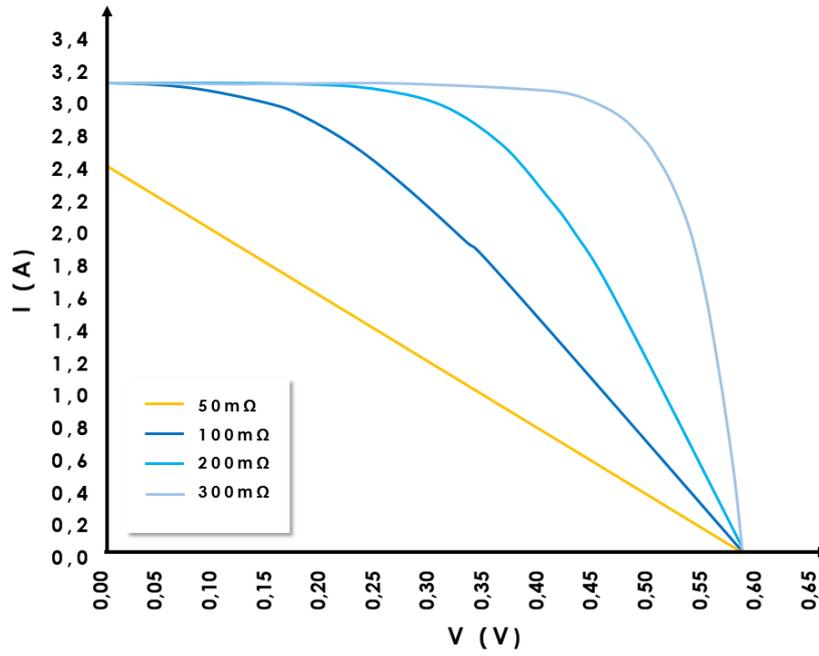
I_{MP} : Corrente de máxima potência (A);

A : Área do dispositivo fotovoltaico (m^2);

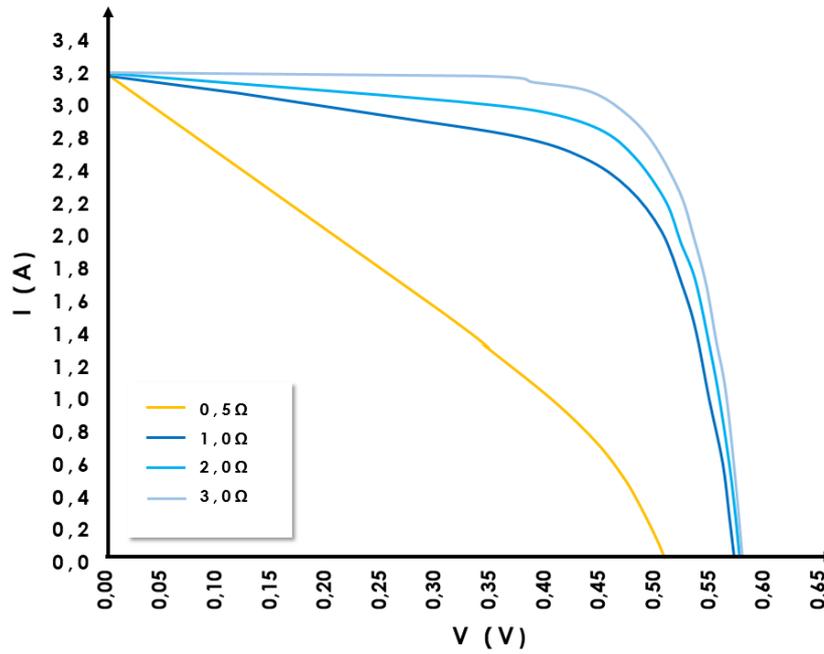
G : Irradiância incidente (W/ m^2);

Como mencionado anteriormente, as células podem sofrer os efeitos causados pelas séries em série e paralelo. Os efeitos dessas resistências na curva $I \times V$ podem ser vistas nas Figuras 2.34 – (A) e (B).

Figura 2.34 – Efeito na curva I x V da resistência em série em (A) e em paralelo em (B).



(A)



(B)

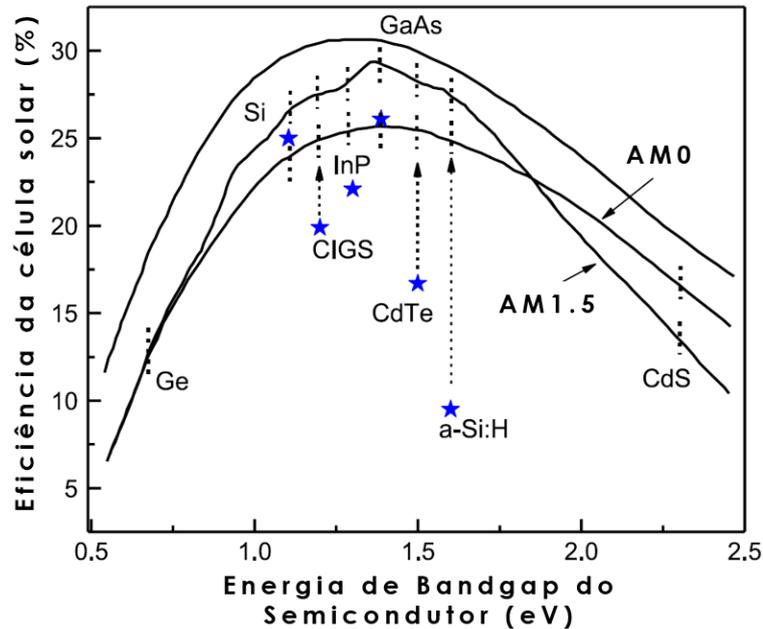
Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

2.4.1.3. Energias de banda proibida (Gap)

A energia de banda proibida ou gap de um semicondutor é a energia necessária para que o elétron passe da camada de valência para a camada de condução. Somente fótons que possuam energia maior do que a banda proibida poderão criar pares elétrons-lacuna, contribuindo assim para a corrente fotogerada pelo dispositivo. Por este motivo, este parâmetro do semicondutor é muito importante para determinar como o dispositivo será influenciado pelo espectro solar incidente (LUQUE; HEGEDUS, 2002).

A corrente fotogerada (I_{FG}) é influenciada pelo valor da energia da Banda Proibida (E_G), de modo que, quanto maior é o valor de E_G , menor será o valor de I_{FG} . A tensão de circuito aberto também é afetada, apresentando maiores valores para os maiores valores de E_G . Assim, considerando que para baixas perdas por resistências em série e em paralelo o valor de I_{SC} é aproximadamente igual ao de I_{FG} e que a eficiência depende diretamente da potência ($I_{CC} \times V_{CA}$), haverá valores ótimos de E_G para que a eficiência seja máxima. Para o caso do espectro terrestre, semicondutores com valor de E_G entre 1,0 e 1,6 eV apresentam eficiências máximas teóricas próximas entre si e ótimas para este espectro como ilustrado pela Figura 2.35 (AVRUTIN, et al, 2011; LUQUE; HEGEDUS, 2002). Assim, pode-se dizer que o valor do E_G desempenha um papel importante tanto na determinação da eficiência dos vários tipos de semicondutores quanto na escolha dos melhores para qualquer tipo de distribuição espectral eletromagnética. Na Tabela 2.10 seguem os valores de E_G para alguns semicondutores.

Figura 2.35 – Eficiência no processo de conversão da energia solar em elétrica de acordo com os valores de Energia de Banda Proibida de alguns semicondutores.



Fonte: Adaptado de Avrutin, et al. (2011).

Tabela 2.10 – Energia de Banda Proibida para vários semicondutores.

Semicondutor	E_G (eV)	Semicondutor	E_G (eV)	Semicondutor	E_G (eV)
Ge	0,66	GaInAs	1,4	CuIn _x Ga _(1-x) Se ₂	1,0 a 1,7
Si	1,12	GaAs	1,43	GaInP	1,9
InP	1,35	CdTe	1,45	CdS	2,42

Fonte: Adaptado de Avrutin, et al. (2011) e Pinho e Galdino (2014).

2.4.1.4. Resposta Espectral

A Resposta Espectral (RE) é definida como a razão entre a corrente produzida pelo dispositivo fotovoltaico e a potência da radiação que incide sobre ele conforme mostra a Equação 2.23. Ela descreve como que os fótons com diferentes comprimentos de onda (ou níveis de energia) contribuem para a corrente fotogerada. Na Figura 2.36 segue uma curva de Resposta Espectral de uma célula solar ideal e uma real. Como podem ser observados os dois são diferentes, sendo que tais diferenças se devem as perdas ópticas resultantes da absorção e reflexão ocasionados pelo vidro de cobertura, processos de recombinações internas dos pares

elétrons e lacunas, características do semiconductor, etc (PVEDUCATION, 2015).

$$RE(\lambda) = \frac{I_{CC}(\lambda)}{G(\lambda)} \quad (2.23)$$

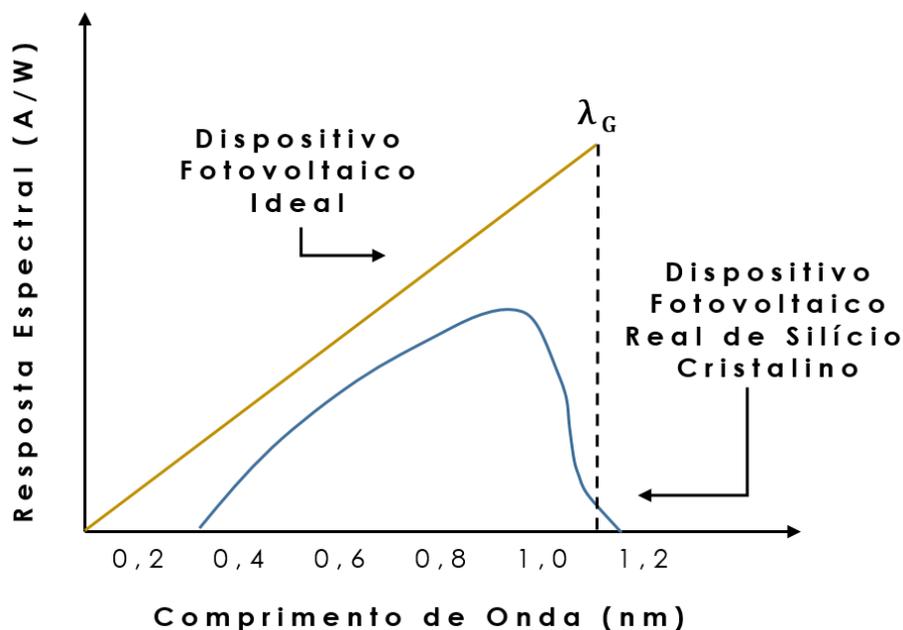
Onde:

$RE(\lambda)$: Resposta Espectral do dispositivo fotovoltaico (A/Wnm);

$I_{CC}(\lambda)$: Corrente de Curto Circuito, assumindo que I_{CC} equivale à I_{FG} (A/nm);

$G(\lambda)$: Irradiância espectral incidente (W/m²nm);

Figura 2.36 – Resposta Espectral de uma célula solar ideal de uma célula real.



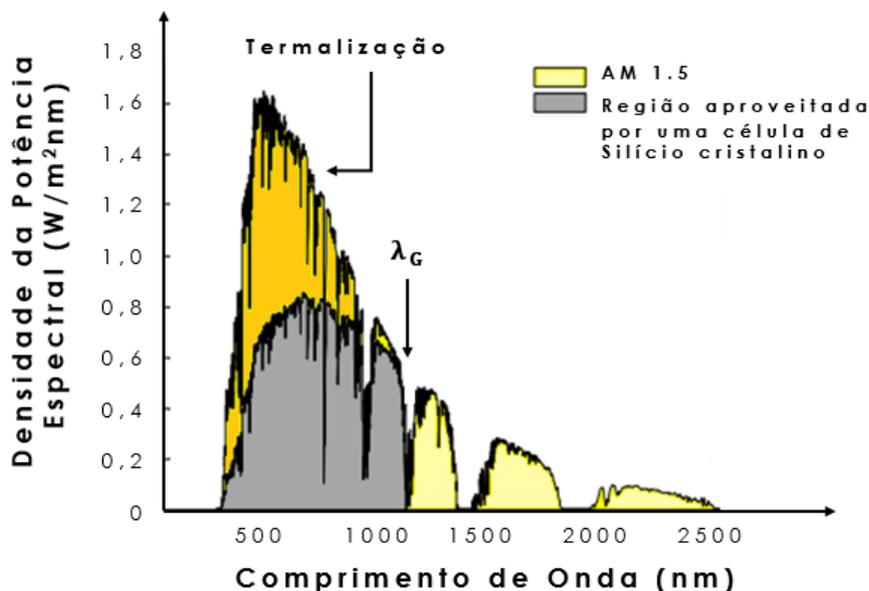
Fonte: Adaptado de Resende (2004).

Na Figura 2.36 pode ser visto também que radiações com comprimentos de onda menor que o equivalente à energia de Banda Proibida (λ_G) não são aproveitados na conversão. Da mesma maneira, a energia que os fótons mais energéticos que E_G possuem também não são totalmente utilizadas pela célula, contribuindo para seu aquecimento através do processo

conhecido como Termalização⁶. Esta incapacidade de absorver a radiação para maiores valores de comprimento de onda e de utilizar toda a energia disponibilizada pelos fótons mais energéticos levam a perdas significativas nos dispositivos com uma única junção p-n (PVEDUCATION, 2015).

Conhecer a curva da Resposta Espectral é muito importante para a geração fotovoltaica, pois é através dela que se pode estimar o quanto que as variações do espectro solar irão afetar a energia elétrica gerada. Por exemplo, na Figura 2.37 um gráfico mostra qual parte do espectro solar pode vir a ser utilizado por uma célula de Silício. Quaisquer alterações espectrais nesta faixa do espectro influenciarão diretamente na corrente elétrica gerada e conseqüentemente na eficiência e em outros parâmetros.

Figura 2.37 – Região de aproveitamento do espectro solar incidente por uma célula de silício cristalino.

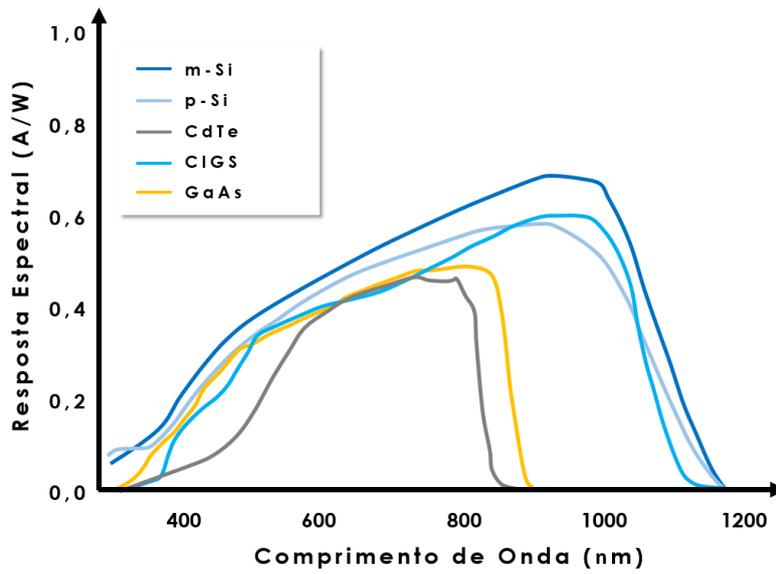


Fonte: Adaptado de Zeman (2015).

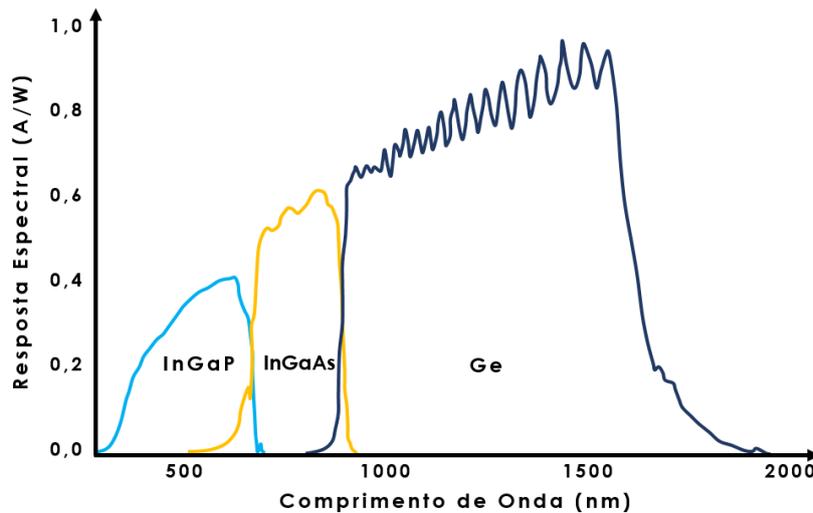
Diferentes tecnologias de células solares possuem diferentes respostas espectrais. Nas Figuras 2.38 – (A) e (B) são mostradas diversas curvas de respostas espectrais para algumas tecnologias de células solares.

⁶ Processo no qual a energia excedente do fóton absorvido pelo dispositivo fotovoltaico é dissipada na rede cristalina do material em forma de calor.

Figura 2.38 – Respostas espectrais para diversas tecnologias de células solares fotovoltaicas em (A) e para uma tecnologia de tripla junção em (B).



(A)



(B)

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

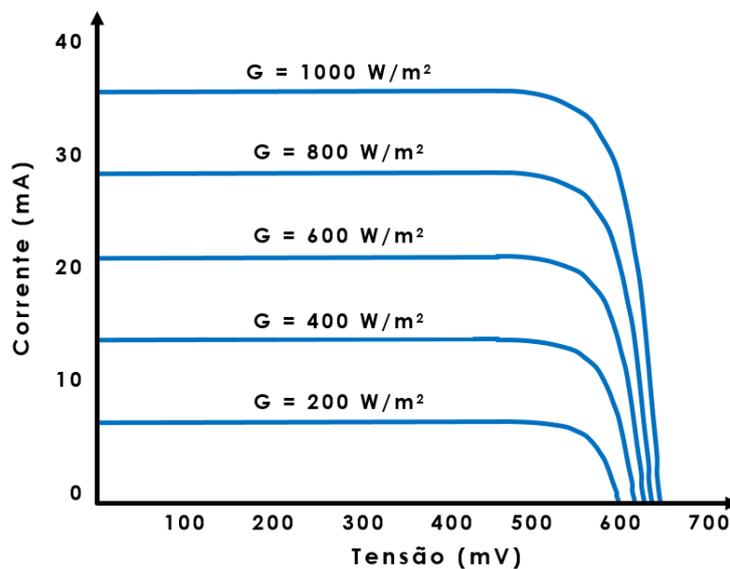
2.4.1.5. Influência dos parâmetros externos nas características elétricas dos dispositivos fotovoltaicos

A sensibilidade dos dispositivos fotovoltaicos às influências externas depende da tecnologia utilizada e da qualidade com a qual eles foram

produzidas (BETTS, 2004). Dentre os fatores externos que influenciam nos parâmetros dos dispositivos, podem ser citados:

A) Irradiância: Esta variável influencia diretamente na potência gerada pelos dispositivos fotovoltaicos. A corrente de curto circuito é diretamente proporcional a ela, enquanto que a tensão de circuito aberto apresenta uma dependência em escala logarítmica quando a temperatura é mantida constante (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 2.39 mostra uma ilustração de como esta variável influencia na curva I x V de uma célula.

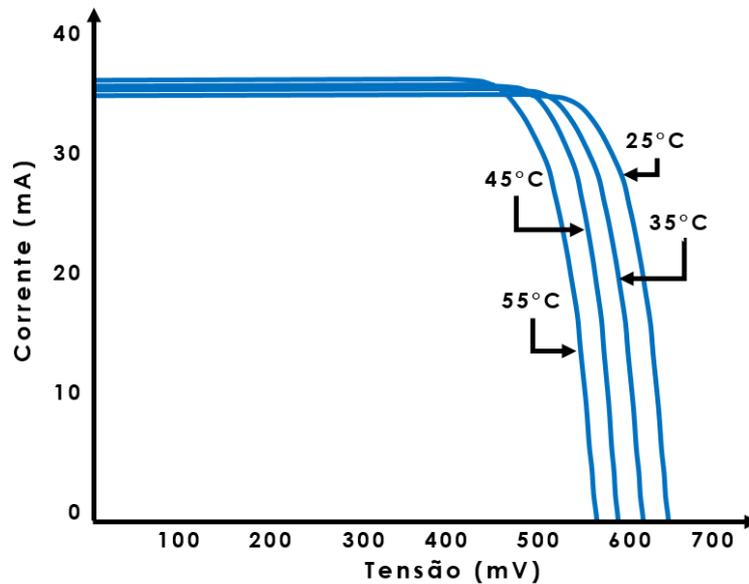
Figura 2.39 – Curvas I x V de células solares de Silício para diferentes intensidade de radiação.



Fonte: Vilela (2010).

B) Temperatura: O efeito da temperatura dos dispositivos fotovoltaicos é indicado no gráfico da Figura 2.40. Nele pode ser visto que a tensão de circuito aberto diminui proporcionalmente ao aumento da temperatura, enquanto que a corrente de curto circuito sofre um leve um acréscimo. As alterações destes parâmetros acabam levando a uma perda de potência por conta do decréscimo significativo no valor de V_{CA} (PINHO; GALDINO, 2014; VILELA, 2010).

Figura 2.40 – Influências da temperatura na curva I x V de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de Vilela (2010)

C) Espectro Solar

Os dispositivos fotovoltaicos são sensíveis ao espectro eletromagnético incidente e a toda variação que ele sofre. Isso ocorre porque tais dispositivos são seletivos espectralmente e somente as regiões espectrais que coincidirem com sua resposta espectral poderão ser aproveitadas. A sensibilidade ao espectro varia de uma tecnologia para outra e depende primeiramente do valor de E_G , que limita o comprimento de onda que a radiação pode ser absorvida. Fatores como reflexão, sombreamento e características internas do material também irão afetar esta sensibilidade (BETTS, 2004).

Diferentemente dos efeitos da temperatura e da irradiância, os efeitos da variação espectral da radiação solar não são ainda considerados em avaliações de performance de células solares em operação em campo e vem sendo alvo de muitas pesquisas ao redor do mundo na última década. Os resultados apresentados por estas pesquisas foram obtidos utilizando diferentes metodologias em regiões com climas distintos entre si em diferentes períodos de tempo e por isso há certas dificuldades para compará-los. Apesar disto, elas concordam no fato de que as influências

das variações espectrais podem ser significativas dependendo da resposta espectral da célula solar utilizada. Conforme a tecnologia fotovoltaica adotada, observa-se que seu desempenho varia com a localização em termos de latitude e longitude, clima local, nível de poluição etc., levando a crer que o desempenho dos módulos fotovoltaicos podem variar de uma região para outra (BETTS, 2004; ISHII, et al, 2010; DIRNBERGER, et al, 2014; ALONSO-ABELLA, et al, 2014).

2.4.2. Tecnologias Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas podem ser produzidas em vários tipos de estruturas físicas utilizando diferentes tipos de semicondutores orgânicos ou inorgânicos. Dentre os semicondutores orgânicos podem-se citar o Antraceno ($C_{14}H_{10}$), Tetraceno ($C_{18}H_{12}$) e Pentaceno ($C_{22}H_{14}$), enquanto que para os inorgânicos cita-se o Silício (Si), Arseneto de Gálio (GaAs), o Fosfeto de Índio-Gálio (GaInP), Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio ($Cu(InGa)Se_2$) ou Disseleneto de Cobre-Índio (CIS) e Telureto de Cádmio (CdTe). Estes materiais são escolhidos de modo que suas características de absorção sejam compatíveis com o espectro solar e que as células fabricadas com eles sejam viáveis economicamente de serem produzidas (LUQUE; HEGEDUS, 2002; MIT, 2015; KOHLER; BASSLER, 2015).

Devido à grande quantidade de configurações e tecnologias de células fotovoltaicas, elas podem ser classificadas de acordo com vários fatores, como a morfologia, o material utilizado, etc. O Laboratório Nacional de Energias Alternativas dos Estados Unidos da América – *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) utiliza o conceito de família de semicondutores, dividindo os dispositivos fotovoltaicos em: células de multijunção; células de Arseneto de Gálio de junção única; células de silício cristalino; tecnologias de filmes finos; e tecnologias emergentes. Outra classificação comum é a baseada em gerações em que elas surgiram, aonde as tecnologias são classificadas conforme descrito abaixo (PINHO; GALDINO, 2014 ; MIT, 2015; NREL, 2015):

A) **Primeira geração:** células baseadas em lâminas de Silício mono ou policristalino ou de Arseneto de Gálio. No caso do Silício, as células feitas deste material são utilizadas em sua maioria para aplicações terrestres e dominam o mercado fotovoltaico mundial. Para o GaAs, seu uso fica restrito às aplicações espaciais devido ao elevado custo.

B) **Segunda geração:** consiste nas células de filme fino de Silício Amorfo, Telureto de Cádmio (CdTe) ou Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CuInGaSe₂). Todas elas possuem aplicações terrestres e possuem esta denominação por apresentarem espessuras de poucos micrometros.

C) **Terceira geração:** consistem nas células orgânicas, células sensibilizadas por corantes e as de multijunção. As células orgânicas e sensibilizadas por corante ainda apresentam baixas eficiências e são de tecnologias mais recentes, estando em sua grande maioria ainda em pesquisa nas universidades e centros de pesquisa. As células solares de multijunção apresentam elevadas eficiências, porém com alto custo de fabricação e por isso tem aplicação restrita a área espacial ou em sistemas com concentradores solares para uso terrestre.

De todas estas tecnologias apresentadas, a que domina o mercado fotovoltaico mundial são as baseadas no Silício cristalino, correspondendo a 90% dos módulos comercializados. Essa grande participação se deve a diversos motivos, tais como: o fato de o silício ser um elemento abundante na natureza; total domínio tecnológico por diversos países; possuir uma indústria produtiva bem consolidada; além de possuir características de absorção que se encaixam com o espectro solar (MIT, 2015; LUQUE; HEGEDUS, 2002).

Um tipo de tecnologia que vem despontando nos últimos anos no mercado e que hoje corresponde a 10% da capacidade produzida mundialmente é a tecnologia de filmes finos. Por se tratar de dispositivos com alguns micrometros de espessura, sua produção tem reduzindo custos pela economia de materiais. Além disso, seu formato menos espesso facilita na manipulação e integração em edificações. Apesar destas vantagens, seus

valores de eficiência são mais baixos que o das células convencionais e em alguns casos, a raridade e toxicidade de alguns elementos utilizados podem vir a ser um fator negativo (IPCC, 2012; MIT, 2015).

Muitas tecnologias novas têm surgido nos últimos anos, como é o caso das células solares sensibilizadas por corante (DSSC – do inglês *Dye Sensitized Solar Cell*) e as orgânicas. A maioria destas células de tecnologia emergente ainda se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento. Porém em alguns casos, como no das orgânicas, elas já podem ser encontradas no mercado (IPCC, 2012).

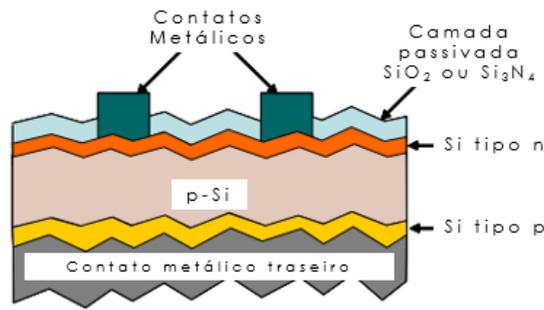
2.4.2.1. Células fotovoltaicas de primeira geração

As células solares fotovoltaicas de primeira geração são fabricadas a partir de laminas de semicondutores como o Silício. Estas laminas são resultado do corte de lingotes de materiais muito puros que depois sofrem dopagem e uma série de tratamentos para a fabricação da célula.

2.4.2.1.1. Células de Silício cristalino

As células de Silício cristalino são confeccionadas com o silício de grau eletrônico (com pureza de 99,999999999%) ou de grau solar (com pureza de 99,999999%). Este semicondutor possui um E_G de 1,1 eV e pode ser utilizado com duas estruturas cristalinas diferentes: a monocristalina (m-Si) e a policristalina (p-Si). As células policristalinas são menos eficientes que as monocristalinas, porém permitem a utilização de Silício com um maior teor de impurezas e são mais baratas e fáceis de serem produzidas (Avrutin, et al., 2011; Pinho e Galdino, 2014). A estrutura de uma célula típica de silício cristalino segue na Figura 2.41.

Figura 2.41 – Esquema de uma célula cristalina de Silício.



Fonte: Adaptado de Avrutin, et al. (2011).

As células de Silício de maneira geral apresentam eficiências maiores que outras comercializadas ao redor do mundo. Segundo Green, et al (2015), em laboratório as melhores células monocristalinas e policristalinas possuem eficiências em torno de 25% e 20% respectivamente. No caso dos módulos, estes valores passam para aproximadamente 23% para o m-Si e 19% para o p-Si. Esta queda na eficiência se deve às perdas ópticas provocadas pelo encapsulamento e pelas ligações entre as células que inserem resistências à passagem da corrente.

2.4.2.1.2. Células de Arseneto de Gálio

As células fabricadas com Arseneto de Gálio são de grande interesse por conta de algumas vantagens, como seu E_G que é de 1,43 eV (valor muito bom para o espectro solar) e o fato de conseguirem operar melhor que as células de Silício a elevadas temperaturas. Elas também apresentam coeficientes de absorção⁷ bem elevados, o que aumenta sua eficiência e permite confeccionar células de menores espessuras (ANSPAUGH, 1996; GHENSEV, 2006).

As células de GaAs policristalinas em desenvolvimento apresentam uma eficiência de 18,4%, enquanto que os módulos de filmes finos para esta mesma tecnologia possuem esse valor igual a 28,8% para os dispositivos de pequena área ($\sim 1 \text{ cm}^2$) e 24,1% para os de grande área ($\sim 800 \text{ cm}^2$).

⁷ O Coeficiente de Absorção (α_A) determina o quanto que os fótons da radiação incidente conseguem penetrar na célula solar sem serem absorvidos. Materiais com baixos valores de α não apresentam uma absorção eficiente e acabam necessitando de maiores espessuras para conseguirem aproveitar a radiação (PVEDUCATION, 2015).

Com as buscas por melhorias nas eficiências das células fotovoltaicas, dispositivos com mais de uma junção p-n foram desenvolvidos baseados no Arseneto de Gálio. Semicondutores como o Fosfeto de Índio-Gálio (GaInP), Arseneto de Índio-Gálio (GaInAs), Germânio (Ge), entre outros, passaram a ser utilizados formando células de tripla junção, que resultou em dispositivos muito eficientes, chegando a 37,9% em laboratório (LUQUE; HEGEDUS, 2002; GREEN, et al, 2015).

As células de Arseneto de Gálio apresentam algumas desvantagens que acabam prejudicando sua utilização. Primeiramente as camadas com as quais estas células são produzidas exigem elevada qualidade e pureza (caso contrário há queda de eficiência), fato que requer processos de fabricação bem controlados, e por isso uma produção mais cara (MILES, et al., 2005). Além disso, ele é um elemento tóxico que pode causar problemas aos pulmões dos seres humanos (TANAKA, 2004). Por conta dos altos custos as células de Arseneto de Gálio têm sido utilizadaa em aplicações espaciais. A tendência dos últimos anos é o desenvolvimento e a utilização deste material em células de filmes finos.

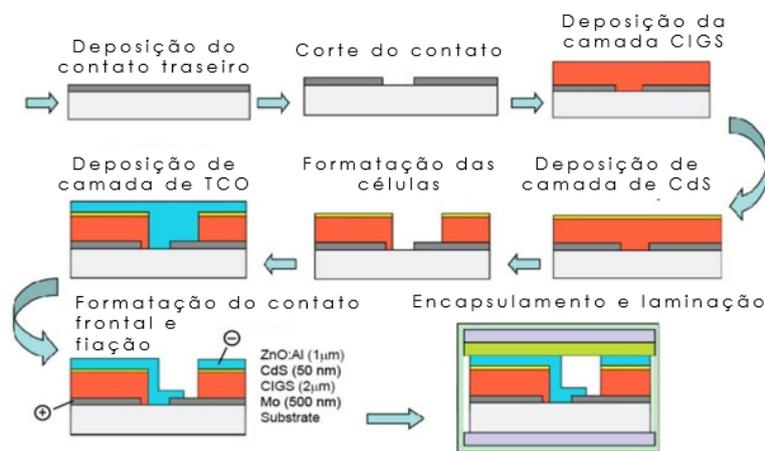
2.4.2.2. Células fotovoltaicas de segunda geração

Este tipo de célula é confeccionado com materiais que apresentam elevados coeficientes de absorção, o que torna possível sua fabricação em pequenas espessuras. Dentre estes materiais podem ser citados o Silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o Telureto de Cadmio (CdTe) e o Disseleneto de Cobre-Índio (CIS) ou Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio (CIGS), que podem ser utilizados com estruturas policristalinas ou amorfas. Estas células possuem algumas características estruturais, como a fabricação através da deposição das várias camadas de materiais em substratos e a utilização de uma camada de Óxido Transparente e Condutor - TCO⁸ como contato (PINHO; GALDINO, 2014; EI CHAAR, 2011).

⁸ Do inglês *Transparent Conductive Oxide*, são óxidos transparentes à algumas faixas da radiação eletromagnética e que apresentam a capacidade de conduzir eletricidade. Como exemplo podem ser citados o Óxido de Índio - Estanho - ITO (In₂O₃) e o Óxido de Zinco dopado com Alumínio (ZnO:Al) (Stadler, 2012).

Os módulos de filmes finos são fabricados através de técnicas de pulverização catódica, que deposita camadas de vários materiais sob um substrato. Esta forma de fabricação é diferente da utilizada para as células de Silício cristalino, que envolve processos separados entre si, como a confecção da célula, sua soldagem e por fim seu encapsulamento (PINHO; GALDINO, 2014; EI CHAAR, 2011). A Figura 2.42 mostra um esquema simplificado que ilustra este processo de fabricação para a tecnologia CIGS.

Figura 2.42 – Processo simplificado da produção do módulo CIGS.

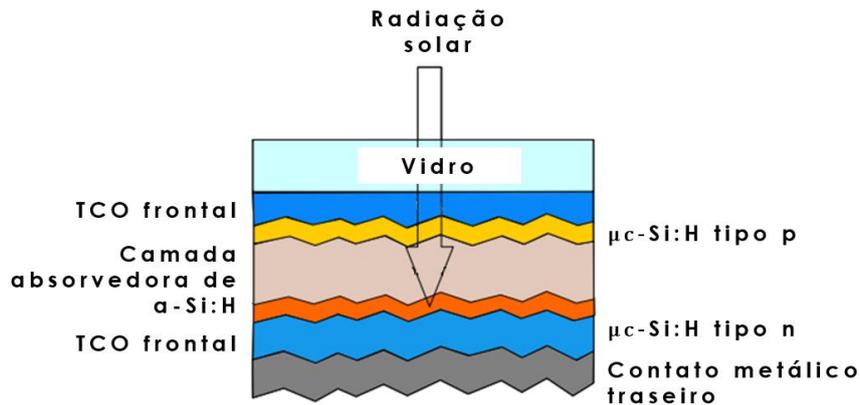


Fonte: Adaptado de ARCI (2015)

2.4.2.2.1. Silício amorfo hidrogenado e microcristalino hidrogenado

As células baseadas no Silício amorfo utilizam este semicondutor em sua forma desprovida de ordenação atômica em longas distâncias no material. Esta característica faz com que suas propriedades se diferenciem do seu estado cristalino, como, por exemplo, seu valor de E_G que se torna 1,7eV enquanto que para o m-Si este parâmetro é de 1,1 eV (El Chaar, 2011). Um exemplo da estrutura de uma célula de a-Si:H é mostrado na Figura 2.43.

Figura 2.43 – Estrutura de uma célula de a-Si:H.



Fonte: Adaptado de Avrutin, et al. (2011).

A eficiência das melhores células de a-Si:H medidas em laboratório ficam em torno de 10% (GREEN, 2015). Porém este valor tende a cair com o passar do tempo e ficar entre 5% e 6% devido à instabilidade conhecida como efeito Staebler-Wronski⁹ causado pela exposição à luz. Uma solução encontrada para minimizar este problema e aumentar a eficiência, foi a fabricação de células de Silício amorfo de multijunção, aonde várias camadas semicondutoras são superpostas de modo a utilizar diferentes regiões do espectro (AVRUTIN, 2011; EI CHAAR, 2011; PINHO; GALDINO, 2014).

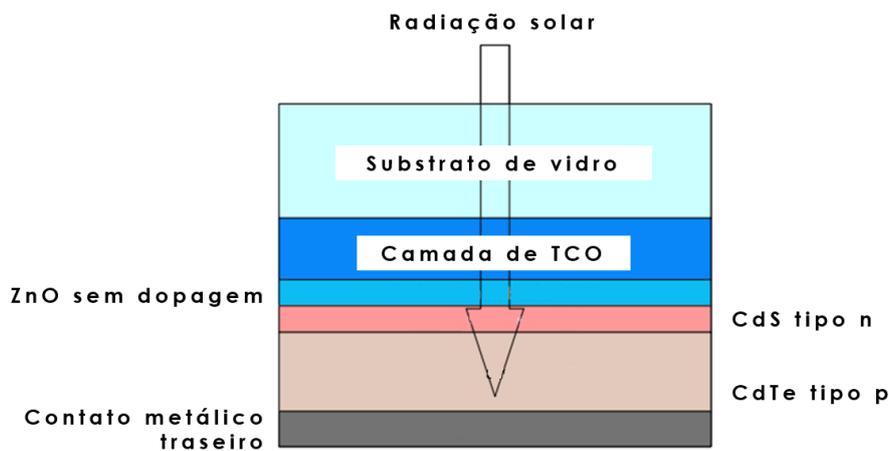
As células de Silício Microcristalino utilizam o Silício com uma matriz amorfa e regiões cristalinas dispersos no meio dela. Por apresentar uma estrutura física mista, suas propriedades se encontram mais próximas do m-Si/p-Si do que a a-Si. Seu valor de banda proibida, por exemplo, se aproxima ao do Silício cristalino, porém sua capacidade de absorção dos fótons é maior, possibilitando menores espessuras. Uma grande vantagem destes tipos de células é a menor degradação da eficiência quando exposta à radiação quando comparada ao a-Si:H. Células com esta tecnologia utilizadas em pesquisa apresentam uma eficiência de 11,8% (AVRUTIN, et al, 2011; GREEN, et al, 2015).

⁹ O efeito Staebler-Wronski é um efeito resultante da exposição prolongada do módulo de Silício Amorfo Hidrogenado à radiação térmica. Ele leva à degradação dos parâmetros elétricos, reduzindo a eficiência destes módulos.

2.4.2.2. Telureto de Cádmio

Estas células utilizam o Telureto de Cadmio (CdTe) como uma das camadas semicondutoras, que possui um valor de E_G igual a 1,5 eV, valor muito próximo ao ideal para o espectro terrestre. Este material apresenta um coeficiente de absorção que lhe permite absorver cerca de 99% dos fótons da radiação coincidente com sua resposta espectral em pequenas espessuras e é um dos semicondutores mais promissores utilizados em filmes finos. Sua estrutura típica é mostrada na Figura 2.44 (El CHAAR, 2011; AVRUTIN, et al, 2011).

Figura 2.44 – Estrutura de uma célula feita com CdTe.



Fonte: Adaptado de Avrutin, et al. (2011).

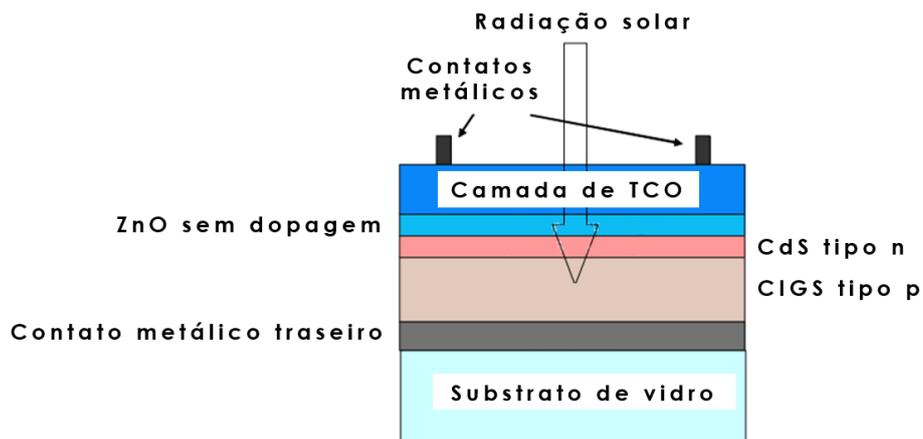
A eficiência para este tipo de célula em laboratório é superior a 16,5% para módulos de pequena área e de aproximadamente 11% para os módulos de grande área. Esta célula apresenta facilidades de fabricação e maior capacidade para produção em larga escala. Apesar destas facilidades, elas apresentam desvantagens por causa da toxicidade do Cadmio e da raridade do Telúrio. No caso do Cadmio, durante a fabricação das células, compostos que possuem este elemento são manipulados em fase líquida ou em forma de pó, o que pode causar riscos à saúde dos funcionários. Em alguns países, como, por exemplo, a Holanda, módulos fotovoltaicos que contenham esse elemento são proibidos. Quanto ao Telúrio, devido à sua baixa disponibilidade na natureza, podem vir a ser um fator limitante para o

crescimento da produção deste tipo de célula no futuro (FTHENAKIS, 2000; EI CHAAR, 2011; AVRUTIN, et al, 2011).

2.4.2.2.3. CIS/CIGS

As células de Disseleneto de Índio-Cobre ou CIS (CuInSe_2) possuem uma energia de banda proibida de aproximadamente 1,0 eV. Este valor pode ser elevado através da adição do Gálio, formando o composto Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio ou CIGS (CuInGaSe_2). Assim seu E_G pode assumir um valor entre 1,1 e 1,7 eV dependendo da quantidade de Gálio, sendo o intervalo entre 1,25 eV a 1,3 eV o mais usado (AVRUTIN, et al, 2011). Na Figura 2.45 mostra um esquema da célula CIGS.

Figura 2.45 – Estrutura de uma célula CIGS.



Fonte: Adaptado de Avrutin, et al. (2011).

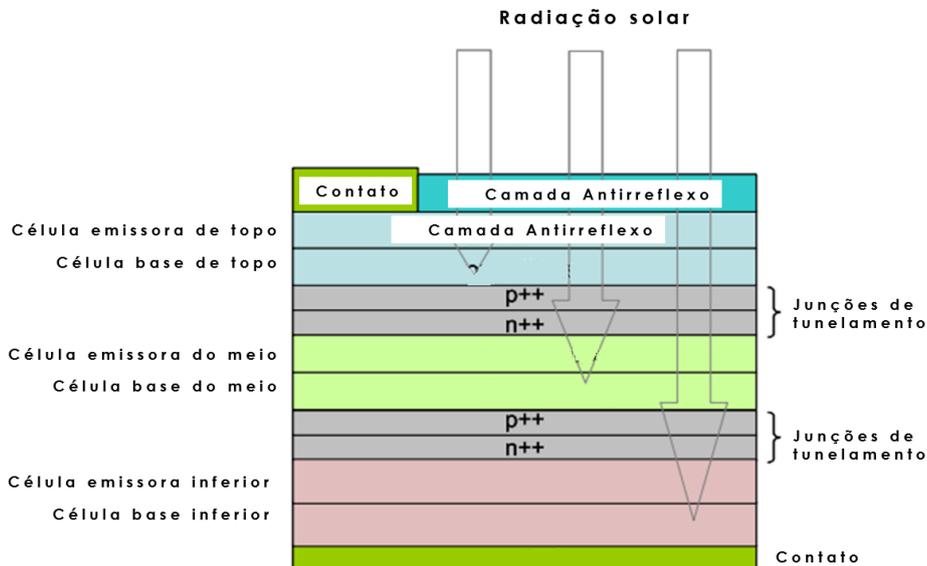
Esta tecnologia apresenta eficiências em laboratório de 20% para células de pequena área e 17,5% para módulos de grande área. Muitas empresas que fabricam esses módulos vêm realizando atividades de pesquisa e desenvolvimento visando melhorar o processo de fabricação, tornando-o mais barato de modo a conseguir competir com os módulos de Silício (EI CHAAR, 2011; AVRUTIN, et al, 2011). Assim como as células de CdTe, elas apresentam algumas dificuldades relacionadas à utilização de Cadmio e a raridade do Índio. As reservas para o elemento Índio não serão capazes de suprir a demanda para produção anual de muitos GWp (AVRUTIN, et al, 2011; PINHO; GALDINO, 2014).

2.4.2.3. Células fotovoltaicas de terceira geração

Os fótons que possuem energia menor que o valor de E_G da célula fotovoltaica comuns lhe são transparentes e não são utilizados para o processo de conversão. Já os fótons que possuem energia maior que E_G acabam tendo parte dela aproveitada e o restante perdido em forma de calor. Essas perdas acabam limitando a eficiência teórica dos dispositivos fotovoltaicos em torno de 31% de acordo com o limite de Shockley – Queisser (SHOCKLEY; QUEISSER, 1961; CHEN, 2011).

Uma maneira encontrada de superar este limite foi o desenvolvimento de células multijunção. As células de multijunção são dispositivos formados por duas ou mais células fotovoltaicas (chamadas sub-células) empilhadas umas sobre as outras como ilustrado pela Figura 2.46. Estas células apresentam valores de energia de banda proibida diferentes entre si e por isso conseguem aproveitar uma fração maior do espectro solar ao mesmo tempo em que o efeito da termalização é diminuído.

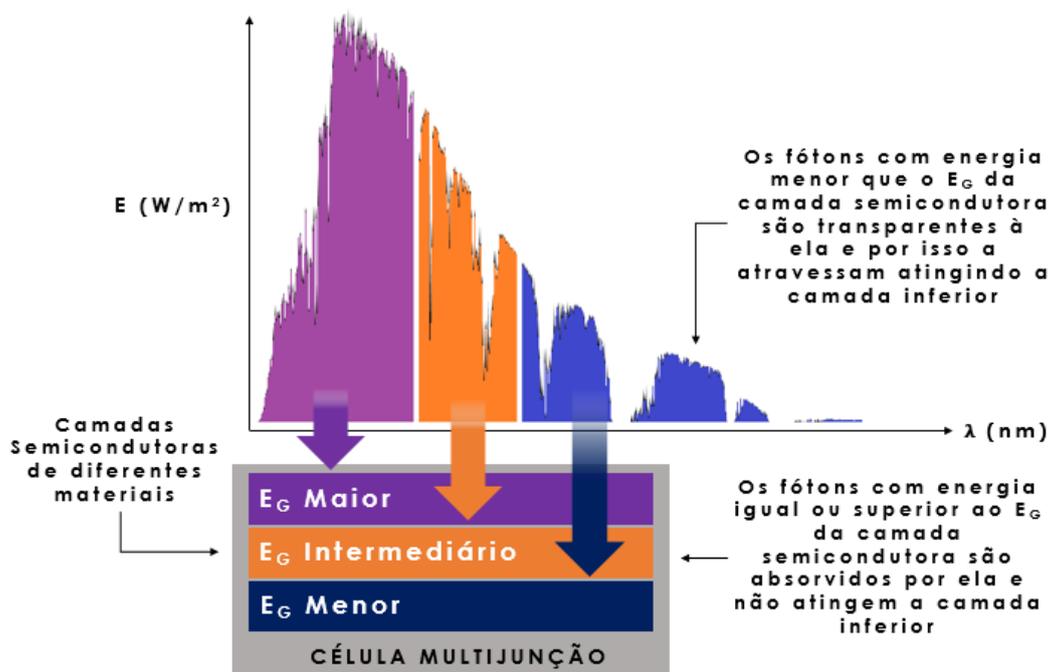
Figura 2.46 – Esquema de uma célula fotovoltaica de tripla junção.



Fonte: Adaptado de Avrutin, et al. (2011).

Um esquema explicativo de como ocorre o aproveitamento do espectro solar incidente para este tipo de célula é mostrado na Figura 2.47 (AVRUTIN, et al., 2011).

Figura 2.47 – Relação entre os valores de E_G e as faixas espectrais absorvidas por cada camada de uma célula de tripla junção.



Fonte: Adaptado de Chen (2011).

As sub-células que formam a célula de multijunção se encontram conectadas em série, de modo que a que produz a menor corrente (geralmente a de maior banda proibida) limita a corrente total gerada. A tensão, ao contrário da corrente, acaba sendo o resultado da soma de todas as células. Deste modo, a densidade de potência produzida por ela acaba sendo maior que as de uma única junção, excedendo o limite de Shockley-Queisser. Os melhores dispositivos de multijunção em laboratório apresentam uma eficiência de aproximadamente 39% para o caso sem o uso de concentradores (CHEN, 2011; AVRUTIN, et al, 2011; GREEN, et al, 2015).

2.4.3. Avaliação dos Dispositivos Fotovoltaicos

Através da curva $I \times V$ e da curva de resposta espectral é possível obter uma série de informações a respeito dos dispositivos fotovoltaicos, sendo que, de todos dados disponibilizados por ela, a eficiência é a mais comumente utilizada para caracterizar tais dispositivos e descrever seu

desempenho. A eficiência pode ser calculada pela Equação 2.22 e é medida em conjunto com os outros parâmetros elétricos em laboratório sob as condições padrões de teste (do inglês *Standard Test Conditions – STC*, também conhecido como *Standard Reporting Conditions - SRC*). O STC padroniza o método de medição, garantindo que resultados obtidos em diferentes laboratórios para quaisquer tipos de tecnologia possam ser comparados (PVEDUCATION, 2015; LUQUE; HEGEDUs, 2002). Estas condições estão definidas nas normas ASTM E948 - *Standard Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using Reference Cells Under Simulated Sunlight* e ASTM E1036 – 15 - *Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells*, que descrevem como deve ser o processo de medição das características das células e dos módulos fotovoltaicos, respectivamente. Na Tabela 2.11 encontram-se os valores recomendados do STC para os parâmetros que influenciam na geração de uma célula solar.

Tabela 2.11 – Condições Padrões de Testes (STC) para a avaliação dos dispositivos fotovoltaicos.

Condições Padrões de Teste	
Irradiância	$(1000 \pm 50) \text{ W/m}^2$
Temperatura da Célula	$(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$
Espectro	AM 1.5 G173
Ângulo de Incidência	$(90 \pm 10) \text{ }^\circ$

Fonte: ASTM (2015).

Caso as medidas tenham sido realizadas fora das condições padrões, elas podem ser extrapoladas para o STC através de equações descritas nas normas ASTM E984 para as células e na ASTM E1036 para os módulos. Algumas instituições e centros de pesquisa (como a NREL ou a SANDIA) também desenvolveram suas próprias equações para extrapolar parâmetros com base em suas experiências e conhecimentos. Como exemplo, as Equações 2.24, 2.25 e 2.26 são fórmulas propostas pela NREL para converter os valores de corrente de curto-circuito, tensão de circuito

aberto e potência máxima para as condições padrão. (ANDERSON, 1996; SMITH, et al., 2012).

$$I_{CC_{STC}} = \left(\frac{G_{STC}}{G} \right) \left[\frac{I_{CC}}{1 + \alpha_T(T - T_{STC})} \right] \quad (2.24)$$

$$V_{CA_{STC}} = \left[\frac{V_{CA}}{1 + \beta_T(T - T_{STC})} \right] \quad (2.25)$$

$$P_{MAX_{STC}} = \left(\frac{G_{STC}}{G} \right) \left[\frac{P_{MAX}}{1 + \gamma_T(T - T_{STC})} \right] \quad (2.26)$$

Onde:

$I_{CC_{STC}}$: Corrente de curto circuito na condição padrão (A)

G_{STC} : Irradiância na condição padrão (W/m^2)

G : Irradiância na condição medida (W/m^2)

I_{CC} : Corrente de curto circuito na condição medida (A)

α_T : Coeficiente térmico da corrente ($^{\circ}C^{-1}$)

T : Temperatura do dispositivo fotovoltaico na condição medida ($^{\circ}C$)

T_{STC} : Temperatura do dispositivo fotovoltaico na condição padrão ($^{\circ}C$)

$V_{CA_{STC}}$: Tensão de curto aberto na condição padrão (V)

V_{CA} : Tensão de curto aberto na condição medida (V)

β_T : Coeficiente térmico da tensão ($^{\circ}C^{-1}$)

$P_{MAX_{STC}}$: Potência máxima na condição padrão (W)

P_{MAX} : Potência máxima na condição medida (W)

γ_T : Coeficiente térmico da potência ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

2.4.3.1. Eficiência

As eficiências das diversas células fotovoltaicas vêm sendo medidas por algumas instituições como NREL nos EUA, AIST no Japão e Fraunhofer na Alemanha e publicadas a cada seis meses desde 1993 no jornal *Progress in Photovoltaics: Research and Application*. Alguns valores de eficiência obtidas em laboratório para células e módulos seguem na Tabela 2.12 abaixo junto com sua porcentagem do mercado atual.

Tabela 2.12 – Eficiências de células solares terrestres. Valores obtidos sob o STC.

Tecnologia	Eficiência (%)		Produção Anual (%)
	Célula	Módulo	
m-Si	25,6	22,9	36
p-Si	20,8	18,5	55
a-Si (Tripla Junção)	13,6	12,3	1,5
GaAs (Filme Fino)	28,8	24,1	Não significativa
GaAs (Bolacha policristalina)	18,4	-	Não significativa
CIGS	21	17,5	3,5
CdTe	21	17,5	4
Sensibilizada por corante	11,9	8,8	Não significativa
Orgânica	11	8,7	Não significativa
Multijunção (Cinco junções)	38,8	-	Não significativa
Multijunção (InGaP/GaAs/InGaAs)	37,9	-	Não significativa

Fonte: Adaptado de Green, et al. (2015) e ISE (2015).

De acordo com a tabela apresentada, as melhores células solares avaliadas em laboratório que apresentam as maiores eficiências na atualidade são as de multijunção, possuindo 38,8% sem concentradores. Apesar de apresentarem as maiores capacidades de conversão, elas perdem espaço para as células das famílias do silício cristalino e de filmes finos que apresentam um melhor custo benefício (MIT, 2015).

2.4.3.2. Limitações das condições padrões de teste

Os módulos e células fotovoltaicas são avaliados sob as condições do STC. Apesar das vantagens apresentadas por esta padronização, ela não é representativa para todas as condições encontradas em campo. Quando em operação em campo, parâmetros como irradiância, ângulo de incidência, espectro ou temperatura variam ao longo do tempo por conta de vários processos ambientais e interações entre a radiação solar e a atmosfera ou entre a radiação solar e os módulos fotovoltaicos. Deste modo os parâmetros que influenciam o processo de geração elétrica acabam apresentando valores muito diferentes dos apresentados nas condições padrão. Esta diferença não é considerada pelo processo de medição em laboratório, assim como a variabilidade dos fatores, levando a crer que a avaliação de eficiência sob o STC dificilmente será a que ocorre em campo. (ISHII, et al, 2013; DIRNBERGER, et al, 2014).

Devido às limitações do STC, outras condições e processos para avaliação de dispositivos foram desenvolvidos. Dentre eles pode-se citar a NOCT¹⁰ – do inglês *Nominal Operating Cell Temperature* ou a metodologia desenvolvida pelo projeto americano denominado *Photovoltaics for Utility Scale Applications (PVUSA)*¹¹, que adotam condições mais próximas às reais. Apesar dos esforços para aproximar os testes em laboratório das condições reais de operação dos módulos fotovoltaicos, a grande maioria das avaliações não utilizam um espectro que represente fielmente o encontrado em campo assim como não considera suas variações.

Para que avaliações mais exatas possam ser realizadas, primeiramente faz-se necessário entender como que cada parâmetro externo atua nos mecanismos de geração fotovoltaico de maneira isolada e combinada.

¹⁰ A NOCT é definida como a temperatura na qual as células fotovoltaicas operam caso os módulos estejam sob as seguintes condições: Irradiância de 800 W/m², temperatura do ar de 20°C e velocidade do vento de 20 m/s (PVEDUCATION, 2015).

¹¹ O projeto chamado PVUSA desenvolveu um método para a avaliação de módulos baseado na obtenção de uma equação para o cálculo da potência gerada a partir de grandezas como irradiância, temperatura e velocidade do vento. Tal equação é obtida através de regressão linear e dados ambientais e elétricos. Este método se tornou muito popular nos Estados Unidos da América (Myers, 2009)

Desta forma metodologias podem vir a ser desenvolvidas e aprimoradas para que representem mais fielmente as condições em campo e deem resultados mais realísticos. Uma vez que parâmetros como a irradiância e temperatura já possuem efeitos conhecidos, pesquisas a respeito do espectro e suas variações precisam continuar sendo realizadas para que possam ser consideradas nos processos de avaliação dos dispositivos fotovoltaicos.

2.4.4. Influências das variações espectrais nos dispositivos fotovoltaicos

Os dispositivos fotovoltaicos são espectralmente seletivos e por isso as variações do espectro afetarão seu processo de conversão de energia. As variações espectrais possuem um efeito direto na corrente fotogerada pelos dispositivos fotovoltaicos, influenciando, através dela, a corrente total produzida. Segundo Betts (2004) estas variações não influenciam diretamente na tensão de circuito aberto ou no Fator de Forma em módulos testados por ele (Silício Cristalino, Amorfo de uma única, dupla e tripla junção). Os impactos espectrais ocorrem na corrente de curto-circuito e seus efeitos acabam afetando o valor da eficiência. Por isso em algumas metodologias para avaliação das influências do espectro na conversão fotovoltaica utilizam a corrente de curto-circuito como parâmetro de avaliação. Nestas metodologias a corrente de curto-circuito é aproximada à corrente fotogerada assumindo que as resistências possuem baixos efeitos nos módulos e que sua montagem e materiais utilizados não afetam nas medições.

Pesquisas recentes têm calculado o impacto do espectro na conversão fotovoltaica através do parâmetro de descasamento espectral (parâmetro M descrito pela Equação 2.27) definido na norma ASTM E973 - *Standard Test Method for Determination of the Spectral Mismatch Parameter Between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell* ou na IEC 60904-7 *Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*. Segundo a norma ASTM E973 (ASTM, 2015), o parâmetro M é uma medida do erro

introduzido durante a avaliação de dispositivos fotovoltaicos causado pelo descasamento entre as respostas espectrais do dispositivo testado e do de referência, além da diferença entre os espectros da lâmpada utilizada no teste e a lâmpada na qual o aparelho de referência foi calibrado. Nos estudos a respeito dos impactos espectrais em módulos solares, ele recebe o nome de Fator Espectral (do inglês *Spectral Factor* – SF) e é utilizado em um contexto diferente do expresso na norma.

$$M = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G(\lambda) RE_T(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} G(\lambda) RE_R(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} G_{STC}(\lambda) RE_R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_{STC}(\lambda) RE_T(\lambda) d\lambda} \quad (2.27)$$

Sendo:

M : Parâmetro de descasamento espectral

$G(\lambda)$: Irradiância espectral incidente no dispositivo avaliado (W/m^2)

$RE_T(\lambda)$: Resposta espectral do dispositivo avaliado (A/W)

$G_{STC}(\lambda)$: Irradiância espectral incidente no dispositivo de referência (W/m^2)

$RE_R(\lambda)$: Resposta espectral do dispositivo de referência (A/W)

λ_1 e λ_2 : Comprimentos de onda que limitam a resposta espectral do dispositivo avaliado (nm)

λ_3 e λ_4 : Comprimentos de onda que limitam a resposta espectral do dispositivo de referência (nm);

O Fator Espectral (SF) é utilizado para indicar o grau de casamento entre a resposta espectral do dispositivo avaliado e o espectro em campo, comparando-o com o casamento entre a resposta deste mesmo dispositivo e o espectro padrão. Quando seu valor é maior que a unidade, significa que há ganho espectral, ou seja, que o espectro em campo se encaixa mais à resposta espectral que o padrão. Caso o Fator Espectral seja menor que a unidade, passa a ocorrer perdas espectrais aonde o espectro padrão se encaixa melhor com a resposta espectral do que o obtido em campo. A

equação que descreve este fator pode ser obtida a partir da Equação 2.27 considerando que o dispositivo de referência é um Piranômetro de termopilha (que possui uma resposta espectral constante e muito próxima da unidade desde 200 nm até 4000 nm) obtendo-se a Equação 2.28. Para seu cálculo, utilizam-se dados espectrais coletados com espectrômetros e dados a respeito das respostas espectrais dos módulos que está sendo avaliado.

$$SF = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G(\lambda) RE_T(\lambda) d\lambda \times \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} G_{STC}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} G(\lambda) d\lambda \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_{STC}(\lambda) RE_T(\lambda) d\lambda} \quad (2.28)$$

Sendo:

SF : Fator Espectral

$G(\lambda)$: Irradiância espectral incidente no dispositivo avaliado (W/m^2)

$RE_T(\lambda)$: Resposta espectral do dispositivo avaliado (A/W)

$G_{STC}(\lambda)$: Irradiância espectral incidente no dispositivo de referência (W/m^2)

$RE_R(\lambda)$: Resposta espectral do dispositivo de referência (A/W)

λ_1 e λ_2 : Comprimentos de onda que limitam a resposta espectral do dispositivo avaliado (nm)

λ_3 e λ_4 : Comprimentos de onda que limitam a resposta espectral do dispositivo de referência (nm)

No caso das células de multijunção, a Equação 2.28 pode ser reescrita no formato da Equação 2.29 (FERNÁNDEZ, et al, 2014). Neste caso a resposta espectral utilizada para o cálculo do Fator Espectral é a da camada semicondutora que produz a menor corrente.

$$SF = \frac{\min \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G(\lambda) RE_T(\lambda) d\lambda \right) \times \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} G_{STC}(\lambda) d\lambda}{\min \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_{STC}(\lambda) RE_T(\lambda) d\lambda \right) \times \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} G(\lambda) d\lambda} \quad (2.29)$$

Sendo:

SF : Fator Espectral de um módulo fotovoltaico de multijunção;

$G(\lambda)$: Irradiância espectral incidente no dispositivo avaliado (W/m^2)

$RE_T(\lambda)$: Resposta espectral do dispositivo avaliado (A/W)

$G_{STC}(\lambda)$: Irradiância espectral incidente no dispositivo de referência (W/m^2)

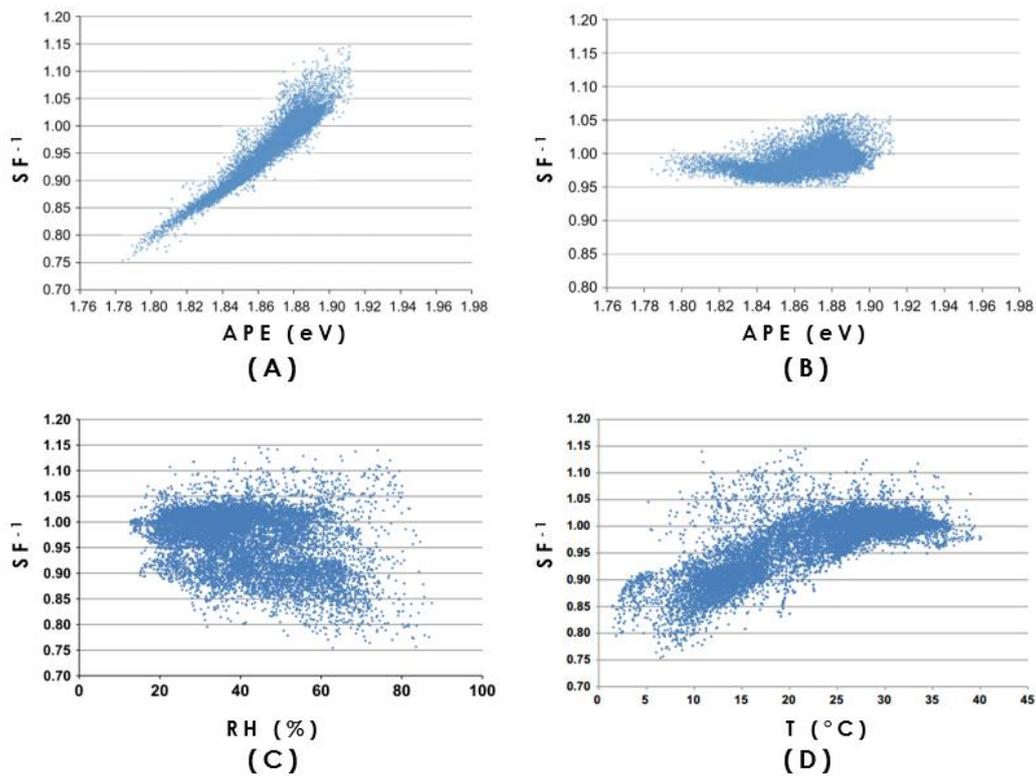
$RE_R(\lambda)$: Resposta espectral do dispositivo de referência (A/W)

λ_1 e λ_2 : Comprimentos de onda que limitam a resposta espectral do dispositivo avaliado (nm)

λ_3 e λ_4 : Comprimentos de onda que limitam a resposta espectral do dispositivo de referência (nm)

Muitos resultados de SF foram obtidos para diversas regiões do mundo para várias tecnologias fotovoltaicas. Nofuentes, et al. (2014) por exemplo, calcularam este fator para alguns módulos de tecnologias diferentes e os relacionou com valores de APE de vários espectros e parâmetros atmosféricos (alguns resultados são mostrados na Figura 2.48). Dirnberger et al. (2014) utilizaram uma abordagem muito parecida e plotou gráficos de SF versus Irradiância e APE para várias tecnologias, calculando também os impactos mensais na geração (alguns resultados são mostrados na Figura 2.49). Ishii et al.(2013) calcularam o SF de várias tecnologias para várias cidades japonesas sob condições de tempo nublado e ensolarado, plotando gráficos ao longo do tempo (alguns resultados encontram-se na Figura 2.50). Outros grupos também realizaram pesquisas nesta área, e a grande maioria dos resultados apresentam pontos em comum como o fato do Fator Espectral crescer no mesmo sentido que o valor da energia média dos fótons e módulos que possuem uma resposta espectral menor serem mais influenciados pelas variações espectrais.

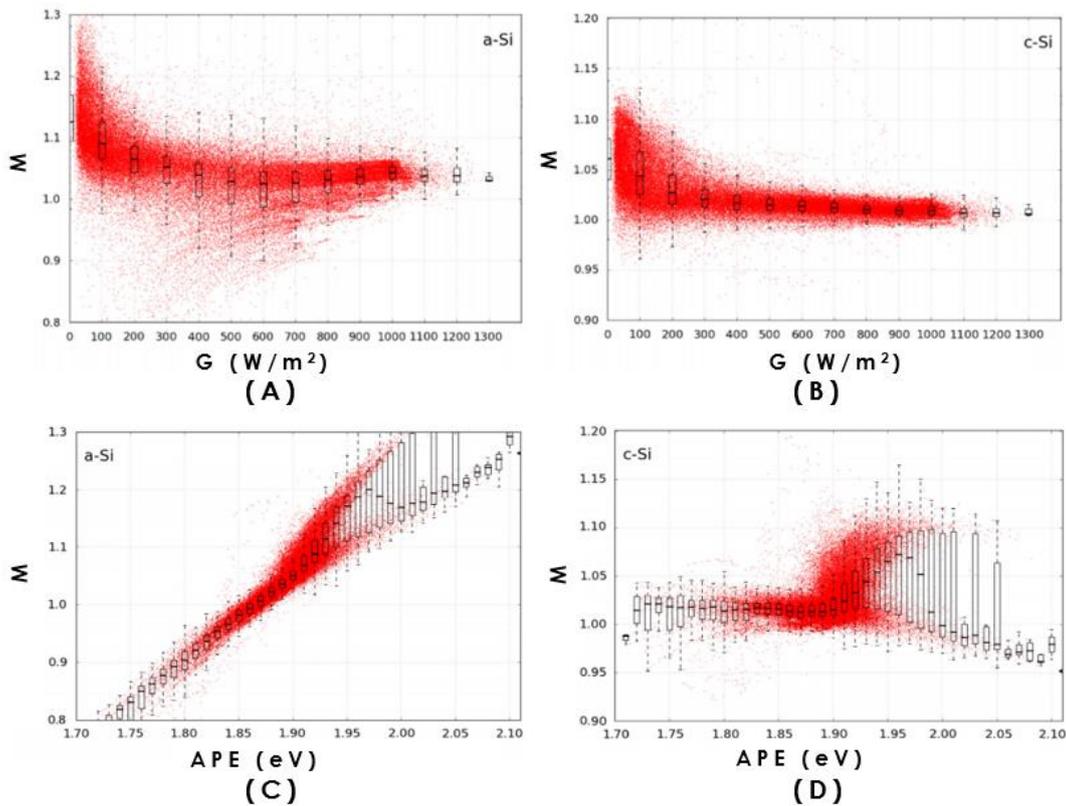
Figura 2.48 – Resultados encontrados por Nofuentes e colaboradores.



Os gráficos trazem a Resposta Espectral comparada ao valor do APE para um módulo de a-Si e m-Si em (A) e (B), respectivamente. De acordo com estes resultados melhores casamentos espectrais entre o espectro em campo e a resposta espectral de ambos os módulos ocorrem para espectros com maiores valores de Energia Média dos Fótons. Em (C) e (D) o fator SF é comparado à umidade relativa e à temperatura ambiente para o módulo de a-Si, respectivamente. Neste caso é possível observar que melhores casamentos espectrais tendem a ocorrer para valores maiores de temperatura e não apresenta uma relação clara com a umidade relativa do ar.

Fonte: Adaptado de Nofuentes, et al. (2014).

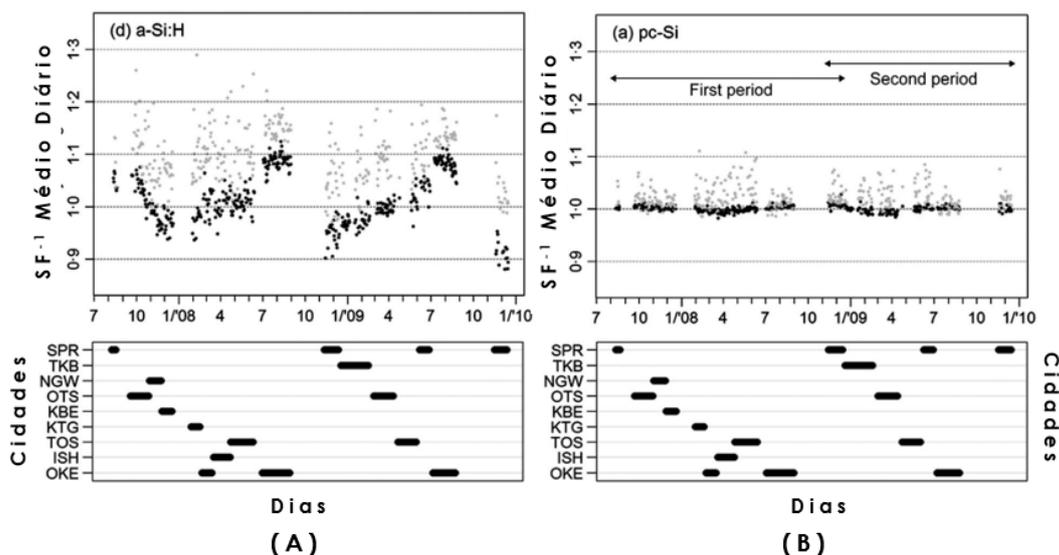
Figura 2.49 – Resultados encontrados por Dirnberger e colaboradores.



Os gráficos trazem o parâmetro de descasamento espectral (M) comparado ao valor da Irradiância para o módulo de a-Si e m-Si em (A) e (B), respectivamente. De acordo com estes resultados melhores casamentos entre o espectro em campo e a resposta espectral dos módulos avaliados ocorreram para menores valores de irradiância incidente. Já em (C) e (D) o fator M é comparado ao valor do APE para o módulo de a-Si e m-Si, respectivamente, onde se observa que melhores casamentos tendem a ocorrer para maiores valores de Energia Média dos Fótons (APE) dos espectros.

Fonte: Adaptado de Dirnberger, et al. (2014).

Figura 2.50 – Resultados encontrados por Ishii e colaboradores.



Os gráficos trazem a Resposta Espectral ao longo do tempo para condições de céu nublado (pontos cinza-claros) e condições de céu limpo (pontos pretos) para os módulos de a-Si e p-Si em (A) e (B), respectivamente. Na tabela situada abaixo dos gráficos encontra-se o tempo no qual os módulos permaneceram em algumas cidades japonesas. De acordo com estes gráficos pode-se perceber primeiramente que melhores casamentos espectrais ocorreram em dias sob a condição de céu nublado para ambas as tecnologias avaliadas. Em segundo lugar pode-se perceber também que o módulo de a-Si apresentou uma variabilidade maior dos seus valores de SF^{-1} quando comparado com o módulo de m-Si, indicando que provavelmente ele é mais influenciável pelas variações espectrais.

Fonte: Adaptado de Ishii, et al. (2013).

Como o fator espectral SF é calculado a partir de dados espectrais coletados, um fator que utilizasse dados reais dos módulos fotovoltaicos foi desenvolvido e utilizado em algumas pesquisas. Betts (2004) utilizou um parâmetro descrito pela Equação 2.30 de normalização que é baseado na Equação 2.20, 2.28 e 2.29 e com ele obteve alguns resultados que indicam o casamento espectral a partir de medidas em campo e os relacionou com parâmetros como Irradiância e Temperatura que são mostrados na Figura 2.51.

$$\left(\frac{I_{CC}}{G}\right)_{[NORMALIZADO\ COM\ STC]} = \left(\frac{I_{CC\ CAMPO}}{G}\right) \left(\frac{I_{CC\ STC}}{G_{STC}}\right)^{-1} \quad (2.30)$$

Sendo:

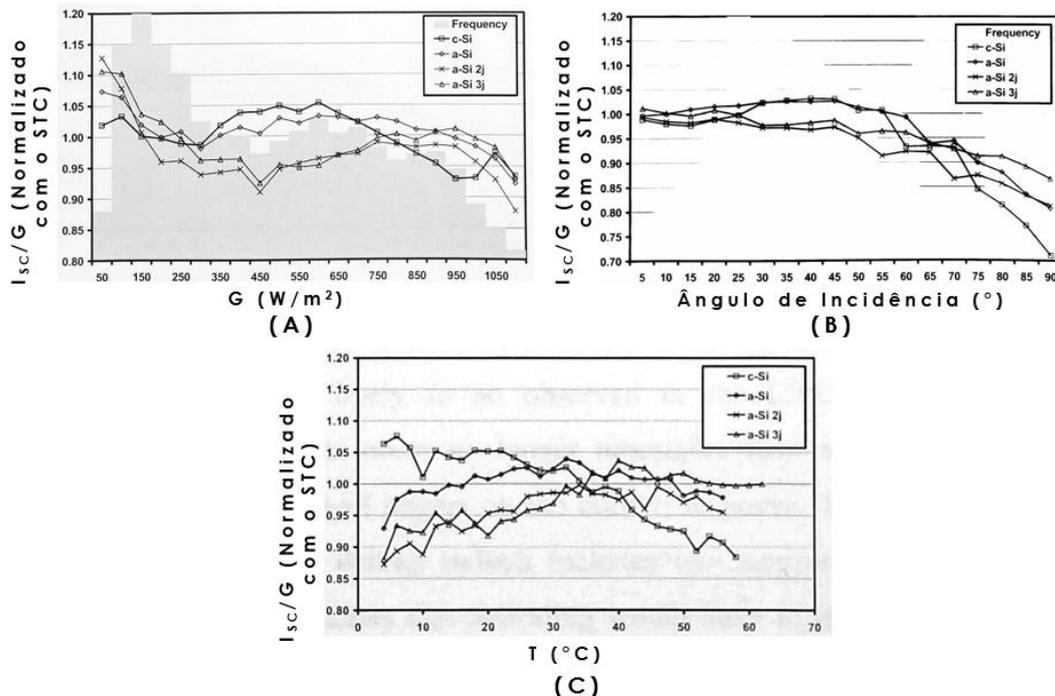
$I_{CC\ CAMPO}$: Corrente de curto circuito do dispositivo fotovoltaico em campo (A)

G : Irradiância espectral incidente no dispositivo em campo (W/m^2)

$I_{CC\ STC}$: Corrente curto circuito do dispositivo fotovoltaico no STC (A)

G_{STC} : Irradiância espectral incidente no dispositivo no STC (W/m^2)

Figura 2.51 – Resultados encontrados por Betts.



Os gráficos mostram a variação do fator medido por ele de acordo com parâmetros como Irradiância em (A), ângulo de incidência em (B) e temperatura em (C) para tecnologias como Silício cristalino, amorfo, amorfo de dupla e tripla junção. Como pode ser observado nos gráficos, melhores casamentos tenderam a ocorrer para menores valores de irradiância incidente e ângulo de incidência da radiação para todas as tecnologias avaliadas. Já o efeito da Temperatura se mostrou dependente da tecnologia.

Fonte: Adaptado de Betts (2004).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu, basicamente, em três atividades principais: a relacionada à construção e caracterização dos módulos fotovoltaicos a serem estudados; a relacionada às atividades técnicas para o desenvolvimento e montagem de um sistema de coleta de dados; e a última que está relacionada à triagem dos dados e o cálculo de fatores para a realização dos estudos.

Na primeira parte deste capítulo serão apresentados como os minimódulos de Arseneto de Gálio e de Tripla Junção foram construídos, dando informações a respeito dos materiais utilizados e de sua estrutura. Além disso, as características elétricas de todos os módulos estudados obtidas em dois simuladores solares sob o espectro padrão AM1.5G são apresentados.

Na segunda parte deste capítulo a atividade técnica é descrita, apresentando o sistema de coleta de dados em conjunto com as duas unidades que a compõem. Detalhes a respeito de como elas foram montadas e sobre seus princípios de funcionamento são dadas em conjunto com a descrição e especificação dos sensores e atuadores utilizados.

A terceira e última parte trata da atividade relacionada à análise dos dados. Nela todos os dados que estão sendo coletados são apresentados em conjunto com a maneira como foram classificados e agrupados. Além disso esta parte também traz informações a respeito da metodologia da análise dos efeitos espectrais sobre os módulos, apresentando quais os fatores foram calculados.

3.1. TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS AVALIADAS

Dentre as diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos, seis foram utilizadas neste trabalho, sendo quatro comuns no mercado e duas especiais utilizadas para complementar a avaliação. Os módulos comerciais utilizados foram os de Silício monocristalino (m-Si), policristalino

(p-Si), microcristalino (μ -Si), e amorfo (a-Si) e os especiais foram minimódulos de Arseneto de Gálio (GaAs) e Tripla Junção (TJ). As quatro primeiras tecnologias de módulos são comumente utilizadas em aplicações terrestres, enquanto que as duas últimas foram confeccionados com células solares de uso espacial remanescentes dos satélites desenvolvidos pelo INPE SACI 2 e CBERS 4. As especificações dos módulos de Silício informadas pelos fabricantes seguem na Tabela 3.1 em conjunto com as especificações das células dos minimódulos.

Tabela 3.1 – Dados dos módulos de uso terrestre e células de uso espacial informados pelos fabricantes.

Unidade	Tecnologia	Fabricante	Modelo	Parâmetros Elétricos					Parâmetros Térmicos	
				P_{MAX} (Wp)	I_{MP} (A)	V_{MP} (V)	I_{CC} (A)	V_{CA} (V)	α (mA /°C)	β (mV /°C)
				Módulo	m-Si	Siemens	SM10	10,0	0,61	16,3
	p-Si	Solarex	MSX-10	10,0	0,58	17,1	0,60	21,1	0,390	-80
	μ -Si	SOLARIS	S10P	10,0	0,60	17,6	0,66	21,5	0,180	-79
	a-Si	Heizmann	KSMM106	2,0	0,12	14,5	¹²	22,5	0,083	-65
Célula	GaAs ¹³	EEV	-	0,21	0,24	0,87	0,26	1,03	0,167	-2,1
	TJ ¹²	SISP	-	0,43	0,19	2,30	0,20	2,60	0,108	-6,8

Fonte: Produção do Autor.

3.1.1. Confeção dos minimódulos de Arseneto de Gálio e Tripla Junção

As células de Arseneto de Gálio já se encontravam soldadas em série entre si em dois cupons com seis células cada, enquanto que para as de Tripla Junção foi obtido um pequeno lote com dez unidades que já possuíam terminais e coverglass, mas necessitavam de serem conectadas entre si. Deste modo, primeiramente os cupons das células de Tripla Junção foram confeccionados através da soldagem em série de cinco células. Por serem

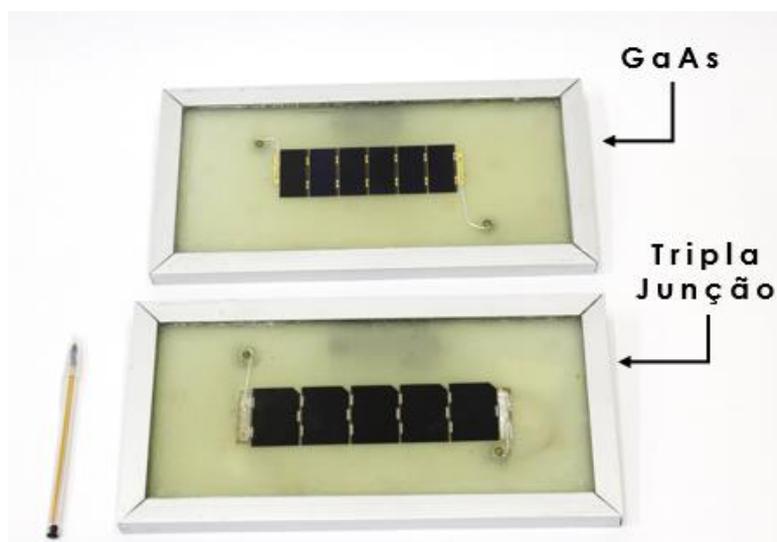
¹² Dados não informados pelo fabricante.

¹³ Dados para o Espectro AM0.

componentes eletrônicos delicados, tais células exigem técnica e cuidados especiais durante a soldagem de conexões em seus terminais devido ao grande risco de danificá-las. Por isso, elas foram soldadas através de um processo conhecido como Solda Ponto na Orbital Engenharia Ltda., empresa do setor aeroespacial especializada na montagem de painéis solares para uso em satélites.

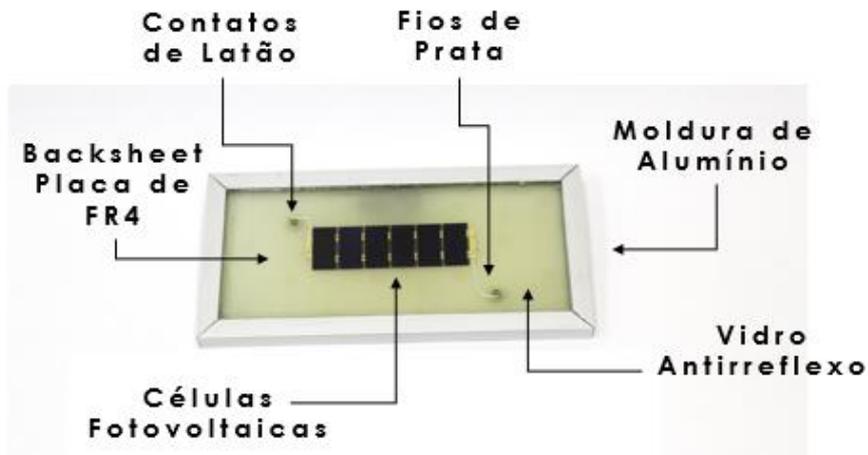
Dois cupons de células TJ e dois de células de GaAs foram fixados individualmente com cola de silicone em placas de 30 x 15 cm de FR4 (placas de tecido de vidro recobertas com resina epóxi). Estas placas foram escolhidas por apresentarem baixos coeficientes de expansão térmico, não absorverem água da chuva e possuir resistência mecânica para garantir a sustentação necessária para as células quando em operação em campo. Os cupons colados nas placas FR4 foram encapsulados com vidro antirreflexo e molduras de alumínio e selados com cola de silicone. Para evitar a presença de umidade dentro dos módulos, foi injetado uma atmosfera de nitrogênio puro entre o vidro e as células. Nas conexões internas entre o cupom e os terminais de latão dos minimódulos foram utilizados fios especiais de prata para facilitar a soldagem e minimizar a resistência elétrica. Na Figura 3.1 são mostradas fotos dos dois minimódulos montados e na Figura 3.2 é apresentada uma imagem de um minimódulo ilustrando as suas partes e componentes.

Figura 3.1 – Minimódulos especiais de células de TJ e GaAs.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.2 – Minimódulos e suas partes e componentes.



Fonte: Produção do Autor.

3.1.2. Caracterização dos Módulos Fotovoltaicos

Antes de serem colocados em campo, todos os módulos fotovoltaicos tiveram suas curvas $I \times V$ medidas em laboratório sob as condições do STC. Foram realizadas três medições, sendo duas sob o espectro AM1.5G e uma sob o espectro AM0. As avaliações sob o espectro terrestre ocorreram no IEEE da USP nos simuladores da Optosol e da Pasan, ambas com a utilização de lâmpada pulsada de Xenônio. Já as avaliações sob o espectro extraterrestre foram realizadas no Laboratório de Integração e Teste (LIT) do INPE no LAPPS (*Large Area Pulsed Solar Simulator*), que também utiliza lâmpada pulsada de Xenônio. As especificações dos três simuladores estão na Tabela 3.2 e as curvas $I \times V$ obtidas em cada um dos simuladores estão no Anexo 1. Na Tabela 3.3 estão listados alguns parâmetros elétricos dos módulos obtidos através de suas respectivas curvas $I \times V$.

Tabela 3.2 – Especificações dos Simuladores Solares do IEEE e do LIT.

Modelo	Fabricante	País	Área Iluminada
Sol 2mx2m	Optosol	Alemanha	2m x 2m
HighLight LMT	PASAN	Suíça	2m x 2m
LAPPS	Alpha-Ômega	EUA	4m X 4m

Fonte: Produção do Autor.

Tabela 3.3 – Características dos módulos fotovoltaicos obtidos a partir das curvas I x V sob os espectros AM1.5G e AM0.

Tecnologia	Espectro / Simulador	I_{CC} (A)	V_{CA} (V)	I_{PMP} (A)	V_{PMP} (V)	P_{PMP} (W)	FF
a-Si	AM 1.5G PASAN	0,159	24,0	0,125	17,6	2,21	0,578
	AM 1.5G OPTOSOL	0,104	23,4	0,084	17,5	1,48	0,607
	AM0 LAPPS	0,187	24,2	0,146	17,8	2,60	0,574
μ-Si	AM 1.5G PASAN	0,698	21,9	0,642	17,8	11,5	0,749
	AM 1.5G OPTOSOL	0,674	21,8	0,617	18,0	11,1	0,759
	AM0 LAPPS	1,11	22,4	0,991	18,4	18,3	0,734
p-Si	AM 1.5G PASAN	0,582	20,7	0,533	16,5	8,80	0,730
	AM 1.5G OPTOSOL	0,538	20,5	0,493	16,6	8,20	0,743
	AM0 LAPPS	0,887	21,2	0,810	16,9	13,7	0,729
m-Si	AM 1.5G PASAN	0,715	19,9	0,659	15,4	10,1	0,713
	AM 1.5G OPTOSOL	0,640	19,8	0,606	15,9	9,61	0,760
	AM0 LAPPS	1,08	20,2	1,02	14,8	15,1	0,690
GaAs 1	AM 1.5G PASAN	0,187	5,40	0,168	4,30	0,72	0,714
	AM 1.5G OPTOSOL	0,142	5,26	0,125	4,19	0,52	0,703
	AM0 LAPPS	0,224	5,50	0,221	4,40	0,97	0,724
GaAs 2	AM 1.5G PASAN	0,190	6,16	0,183	5,39	0,99	0,845
	AM 1.5G OPTOSOL	0,147	6,08	0,137	5,31	0,73	0,813
	AM0 LAPPS	0,254	6,17	0,242	5,48	1,32	0,845
TJ 1	AM 1.5G PASAN	0,146	12,7	0,139	10,9	1,52	0,817
	AM 1.5G OPTOSOL	0,098	12,6	0,094	11,4	1,06	0,863
	AM0 LAPPS	0,176	12,9	0,169	11,6	1,95	0,862
TJ 2	AM 1.5G PASAN	0,146	12,7	0,140	10,9	1,52	0,819
	AM 1.5G OPTOSOL	0,100	12,6	0,095	11,3	1,08	0,857
	AM0 LAPPS	0,176	12,9	0,168	11,6	1,95	0,862

Fonte: Produção do Autor.

3.2. DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO SISTEMA DE COLETA DE DADOS

Nesta atividade foi realizado o desenvolvimento e montagem de um sistema de aquisição de dados espectrais e de desempenho de módulos fotovoltaicos (Saded). Ele foi instalado no Laboratório de Instrumentação Meteorológica - LIM no campus do INPE em Cachoeira Paulista - SP e tem por função fornecer dados espectrais da radiação solar local e parâmetros elétricos e térmicos dos módulos fotovoltaicos estudados.

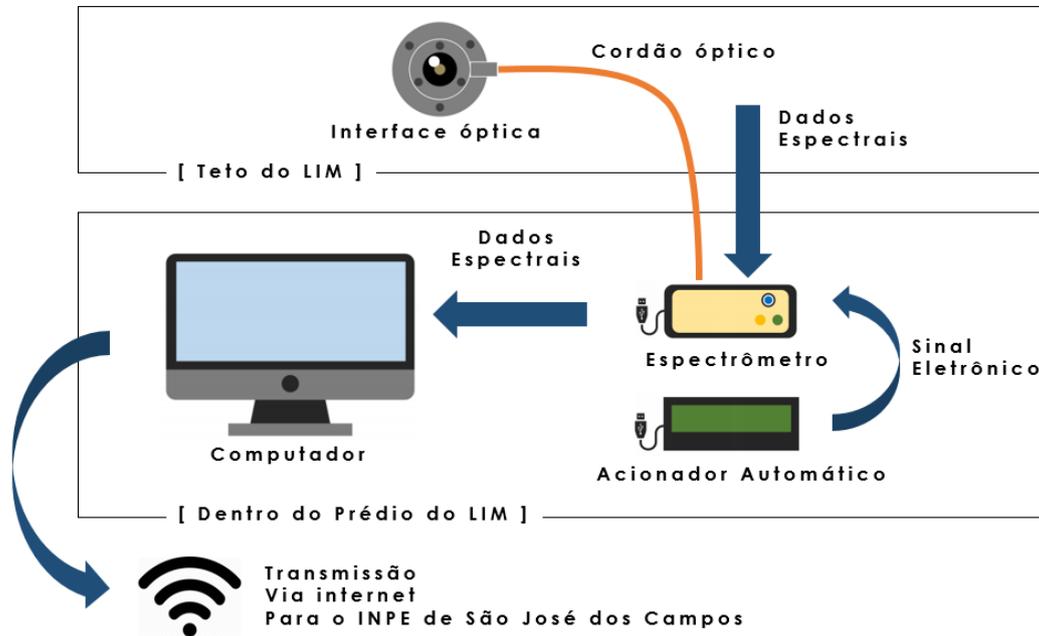
O Saded é constituído por duas unidades de coleta de dados que funcionam de maneira independente. A primeira foi denominada de Unidade de Coleta de Dados Espectrais (UCDE) e tem por objetivo coletar os espectros da radiação solar. Já a segunda foi denominada Unidade de Coleta de Dados de Desempenho (UCDD) e tem por função monitorar o desempenho dos seis módulos fotovoltaicos apresentados na sessão anterior. A UCDE foi montada no prédio do LIM, sendo que a interface óptica de captação da radiação solar foi instalada no teto aonde as condições para a aquisição de dados de espectros são adequadas (ausência de sombras e reflexos) e a UCDD foi instalada em um sítio de medições meteorológica localizado próximo ao mesmo prédio.

3.2.1. Unidade de Coleta de Dados Espectrais - UCDE

A Unidade de Coleta de Dados Espectrais foi desenvolvida para coletar os dados da distribuição espectral da radiação solar. Ela é constituída por um espectrômetro, um cordão óptico, um acionador eletrônico, uma interface óptica e um computador para armazenar os dados. Seu funcionamento ocorre da seguinte maneira: em determinados horários o acionador eletrônico envia um sinal para o espectrômetro para que a medição do espectro seja realizada. A radiação solar é então coletada pela interface óptica e através do cordão óptico é enviada para o espectrômetro que realiza a medição. Os dados são enviados para o computador, aonde um programa específico processa as informações e gera as curvas, armazenando-as em um banco de dados e enviadas para o INPE de São

Jose dos Campos via Internet. Na Figura 3.3 um esquema do UCDE é mostrando com seu fluxo de informações.

Figura 3.3 – Esquema do UCDE.

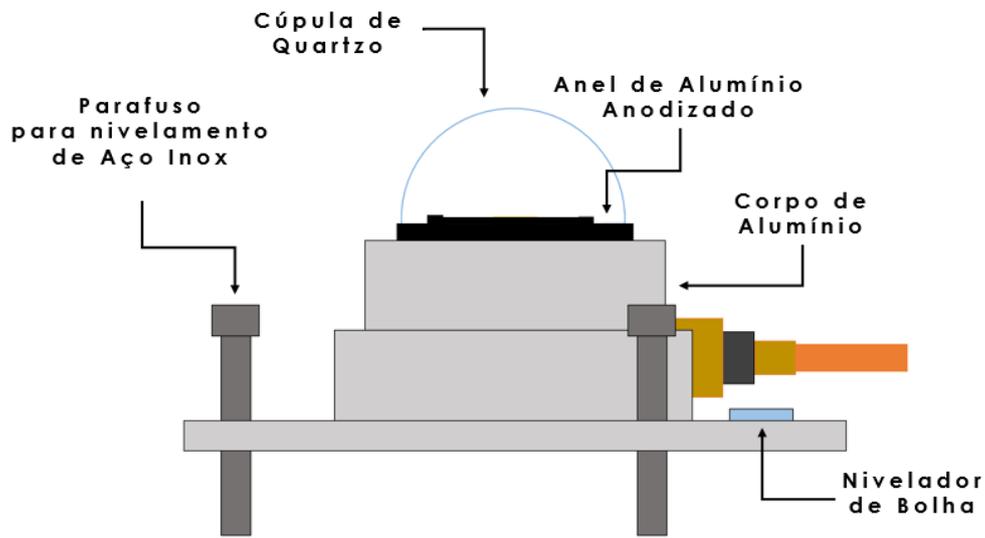


Fonte: Produção do Autor.

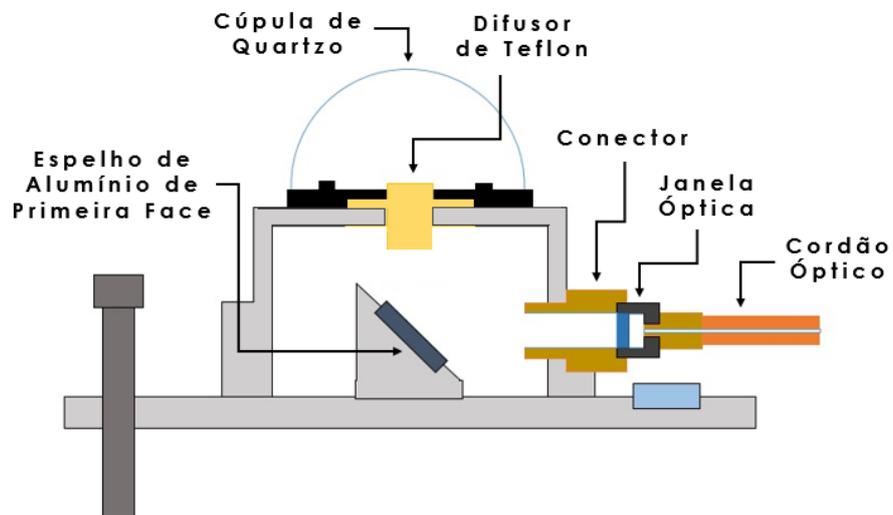
3.2.1.1. Interface Óptica

A interface óptica foi desenvolvida no Laboratório Associado de Sensores – LAS/INPE para captar a radiação solar e transmiti-la até um espectrômetro. Ela se fez necessária, pois o espectrômetro utilizado neste trabalho é um dispositivo sensível a altas temperaturas e a umidade, o que restringe sua operação ao laboratório. Por isso, para que a radiação solar chegasse até ele sem causar danos, foi necessário desenvolver este aparato que auxiliou as medições. Os requisitos para o seu desenvolvimento foram apresentar transmitância para radiação solar no intervalo espectral avaliado de modo que a radiação solar incidente sobre ele chegue até ao espectrômetro sem alterações, ser resistente às intempéries do meio ambiente e possuir um formato que facilitasse a sua instalação em campo. Tendo em vista tais requisitos, a interface foi desenvolvida e montada conforme ilustrado pelas Figuras 3.4 (a) e (b).

Figura 3.4 – Desenho esquemático ilustrativo da Interface Óptica – (A) Vista lateral externa e (B) secção transversal.



(A)



(B)

Fonte: Produção do Autor.

A interface óptica possui um difusor de Politetrafluoretileno (Teflon) com aproximadamente 7 mm de espessura que é protegido por uma cúpula de quartzo instalado em uma estrutura cilíndrica de alumínio. A estrutura cilíndrica de alumínio possui uma base no formato de um disco de 10 mm

de espessura equipada com um nível de bolha, três parafusos de aço inox para ajuste do nível, dois parafusos para fixação, uma saída para conexão com o cordão óptico e um compartimento para sílica-gel para a retirada da umidade no interior do dispositivo. Um espelho de alumínio de primeira face foi instalado internamente para direcionar a radiação solar que atravessa o difusor para a entrada do cordão óptico que é acoplada a uma janela óptica com conector SMA localizada na lateral da estrutura de alumínio. O cordão óptico possui 25 metros de comprimento e é constituído por uma fibra óptica com núcleo de 200 μm (abertura numérica de $0,22 \pm 0,02$) encapsulada com um material emborrachado que lhe confere uma certa flexibilidade e conectores tipo SMA nas extremidades para conexão do cordão com o espectrômetro e a saída óptica da interface. Na Figura 3.5 é mostrada uma foto da Interface com o cordão óptico.

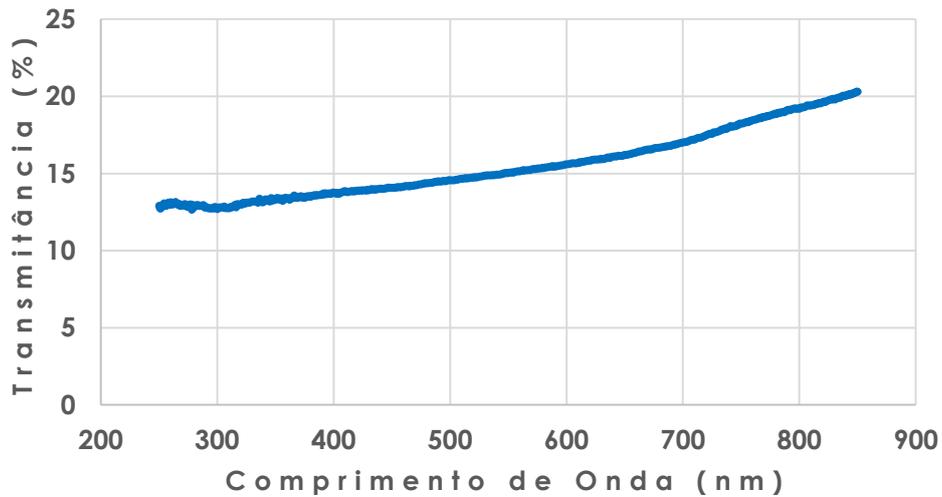
Figura 3.5 – Foto da interface óptica com o cordão óptico.



Fonte: Produção do Autor.

A transmitância do difusor foi medida no intervalo espectral entre 190 nm e 900 nm no Espectrofotômetro U-3501 da Hitachi do LAS/INPE. Esta medição foi realizada para que as características de transmissão da radiação através do difusor fossem conhecidas ao longo do espectro eletromagnético. O resultado desta medição é mostrado na Figura 3.6. Conforme pode ser observado, embora o sinal óptico seja muito atenuado pelo difusor, ele apresenta uma transmitância linear em toda a faixa espectral analisada.

Figura 3.6 – Transmitância Espectral Absoluta do difusor de teflon utilizado na Interface Óptica.

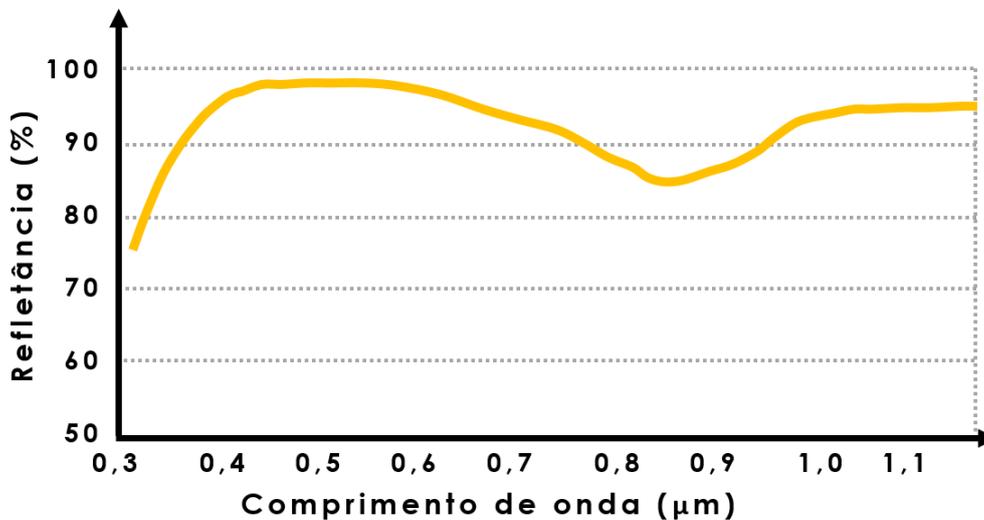


Fonte: Produção do Autor.

A cúpula situada sobre o difusor e a janela óptica de saída é de quartzo com transmitância em toda a faixa espectral entre 300 e 1100nm. Testes utilizando o Espectrômetro getSpec 2048 da getAMO e uma lâmpada de Xenônio (Fabricada pela Oriel, Modelo 81193, de 1000W) mostraram que o espectro coletado antes e depois de atravessar estes componentes não sofreu alterações.

Outro elemento que pode influenciar na medição do sinal espectral é o espelho interno à interface óptica. Para amenizar sua influência, o espelho utilizado foi um feito com alumínio reforçado de primeira face que apresenta uma refletância praticamente linear no intervalo de 300 nm a 1100 nm fabricado pela Edmund Optics. Na Figura 3.8 podemos observar a curva de refletância para o espelho metálico de primeira face do fabricante.

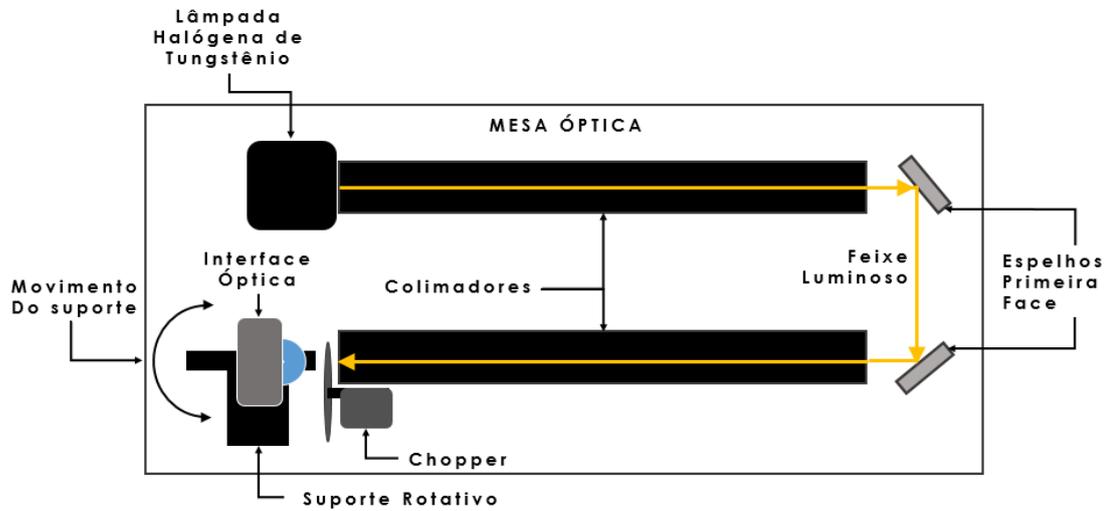
Figura 3.7 – Reflectância do espelho de primeira face fabricado pela Edmund Optics.



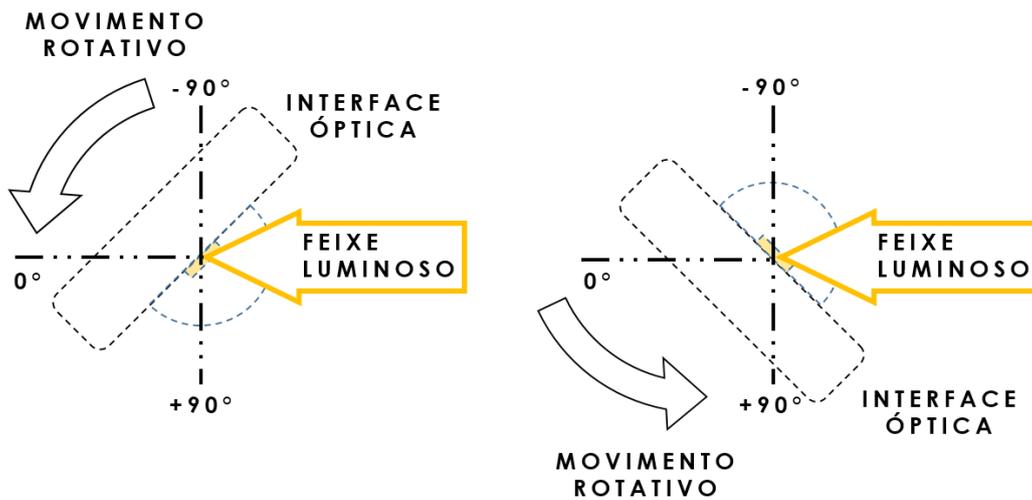
Fonte: Adaptado de Edmund (2015).

A resposta angular da interface foi medida utilizando-se a bancada óptica ilustrada pela Figura 3.9 – (A). Este sistema encontra-se montado no Laboratório de Energia Solar no LAS/INPE que utiliza como fonte de radiação uma lâmpada halógena de tungstênio da Newport modelo 6315, tubos colimadores de 3 metros de comprimento com aberturas de 40 mm de diâmetro, espelhos de primeira face de alumínio, goniômetro giratório com um motor de passo, voltímetro da Agilent modelo 34401 A e um computador com um programa para aquisição e processamento de dados desenvolvido em C++ (BERNI, et al., 2013). Para a realização da medida, a interface óptica foi instalada no suporte e ajustada de modo que o feixe de radiação atingisse o difusor durante todo o movimento do suporte. Devido à baixa relação sinal/ruído do sinal na saída da interface, foi utilizado um amplificador (Lock-In Amplifiers, Stanford, modelo SR850) e um Chopper (Stanford, modelo SR540). Durante a medição, a interface foi girada de -90 a $+90^\circ$ conforme ilustrado pela Figura 3.9 – (B) e o sinal óptico de saída da interface foi medido utilizando um fotodiodo (Newport modelo 818 UV-DB).

Figura 3.8 – (A) Bancada Óptica utilizado para a obtenção da resposta angular da Interface, (B) detalhe do deslocamento da Interface durante a medição da curva da resposta angular, onde o difusor é iluminado pelo feixe luminoso durante todo o deslocamento (de -90° a $+90^\circ$).



(A)



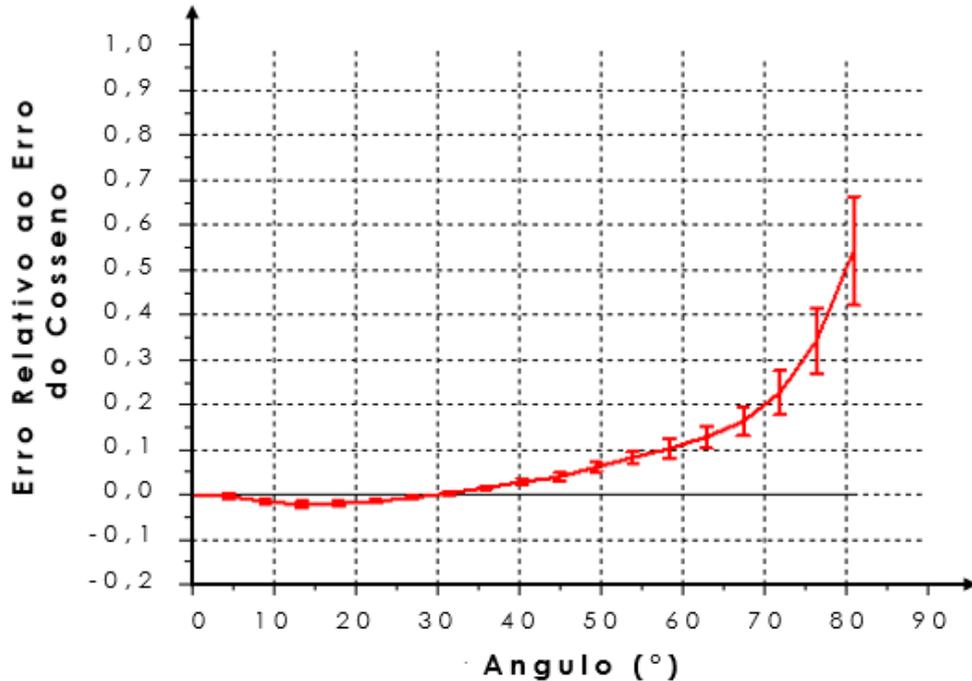
(B)

Fonte: Produção do Autor.

Foram realizadas várias medições e observou-se que a resposta angular da interface é aceitável somente para ângulos inferiores a 50° em relação a normal (ângulo zenital). A Figura 3.10 mostra a curva da resposta à lei dos cossenos para interface, que foi obtida através da Equação 3.1. Esta limitação na resposta angular da interface óptica não inviabiliza a sua

aplicação neste projeto, pois as medições realizadas estão restritas ao deslocamento solar máximo de 55° devido ao horário em que elas são realizadas.

Figura 3.9 – Erro relativo à lei dos cossenos para a Interface Óptica desenvolvida.



Fonte: Produção do Autor.

$$E_{R\theta} = \frac{I_A/I_0 - \cos(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (3.1)$$

Onde:

$E_{R\theta}$: Erro Relativo à lei dos cossenos;

I_A : Intensidade do sinal luminoso em um ângulo θ qualquer;

I_0 : Intensidade do sinal luminoso no ângulo de 0°;

$\cos(\theta)$: Cosseno do ângulo θ ;

3.2.1.2. Espectrômetro

O espectrômetro utilizado neste trabalho foi o modelo GetSpec-2048 da GetAMO que possui um detector CCD de 2048 *pixels*, grade de 300

linhas/mm, fenda de entrada de 50 μm , resolução de 2,4 FWHM, sensibilidade de 5000 counts/ μWms e faixa espectral de 200 a 1100 nm. Para o processamento dos dados ele utiliza um programa específico, sendo ele o getSoft versão 7.0 (32 bits), que realiza funções como plotagem de gráficos, suavização de curva, calibrações automáticas, etc. A Figura 3.11 mostra uma foto do espectrômetro utilizado em conjunto com o computador e o acionador.

Figura 3.10 – Foto do computador, espectrômetro e acionador do UCDE.



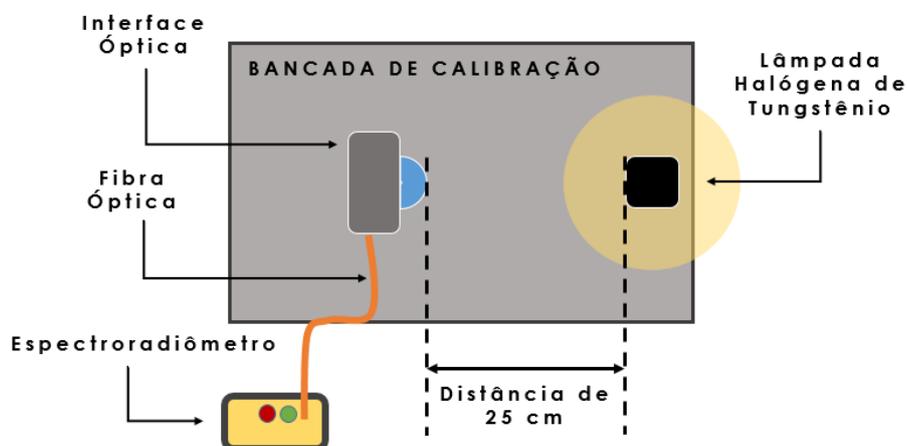
Fonte: Produção do Autor.

A aquisição dos dados espectrais pode acontecer de modo manual ou automático, sendo que para a operação automática é necessário que o espectrômetro receba sinais eletrônicos externos. Neste trabalho o sistema foi concebido para operação automática e para isso foi necessário o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico que gerasse um sinal de acionamento do espectrômetro. Com este sinal o software getSoft (programado para esta finalidade) lê os dados enviados pelo getSpec e gera o gráfico do espectro, que são gravados automaticamente no disco rígido do computador em seguida.

3.2.1.2.1. Verificação da Interface Óptica e do espectrômetro

Para que os dados gerados pela Unidade de Coleta de Dados Espectrais possam ser utilizados quantitativamente e qualitativamente é necessário ter um alto grau de confiabilidade no mesmo, e isto só pode ser obtido se o sistema estiver devidamente calibrado. A calibração do espectrômetro em conjunto com o cordão e com a interface óptica consistiu em determinar o seu Fator de Calibração ou a Curva de Calibração a partir de um espectro de uma lâmpada calibrada. Normalmente a calibração obedece a normas nacionais e internacionais e é realizado por laboratórios devidamente acreditados a partir de padrões com rastreabilidade. Neste trabalho optou-se por realizar a calibração no próprio Laboratório de Energia Solar do LAS, onde, procurou-se atender às recomendações do *National Institute of Standards and Technology* (NIST), que foi o órgão responsável pela calibração da lâmpada utilizada (YOON; GIBSON, 2011). O procedimento de calibração foi realizado em uma bancada de teste, através da medição do espectro emitido por uma lâmpada halógena de tungstênio de 200W e faixa espectral de 250 nm a 1100 nm, fabricada pela Oriel Instruments, Modelo 63355, calibrada com certificação FEL NIST e menos de 50 horas de utilização. Na Figura 3.11 é mostrado no desenho esquemático, onde pode-se observar o posicionamento da lâmpada Halógena e da interface óptica.

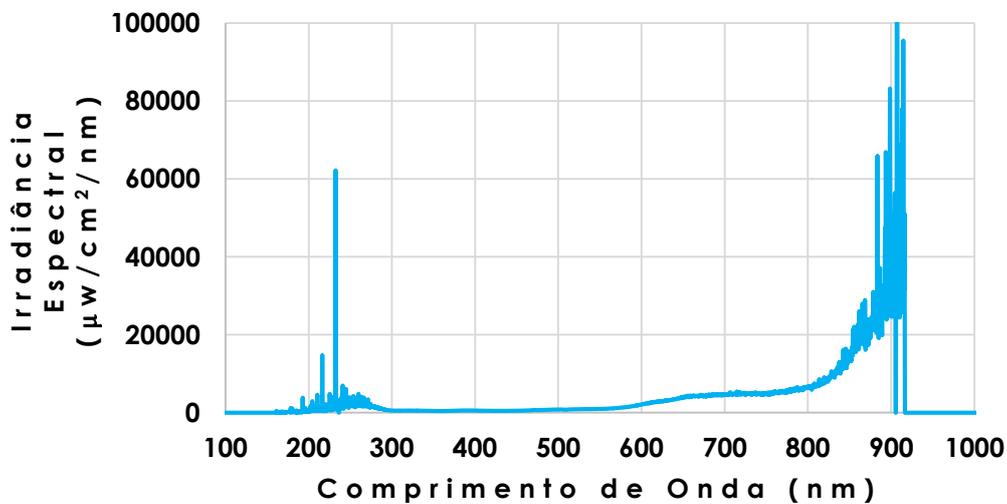
Figura 3.11 – Esquema do sistema utilizado para calibrar o conjunto formado pelo espectrômetro, cordão óptico e interface óptica.



Fonte: Produção do Autor.

O espectro desta lâmpada foi medido e comparado com o espectro informado pelo fabricante através do software do GetSpec – 2048, gerando uma curva de correção que é aplicada automaticamente em todos os dados de espectro obtidos pelo conjunto. A aplicação do fator de calibração sobre os espectros adquiridos elimina os erros sistemáticos devido a ótica de entrada do espectrômetro e corrige as perdas ocasionadas pelos elementos que compõem a interface óptica. Na Figura 3.12 pode ser observada a curva de calibração utilizada.

Figura 3.12 – Curva espectral de calibração utilizada.



Fonte: Produção do Autor.

3.2.1.3. Acionador Automático do Espectrômetro

O Acionador Automático do espectrômetro também foi desenvolvido e montado no Laboratório de Energia Solar do LAS com a finalidade exclusiva de automatizar o processo de aquisição de espectro. Ele utiliza uma plataforma eletrônica de processamento denominada Arduino UNO, um relógio de tempo real, RTC (do inglês *Real Time Clock*) e um pequeno painel de cristal líquido (LCD) para exibir informações.

O Arduino UNO é uma plataforma digital que utiliza um microcontrolador ATmega328P para executar os mais diferentes programas. Ele possui catorze entradas/saídas digitais sendo seis saídas PWM, seis entradas analógicas, porta USB para comunicação com o computador, etc. Para sua

programação, o Arduino utiliza uma linguagem padrão baseada em Wiring muito próxima ao C ou C++ e pode ser realizada em um software específico obtido na Internet sem custos (ARDUINO, 2015). As especificações do Arduino estão na Tabela 3.4.

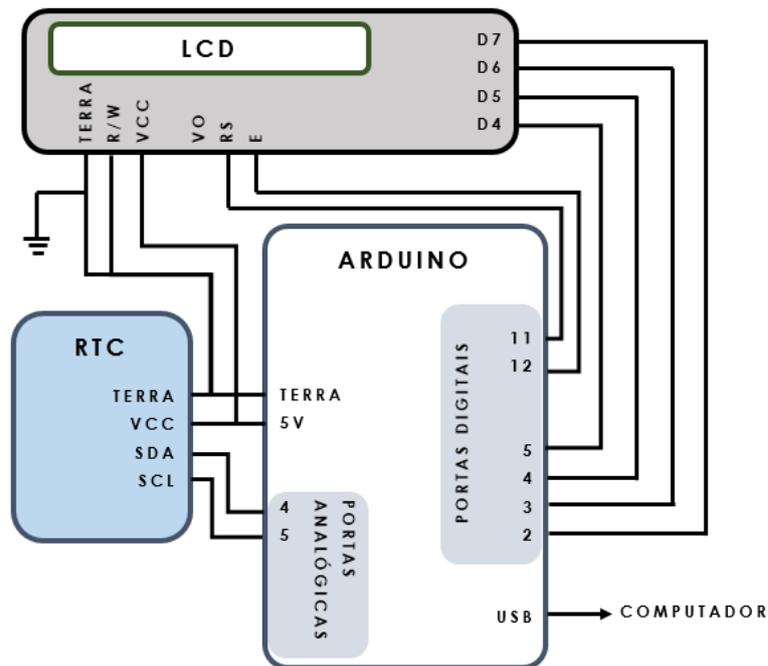
Tabela 3.4 – Especificações do Arduino UNO.

Microcontrolador	Atmega 328P
Tensão de Operação	5V
Quantidade de Entradas e Saídas Digitais	14
Quantidade de Entradas Analógicas	6
Corrente Contínua por Entrada Digital	20 ma
Memória Flash	32 KB (Atmega328P)
Memória SRAM	2 KB (ATmega328P)
Memória EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidade do Clock	16 MHz
Dimensões	68,6 mm x 53,4 mm

Fonte: Arduino (2015)

O Acionador Automático foi programado para enviar um sinal eletrônico através de um cabo RS-232 para o Espectroradiômetro. Estes sinais ocorrem de hora em hora entre as 8:00 horas e 18:00 horas e assim que o GetSpec os recebe a medição do espectro é realizada e o dado de espectro obtido é enviado para o computador. Para auxiliar na supervisão do sistema, os horários nos quais o sinal foi enviado são apresentados no painel LCD do dispositivo. O diagrama elétrico do acionador é mostrado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Diagrama elétrico do acionador automático do espectrômetro composto pelo Arduino, RTC e por um leitor LCD.



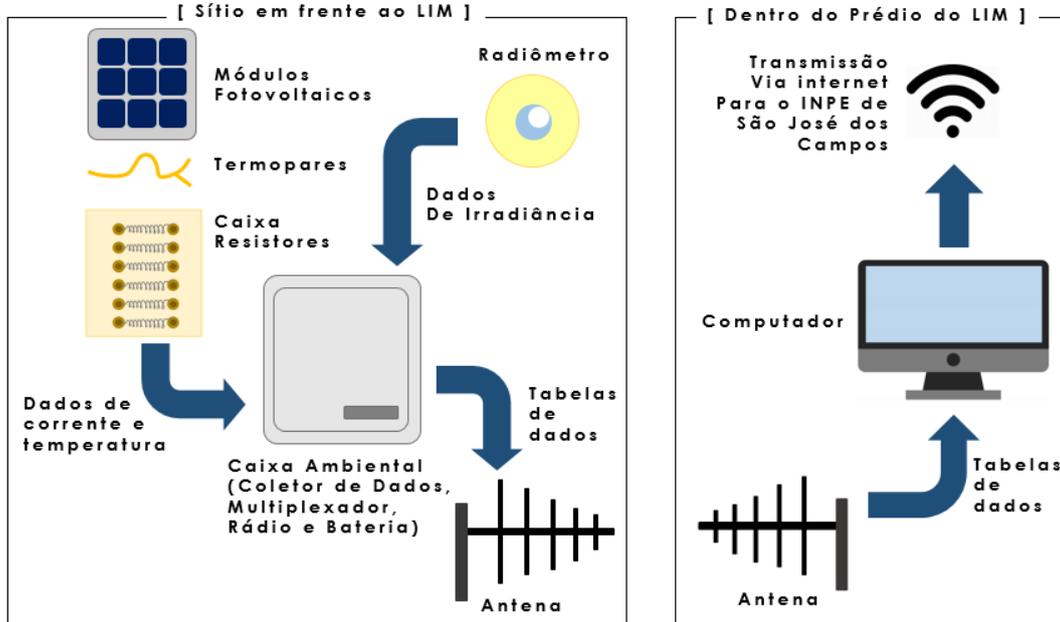
Fonte: Produção do Autor.

3.2.2. Unidade de Coleta de Dados de Desempenho - UCDD

A Unidade de Coleta de Dados de Desempenho foi desenvolvida para medir dados relacionados ao desempenho de módulos fotovoltaicos, como temperatura, corrente de curto circuito e irradiância solar incidente. Ela é constituída por um computador, um coletor de dados (em conjunto com um multiplexador), uma caixa ambiental selada para alojar a instrumentação em campo, um sistema de alimentação (com módulo fotovoltaico, bateria e gerenciador de carga), seis sensores de temperatura, um banco de carga com seis resistores paralelos, um radiômetro de termopilha com temperatura compensada (CMP11 da Kipp & Zonen), dois rádios e duas antenas para comunicação. A aquisição de dados nesta unidade ocorre de minuto a minuto, aonde o coletor de dados faz seis varreduras, sendo que a cada varredura cada sensor de temperatura, cada resistor e o radiômetro são medidos. As médias destas medições são gravadas na memória interna do coletor. Sempre que for necessário, estes dados podem ser acessados com a utilização do computador através de comunicação via

rádio. A Figura 3.14 mostra um esquema do UCDD onde é possível observar o fluxo de dados e os equipamentos utilizados.

Figura 3.14 – Esquema do UCDD.



Fonte: Produção do Autor.

3.2.2.1. Coletor de Dados e Multiplexador

O coletor de dados utilizado foi o modelo CR1000 da *Campbell Scientific*. Ele é basicamente um dispositivo eletrônico desenvolvido para realizar medições de grandezas ambientais e controle em campo. Ele é capaz de medir qualquer sensor que tenha como resposta de saída sinais de tensão, converter unidades, realizar cálculos e gerar dados estatísticos. Os dados são armazenados em tabelas criadas em sua memória interna e podem ser enviados a um computador via cabo através de comunicação RS-232 ou via rádio. Uma imagem do CR1000 e suas especificações seguem na Figura 3.15 e na Tabela 3.5 respectivamente.

Figura 3.15 – Coletor de Dados CR1000 utilizado.



Fonte: Campbell (2015)

Tabela 3.5 – Especificações do CR1000.

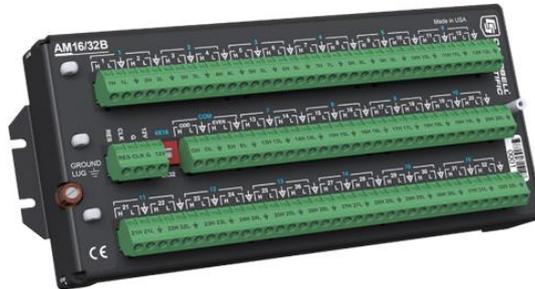
Taxa Máxima de Varredura	100Hz
Quantidade de Portas Analógicas	16 (<i>Single Ended</i>) e 8 (<i>Differential</i>)
Intervalo de leitura dos Terminais Analógicos	± 5V
Acurácia	0,12% da leitura + offset (-25°C e 50°C)
Portas para comunicação	1 CS I/O e 1 RS-232
Conversão Analógico/Digital	13 bits
Alimentação	9,6 a 16 V
Protocolos suportados	Pakbus, Modbus, DNP3, FTP, HTTP, XML, POP3, SMTP, Telnet, NTCIP, NTP, SDI-12, SDM
Temperatura de Funcionamento	-25°C a +50°C
Memória Interna	4 Mb

Fonte: Campbell (2015)

Conforme consta na Tabela 3.5, o coletor de dados CR1000 possui 16 terminais *single ended* ou 8 *differential*. No caso deste projeto, utilizou-se somente entradas diferenciais e como elas não foram suficientes, foi necessário utilizar um multiplexador. O multiplexador é um dispositivo eletrônico que seleciona as informações de dois ou mais sensores através de um único canal de entrada, permitindo que o coletor conectado a ele consiga ler mais sensores do que sua capacidade de portas de entrada permite. O modelo utilizado neste projeto foi o AM16/32B da *Campbell Scientific* que pode ser alimentado com tensões de 9,6V a 16 V e operar com temperaturas de -25°C a 50°C. Ele aumenta a capacidade de leitura

do coletor em até 32 sensores com um tempo mínimo de chaveamento de 1 ms. A Figura 3.16 mostra uma imagem deste multiplexador.

Figura 3.16 – Foto do multiplexador AM16/32B.



Fonte: Campbell (2015)

As entradas analógicas do coletor e do multiplexador utilizado possuem um limite máximo de tensão que pode ser lido. Este valor é de ± 5 V, mas o coletor de dados pode ser programado para utilizar fundo de escalas menores, dependendo da resolução necessária. A Tabela 3.6 mostra os fundos de escala que podem ser utilizados com suas respectivas resoluções. Neste projeto o intervalo utilizado foi de $\pm 2,5$ V que possui uma resolução de 333 μ V.

Tabela 3.6 – Intervalo de leitura do Coletor de Dados e suas respectivas resoluções.

Fundos de escala (V)	Resolução (μ V)
5,0	667
2,5	333
0,25	33,3
0,025	3,33
0,0075	1,00
0,0025	0,33

Fonte: Campbell (2015)

Para que um suprimento contínuo de energia seja mantido para o coletor de dados, este é alimentado por uma unidade de suprimento de energia formado por uma bateria (12V e 26 Ah), por um módulo fotovoltaico (fabricado pela Kyocera, modelo KS20T, 20W) e um dispositivo gerenciador de carga. Com a utilização deste arranjo.

3.2.2.2. Rádios e Antenas

Para o acesso dos dados coletados em campo a partir do computador situado no prédio do LIM foi utilizado a comunicação via rádio. Os rádios utilizados foram o modelo RF 401 da *Campbell Scientific* que operam nas frequências de 910 a 918 MHz e têm a função de atuarem como modem de campo enquanto conectados ao coletor de dados ou como modem base enquanto conectado a um computador. As antenas utilizadas nestes rádios são antenas do tipo Yaggi, modelo SLYAG-5TCG, com ganho de 9 dB. Uma foto do rádio é mostrada na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Rádio RF401 utilizado.



Fonte: Campbell (2015)

3.2.2.3. Sensores de temperatura

Para a medição da temperatura dos módulos fotovoltaicos, foram utilizados seis termopares do tipo K (feitos com as ligas Cromel e Alumel) instalados no centro da traseira de cada módulo, sendo um termopar por módulo. Eles foram calibrados no Laboratório de Calibração do LIT utilizando-se a norma *ASTM E 230-03: Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples* e as suas especificações constam na Tabela 3.7.

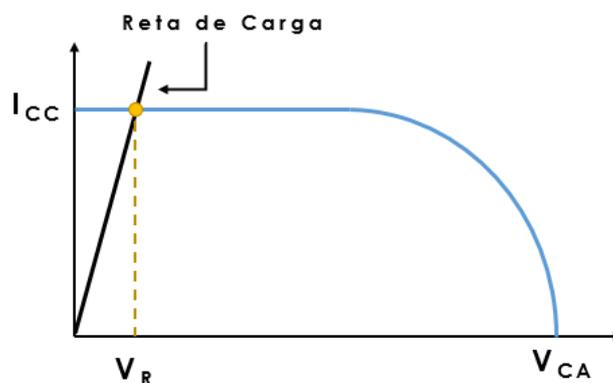
Tabela 3.7 – Especificações dos termopares utilizados no UCDD.

Fabricante	BR Ômega
Tipo	K (Alumel/Cromel)
Isolamento	Neoflon
Espessura	30 AWG
Temperatura máxima suportada	260°C
Intervalo de calibração	0 a 100°C

3.2.2.4. Banco de Carga

Para monitorar a corrente de curto-circuito de cada painel solar, foi desenvolvido um banco de carga composto por resistores de potência feitos com fios de Níquel-Cromo. A queda de tensão sobre cada resistor de carga é medida pelo coletor de dados e permite determinar a corrente que circula por ele. A determinação do valor da resistência de carga ideal para cada painel solar deveria ser tal que satisfizesse as condições de entrada de sinal do coletor de dados. Além disso, a corrente medida para cada painel também deveria ser mais próxima possível da corrente de curto-circuito. Deste modo, as curvas $I \times V$ dos módulos fotovoltaicos avaliados foram utilizadas para que retas de carga traçadas nas mesmas pudessem permitir determinar o valor da resistência adequada para cada painel, conforme exemplifica a Figura 3.18. A reta de carga deve ficar na região da curva que permita a maior corrente possível, ou seja, na região plana da curva. Em tal região pode-se observar que conforme o valor da tensão vai se aproximando de zero, a corrente vai se aproximando cada vez mais do valor da corrente de curto circuito. Assim, escolheu-se um valor de tensão que fosse próxima da corrente de curto-circuito, porém maior que zero e menor que 250 mV, que é o fundo de escala escolhida do coletor de dados. Utilizando a média dos valores de corrente de curto-circuito para cada módulo obtida nos dois simuladores solares utilizados da USP, calculou-se o valor da resistência de carga para cada um dos módulos. Os resultados seguem na Tabela 3.8.

Figura 3.18 – Reta de carga sobre a curva $I \times V$ utilizada para obter o valor da resistência de carga dos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Produção do Autor.

Tabela 3.8 – Valores calculados das resistências de carga para cada módulo.

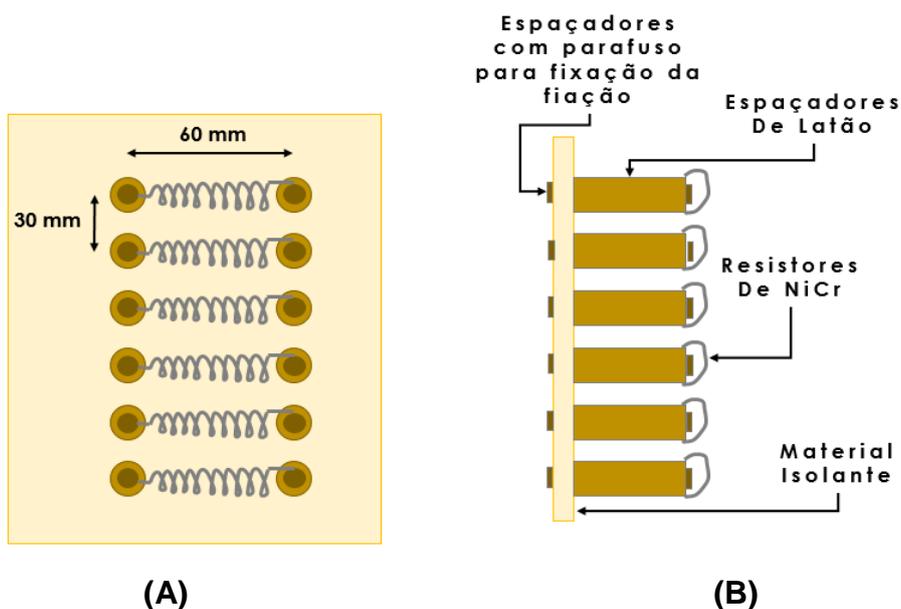
Módulo	Resistência de carga (Ω)	Potência dissipada (W)
a-Si	1,988	0,034
μ -Si	0,365	0,172
p-Si	0,447	0,140
m-Si	0,370	0,170
GaAs 1	1,549	0,042
TJ 1	2,132	0,032

Fonte: Produção do Autor.

O material utilizado para confeccionar cada resistência de carga foi a liga metálica de Níquel-Cromo (80% Ni e 20% Cromo), que foi escolhida por apresentar baixa variação de resistividade em função da temperatura no intervalo de operação dos módulos.

Os resistores foram fixados em uma placa de material isolante com espaçadores de latão e cobertos por uma estrutura de alumínio vazada para permitir ventilação natural de modo a dissipar o calor gerado pelas resistências. Um desenho esquemático da disposição dos resistores no banco de carga é mostrado na Figura 3.19. Após a confecção do banco de carga, cada resistência, incluindo a fiação de conexão com o coletor de dados, foi medida com um voltímetro de precisão (fabricante Agilent, modelo 34410A). Os resultados são apresentados na Tabela 3.9.

Figura 3.19 – Banco de carga – (A) vista frontal e (B) vista lateral.



Fonte: Produção do Autor.

Tabela 3.9 – Valores medidos das resistências utilizadas no Banco de Carga.

Resistência ligada ao módulo	Resistência Medida (Ω)
a-Si	2,062978
μ -Si	0,379114
p-Si	0,445318
m-Si	0,371032
GaAs 1	1,486130
TJ 1	1,837518

Fonte: Produção do Autor.

3.2.2.5. Radiômetro

Para medir a irradiância global incidente nos módulos instalados em campo, foi utilizado um piranômetro de termopilha, de modelo CM11 da Kipp & Zonen. Ele foi previamente calibrado no LIM e suas especificações seguem na Tabela 3.10. Esse piranômetro foi instalado em campo junto com os módulos fotovoltaicos, estando no mesmo plano que eles (em direção ao norte geográfico com uma inclinação de 22,7°).

Tabela 3.10 – Especificações do radiômetro CM11 da Kipp & Zonen.

Fabricante	Kipp & Zonen
Elemento Sensor	Termopilha
Faixa Espectral	305 a 2800 nm
Sensibilidade	4 a 6 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tempo de Resposta	15 s (95% da resposta)
Temperatura de Operação	de -40°C a 80°C
Dependência com a temperatura	< 1% (de -10°C a 40°C)

Fonte: Kipp & Zonen (2015)

3.3. ANÁLISE DOS DADOS

A atividade de análise dos dados consistiu no agrupamento dos dados coletados e no cálculo de alguns fatores. Os dados coletados durante o projeto são mostrados pela Tabela 3.11, onde são classificados quanto a sua origem, finalidade e intervalo de aquisição. Somente os dados coletados entre as 10:00h e 14:00h foram utilizados, pois houve a

preocupação de minimizar a influência do ângulo de incidência da radiação solar no processo de geração elétrica pelos módulos.

Tabela 3.11 – Dados coletados pelo Saded.

Tipo de dado	Finalidade	Intervalo de aquisição	Período de aquisição
Espectro da radiação solar	Estudar as variações espectrais	De hora em hora das 10:00h às 14:00h	De fev/2015 a dez/2015
Irradiância no plano inclinado dos Módulos	Estudar o desempenho do módulo	De minuto a minuto das 10:00h às 14:00h	De ago/2015 a dez /2015
Corrente de Curto Circuito	Estudar o desempenho do módulo	De minuto a minuto das 10:00h às 14:00h	De ago/2015 a dez/2015
Temperatura	Estudar o desempenho do módulo	De minuto a minuto das 10:00h às 14:00h	De ago/2015 a dez/2015

Fonte: Produção do Autor.

3.3.1. Agrupamento dos Dados

Considerando que o espectro da radiação solar incidente na superfície da Terra varia de acordo com a influência de alguns fatores ambientais, foi necessário realizar um agrupamento dos dados de modo a isolar o máximo possível estas influências antes do processo de análise. Os dados coletados foram agrupados de acordo com o mês, o horário de coleta e condição de céu no qual a medição ocorreu. A classificação de acordo com o mês e horário leva em consideração o efeito do parâmetro Massa Ar e conseqüentemente da concentração de aerossóis e do vapor de água. Já a classificação de acordo com a condição de nebulosidade do céu foi realizada de acordo com o Índice de Limpidez K_T (definido pela Equação 2.14), separando os dados em três grupos: os coletados sob Céu Limpo ($K_T > 0,65$), Céu Parcialmente Nublado ($0,3 < K_T < 0,65$) e Céu Nublado ($K_T < 0,3$). O valor do K_T foi calculado utilizando-se dados de irradiância global fornecidos pelo projeto SONDA – *Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais* da estação localizada em Cachoeira Paulista e dados de Irradiância Global no topo da atmosfera obtidos através da Equação 2.11.

3.3.2. Fatores calculados

Foram calculados três fatores importantes relacionados ao espectro solar a partir dos dados coletados, sendo dois deles utilizados para a avaliação dos espectros e suas variabilidades e um para avaliação do efeito do espectro no desempenho dos módulos fotovoltaicos. Para a avaliação das variabilidades espectrais foram utilizados os fatores Energia Média dos Fótons (APE) e o Fator de Formato Espectral Relativo (FFER). Para a avaliação do efeito do espectro no desempenho dos módulos foi utilizado o Fator Espectral (SF).

3.3.2.1. Fatores para a avaliação das variações do espectro

Os fatores para a avaliação das variações do espectro tiveram por função dar um melhor conhecimento a respeito do espectro solar e de suas variações de acordo com o passar do tempo e com as condições de céu que ocorre na cidade de Cachoeira Paulista – SP. Com eles foi possível identificar quais componentes atmosféricos apresentaram maior variabilidade ao longo dos meses e se estão presentes na atmosfera de Cachoeira Paulista em maior ou menor quantidade quando comparada ao espectro padrão AM 1.5G.

É importante salientar que no cálculo dos fatores relacionados aos espectros os dados espectrais coletados foram delimitados entre o intervalo de 350 nm e 950 nm a fim de eliminar parte do espectro acima de 950 nm, onde a relação sinal/ruído era muito baixa.

A) Energia Média dos Fótons (APE): Este fator foi desenvolvido visando simplificar a análise dos espectros solares, que são gráficos de difícil correlação com grandezas representadas por um único valor, como por exemplo, a temperatura. Ele é um valor unitário que caracteriza o formato do espectro da radiação incidente, aonde valores elevados indicam um espectro desviado para o azul (rico em fótons com energia mais alta) ao passo que baixos valores indicam um espectro desviado para o vermelho (com maior quantidade de fótons com baixa energia). O cálculo do APE é dado pela Equação 2.16. Apesar de ser muito útil em muitas aplicações, o

APE não traz informações detalhadas a respeito das regiões espectrais que estão sofrendo variações.

B) Fator de Formato Espectral Relativo (FFER): Este fator é um parâmetro dependente do comprimento de onda (λ) que possibilita avaliar em quais regiões ocorrem as diferenças entre dois espectros quaisquer. O FFER pode ser calculado pela Equação 3.2, sendo que os espectros utilizados devem ser normalizados com relação às suas áreas totais.

$$\text{FFER}(\lambda) = \frac{G_1(\lambda)}{G_2(\lambda)} \quad (3.2)$$

Onde:

$\text{FFER}(\lambda)$: Fator de Formato Espectral Relativo ao espectro H_2 ;

$G_1(\lambda)$: Irradiância espectral normalizada com relação à área total do espectro H_1 ;

$G_2(\lambda)$: Irradiância espectral normalizada com relação à sua área total do espectro H_2 ;

Neste trabalho o FFER foi utilizado de modo a relacionar a média dos espectros coletados normalizados com o espectro padrão AM1.5G também normalizado. Desta forma a Equação 3.2 foi reescrita e passou a ser utilizada como a apresentada pela Equação 3.3.

$$\text{FFER}(\lambda) = \frac{\overline{G_N(\lambda)}}{G(\lambda)_{\text{STC}}} \quad (3.3)$$

Onde:

$\text{FFER}(\lambda)$: Fator de Formato Espectral Relativo ao padrão ASTM 1.5G;

$\overline{G_N(\lambda)}$: Média da Irradiância espectral medida em campo normalizada com relação à sua área total;

$G_N(\lambda)_{\text{STC}}$: Irradiância espectral do espectro ASTM AM1.5G normalizada com relação à sua área total;

Com este parâmetro foi possível mostrar como o formato dos espectros coletados se diferenciaram do padrão AM 1.5G e em quais regiões as diferenças aconteceram, sendo que os componentes atmosféricos

responsáveis por tais diferenças foram identificados utilizando-se as curvas de transmitância atmosférica (Figura 2.17) Com as curvas do FFER, foi possível estabelecer comparações entre o formato de espectros médios agrupados para diferentes condições (mês, horário e condição de nebulosidade), auxiliando no estudo das variações espectrais. É importante salientar que todas as curvas de FFER foram suavizadas através da média móvel para facilitar a análise.

3.3.2.2. Fator para avaliação da influência espectral no desempenho dos módulos

Para a avaliação da influência do espectro da radiação solar nos módulos, foi desenvolvido o Fator Espectral Corrigido (FEC) com base no Fator Espectral (SF), sendo que sua fórmula é dada pela Equação 3.4. O FEC, assim como o SF, também compara o casamento entre a resposta espectral do módulo e o espectro encontrado em campo com o casamento entre a resposta espectral do módulo e o espectro padrão. Porém, diferentemente do SF, que corrige somente os efeitos da Irradiância, o FEC também corrige os efeitos causados na corrente pela temperatura.

$$FEC = \left(\frac{I_{CC_{CAMPO}}}{G_{CAMPO}} \right) \left(\frac{I_{CC_{STC}}}{G_{STC}} \right)^{-1} \left(\frac{1}{1 + \alpha(T - T_{STC})} \right) \quad (3.4)$$

Sendo:

$I_{CC_{CAMPO}}$: Corrente de curto circuito do dispositivo fotovoltaico em campo (A);

G_{CAMPO} : Irradiância espectral incidente no dispositivo em campo (W/m^2);

$I_{CC_{STC}}$: Corrente de curto circuito do dispositivo fotovoltaico na condição padrão (A);

G_{STC} : Irradiância espectral incidente no dispositivo na condição padrão (W/m^2);

α : Coeficiente térmico da corrente ($^{\circ}C^{-1}$);

T : Temperatura do dispositivo fotovoltaico em campo (°C);

T_{STC} : Temperatura do dispositivo fotovoltaico na condição padrão (°C);

Uma peculiaridade deste parâmetro é que rearranjando os termos da Equação 3.4, ele também pode ser interpretado como o valor da corrente de curto-circuito medida em campo corrigida para os valores medidos em laboratório com Irradiância e temperatura normalizada com relação às condições STC (vide Equação 3.5).

$$FEC = \frac{I_{CC_{COR}}}{I_{CC_{STC}}} \quad (3.5)$$

Sendo:

FEC : Fator Espectral Corrigido

I_{CC_{COR}} : Corrente de curto circuito do dispositivo fotovoltaico em campo corrigido para as condições do padrão (A)

I_{CC_{STC}} : Corrente de curto circuito do dispositivo fotovoltaico na condição padrão (A)

Os valores de FEC maiores que a unidade indica ganhos espectrais, ou seja, o casamento em campo é melhor que em laboratório, ao passo que valores menores que a unidade indica perdas espectrais, onde o casamento em campo é pior que em laboratório. Através deste fator é possível identificar para quais períodos do intervalo de tempo avaliado e quais condições ambientais ocorreram os melhores casamentos espectrais entre a resposta do módulo e o espectro da radiação incidente. Além disso, sua correlação com o APE indicará para quais condições de espectro ocorrem ganhos ou perdas espectrais quando comparado com as condições padrões.

3.3.3. Processo de Análise

Primeiramente comparações entre os formatos dos espectros coletados em Cachoeira Paulista com o formato do espectro padrão AM1.5G foram realizadas utilizando o FFER objetivando entender as principais diferenças entre eles. Em seguida foram realizados estudos a respeito das variações causadas nos espectros pela variação do parâmetro Massa Ar e pelas condições de nebulosidade do céu, onde os parâmetros APE e FFER foram utilizados em conjunto com o Índice de Limpidez K_T .

As comparações com o espectro padrão foram realizadas utilizando-se o FFER para dados dos meses de fevereiro a dezembro de 2015, horários de 10:00h às 14:00h e condições de nebulosidade do céu (ensolarado, parcialmente nublado e nublado). Neste estudo buscou-se encontrar as principais diferenças entre o espectro em campo e o espectro padrão AM1.5G, buscando-se explicar as possíveis causas para tais diferenças.

Para o estudo da influência do parâmetro Massa Ar nos espectros, utilizou-se os parâmetros APE e FFER que foram analisados ao longo das horas e dos meses. No caso da análise ao longo das horas, elas foram realizadas para cada mês em separado. Já no caso da avaliação ao longo do ano somente dados das 12:00h foram utilizados. Esta abordagem foi adotada, pois o parâmetro Massa Ar varia ao longo do dia e ao longo do ano, alcançando seus menores valores em horários próximos ao meio dia solar e em meses de verão para o hemisfério sul. Para que o efeito das nuvens fosse eliminado, somente foram utilizados os dados espectrais coletados sob a condição de céu limpo.

Quanto aos efeitos causados pelas nuvens, estes também foram analisados através dos fatores APE, FFER e K_T . Neste caso eles foram calculados para cada mês utilizando somente dados das 12:00h coletados em dias ensolarados, parcialmente nublados e nublados. Os parâmetros agrupados de acordo com a condição de nebulosidade do céu foram comparados entre si. O horário foi fixado para que os efeitos causados pela massa de ar fossem minimizados.

Com base nos Espectros solares coletados em Cachoeira Paulista e suas variações, as influências causadas por eles no funcionamento dos módulos fotovoltaicos foram estudadas através da utilização do Fator Espectral Corrigido (FEC) e da energia média dos fótons (APE). A relação entre eles foram analisadas através da utilização de todos os dados obtidos entre as 10:00h e 14:00h no período de agosto a dezembro de 2015.

Com o conhecimento da influência do espectro na geração dos módulos fotovoltaicos, buscou-se conhecer os efeitos causados na geração pelos parâmetros atmosféricos. Para analisar a influência do parâmetro Massa Ar, foram plotados os valores de FEC de todas as tecnologias coletados sob céu limpo para o horário oficial das 12:00h e 13:00h, não considerando o horário de verão, ao longo dos dias no período de agosto a dezembro. Além disso, para avaliar a influência da variação do parâmetro Massa Ar ocasionado com o passar das horas, os valores médios de agosto a dezembro de FEC para cada horário foram plotados para todas as tecnologias de módulos. No caso da condição de nebulosidade do céu, os valores de FEC de todos os módulos foram relacionados aos valores de Kt somente para o horário das 12:00h.

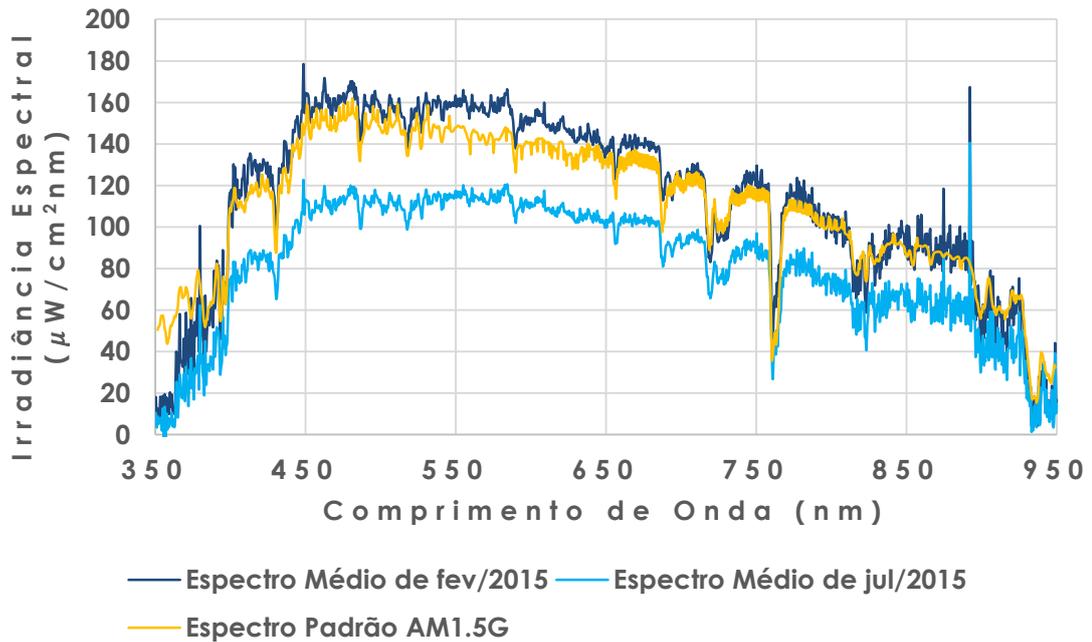
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na primeira parte deste capítulo são analisadas e discutidas as diferenças entre os espectros coletados pela Unidade de Coleta de Dados Espectrais - UCDE instalada no campus do INPE em Cachoeira Paulista e o espectro padrão ASTM 1.5G. Nesta primeira parte também são mostrados os estudos das variações nos dados espectrais com o objetivo de compreender como alguns fatores atmosféricos afetaram o espectro. Na segunda parte deste capítulo é apresentado o estudo e discussão sobre a influência dos espectros e dos parâmetros atmosféricos nos módulos fotovoltaicos de seis tecnologias diferentes.

4.1. ESTUDO DOS ESPECTROS

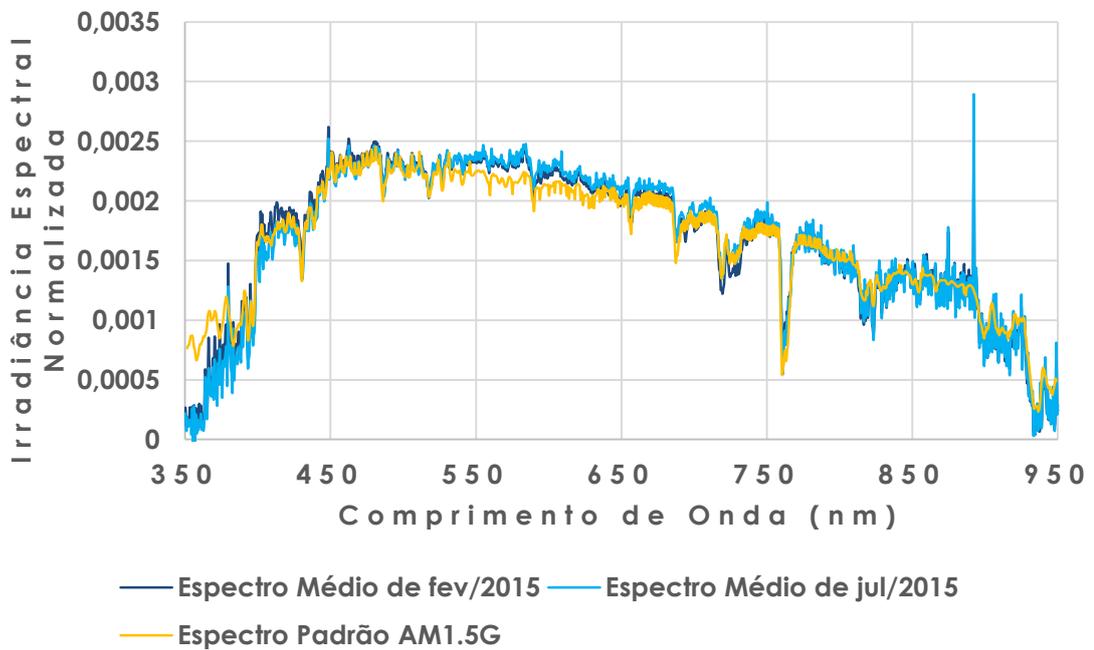
Os dados espectrais utilizados nesta dissertação foram coletados entre 10:00h e 14:00h para o período de fevereiro de 2015 a dezembro de 2015. Alguns destes dados se encontram no Anexo B e para exemplificá-los seguem na Figura 4.1 espectros médios das 12:00h dos meses de fevereiro e julho medidos sob céu limpo e na Figura 4.2 os mesmos espectros, porém normalizados. Em ambas os gráficos encontram-se para comparação o espectro padrão AM1.5G e sua curva normalizada, respectivamente. Analisando os gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e os do Anexo B, pode-se perceber que todos eles apresentam diferenças em relação ao padrão, além de apresentarem variações entre si ao longo do tempo e para as diferentes condições de cobertura do céu. Estas diferenças e variações estão relacionadas a parâmetros atmosféricos como a Massa Ar e o tipo de cobertura de nuvens e são mais ou menos pronunciados dependendo da hora do dia e do mês do ano.

Figura 4.1 – Espectros médios das 12:00h coletados sob céu limpo para os meses de fevereiro e julho de 2015.



Fonte: Produção do Autor

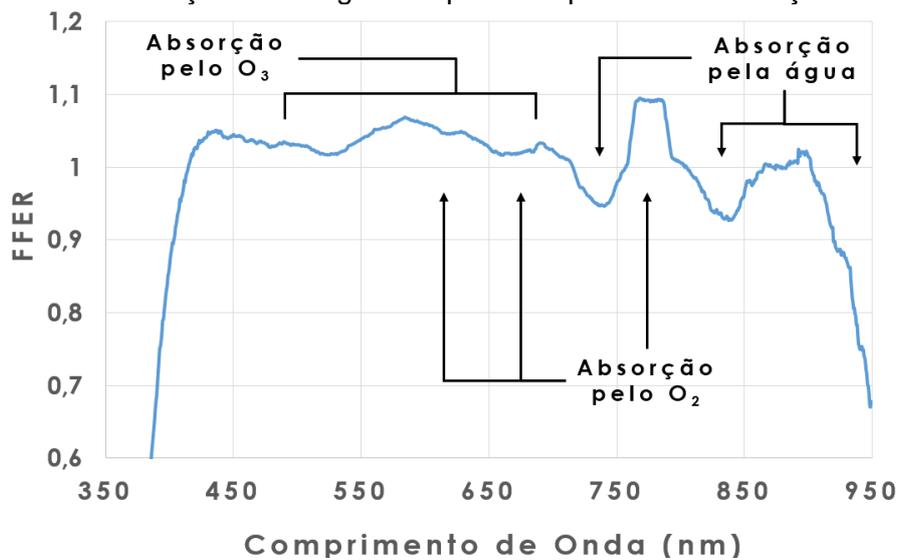
Figura 4.2 – Espectros médios normalizado das 12:00h coletados sob céu limpo para os meses de fevereiro e julho de 2015.



Fonte: Produção do Autor

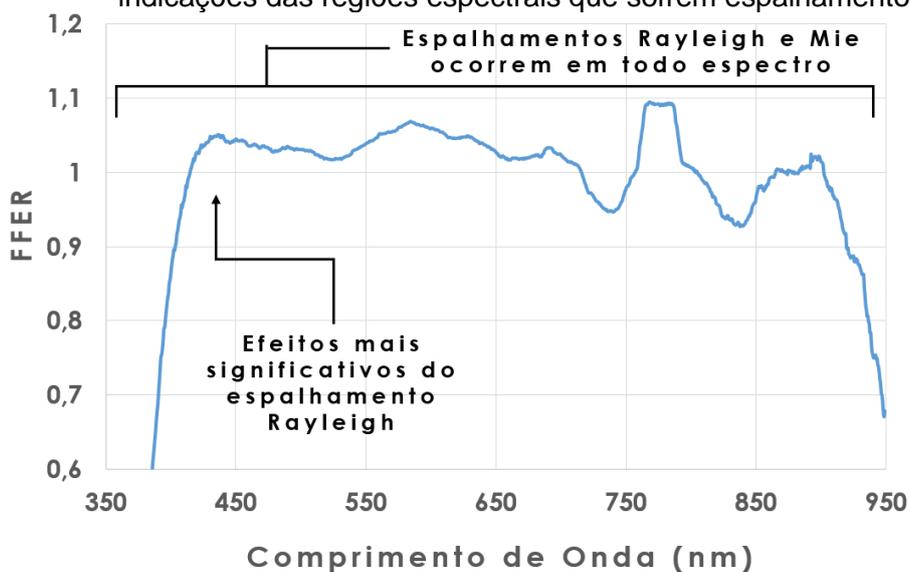
A fim de facilitar os estudos a respeito do espectro solar, as regiões de influência de elementos como o vapor de Água, Ozônio, Oxigênio e a mistura de gases e aerossóis foram indexados em uma das curvas de FFER. Tal curva é mostrada na Figura 4.3 com a indexação das regiões de absorção dos gases e na Figura 4.4 com a indexação das regiões afetadas pelo espalhamento.

Figura 4.3 – FFER do espectro médio das 12:00h para o mês de fevereiro com as indicações das regiões espectrais que sofrem absorções.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.4 – FFER do espectro médio das 12:00h para o mês de fevereiro com as indicações das regiões espectrais que sofrem espalhamento.

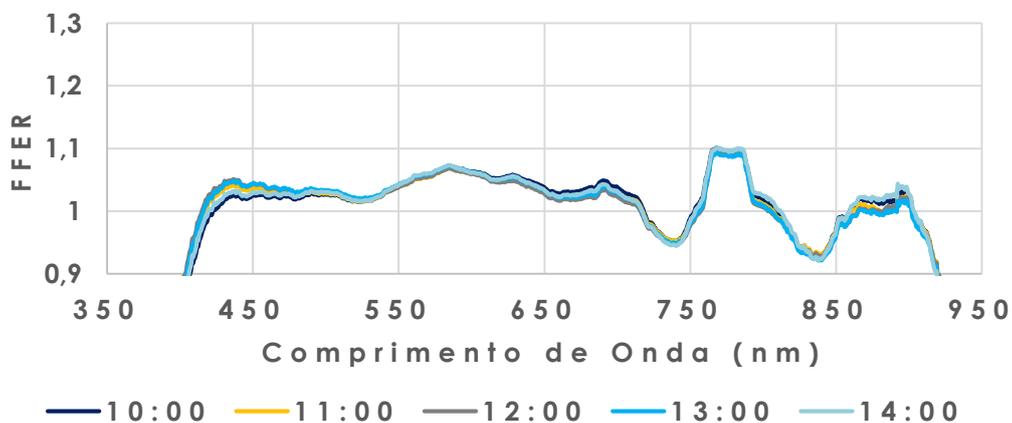


Fonte: Produção do Autor.

4.1.1. Comparação do espectro de Cachoeira Paulista com o padrão AM1.5G

As diferenças apresentadas pelos espectros coletados e o espectro padrão AM1.5G tenderam a ocorrer nas mesmas regiões espectrais para a maioria dos espectros coletados. Para ilustrar tais diferenças, o FFER dos espectros das 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h dos meses de fevereiro são mostrados na Figura 4.5 para a condição de céu ensolarado, na Figura 4.6 para condição de céu parcialmente nublado e na Figura 4.7 para a condição de céu nublado. Estes mesmos gráficos para o mês de julho seguem na Figura 4.8 para a condição de céu ensolarado, na Figura 4.9 para condição de céu parcialmente nublado e na Figura 4.10 para a condição de céu nublado. Nestes gráficos todas as regiões da curva que estão acima de 1 são regiões do espectro medido que em média são maiores que o espectro padrão, e todas as regiões que estiverem abaixo desse mesmo valor indicam que o espectro medido é em média menor que o padrão.

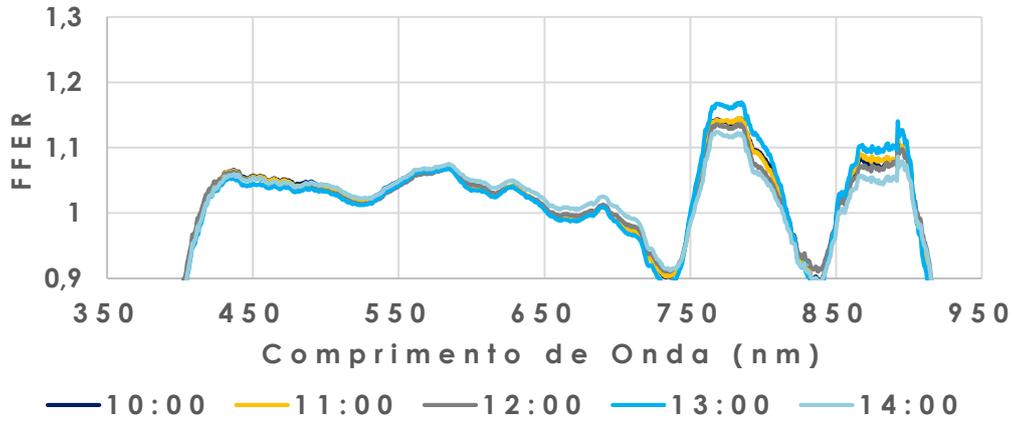
Figura 4.5 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de fevereiro para a condição de céu limpo.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

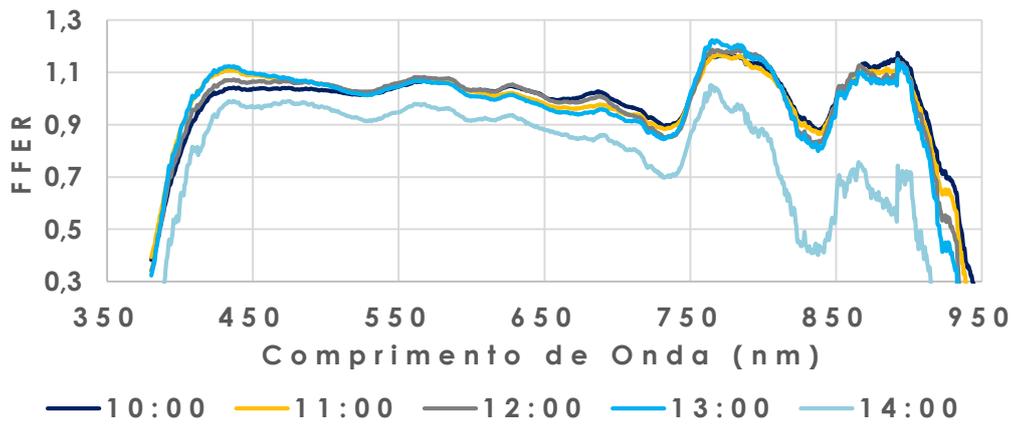
Figura 4.6 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de fevereiro para a condição de céu parcialmente nublado.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

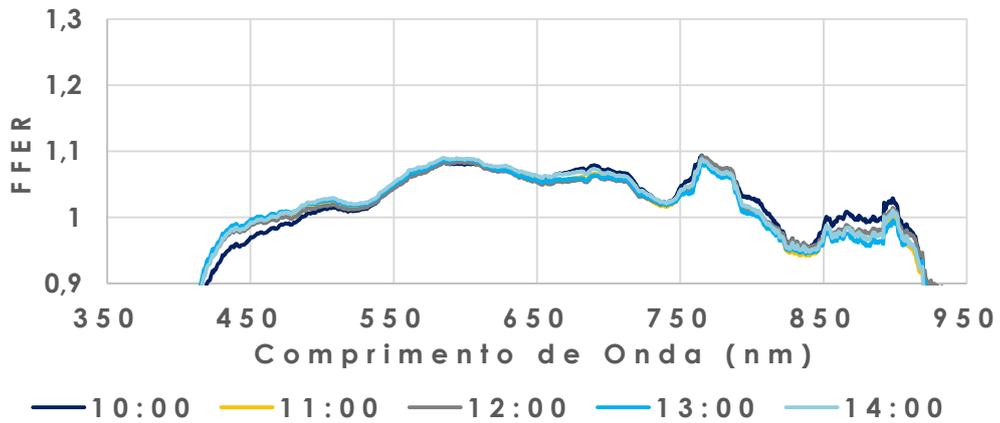
Figura 4.7 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de fevereiro para a condição de céu nublado.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

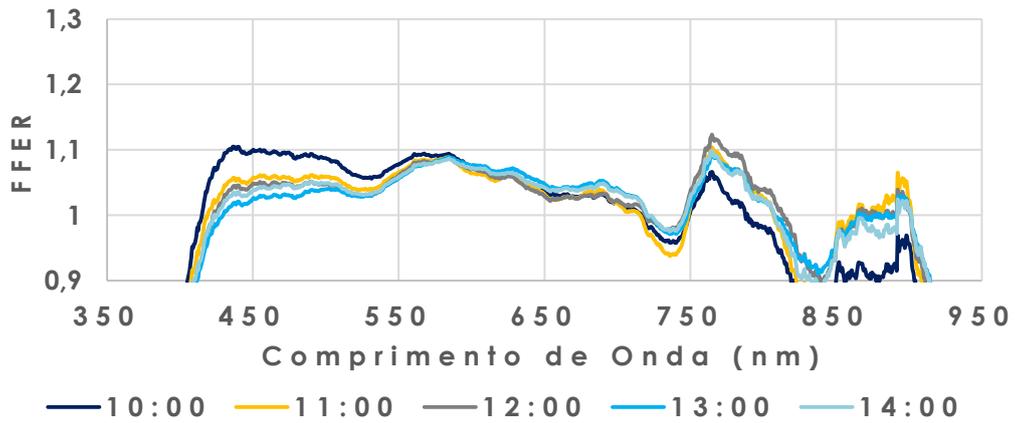
Figura 4.8 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de julho para a condição de céu limpo.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

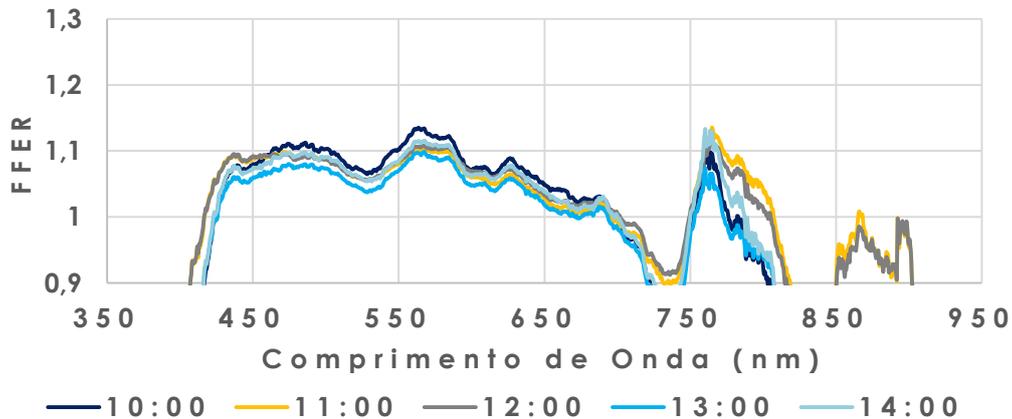
Figura 4.9 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de julho para a condição de céu parcialmente nublado.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.10 – Gráficos do FFER para as medições realizadas entre as 10:00h e 14:00h do mês de julho para a condição de céu nublado. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.



Fonte: Produção do Autor.

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 4.5 a 4.10, pode-se perceber que apesar de possuírem variações entre si, a maioria deles (com exceção de alguns coletados às 14:00h de dias nublados) apresentaram diferenças nas mesmas regiões do espectro. A região do visível, por exemplo, tem intensidade maior nos espectros de Cachoeira Paulista do que o padrão para a grande maioria dos dados, podendo-se observar o mesmo para banda A de absorção pelo Oxigênio (situada ao redor dos 760 nm). Provavelmente as maiores intensidades nestas áreas estão ocorrendo pelo fato de que para a maioria dos dados analisados a radiação solar percorreu menores camadas de Massa Ar do que o adotado para o padrão. Outro fator que pode estar influenciando estas diferenças é o de que na atmosfera de Cachoeira Paulista a quantidade dos elementos que causam a atenuação nas regiões citadas do espectro, sendo eles os aerossóis e o Ozônio no visível e, pouco provável, o Oxigênio nas suas bandas de absorção, estão em menor quantidade do que os presentes nas regiões norte americanas utilizadas como referência para a elaboração do espectro solar padrão.

As outras diferenças observadas são as regiões nas quais o espectro de Cachoeira Paulista apresenta menor intensidade que o padrão, que ocorrem nas bandas de absorção da água situadas em torno de 720 nm, 820 nm e 940 nm. O fato delas serem menores com relação ao espectro

padrão AM1.5G provavelmente acontece devido a maior quantidade de vapor de água presente na atmosfera do local de medição. Assim, de acordo com estes dados, a atmosfera de Cachoeira Paulista aparenta ter uma quantidade maior de vapor de água do que a considerada para o desenvolvimento do espectro padrão AM1.5G da ASTM. As diferenças apresentadas nestas regiões do espectro também poderiam ter sido causadas pelo fato de o valor de Massa Ar ser diferente de 1.5 como provavelmente ocorreu para o visível e as bandas de absorção do Oxigênio. Porém, caso as diferenças causadas pela água fossem resultado da diferença da Massa Ar, tais regiões acompanhariam a tendência do que aconteceu com o visível e com o O_2 (e seriam maiores que a unidade), reforçando a ideia de que em Cachoeira Paulista há mais água suspensa na atmosfera do que o considerado para o espectro padrão.

De maneira geral as diferenças observadas mostram que os espectros coletados em Cachoeira Paulista, em média, não foram iguais ao padrão em todos os meses do ano para as condições avaliadas. Isto indica que a adoção do espectro padrão norte americano ASTM 1.5G nas avaliações de módulos fotovoltaicos em laboratório pode levar a informações que não sejam representativas das que ocorrem em campo para diferentes localidades.

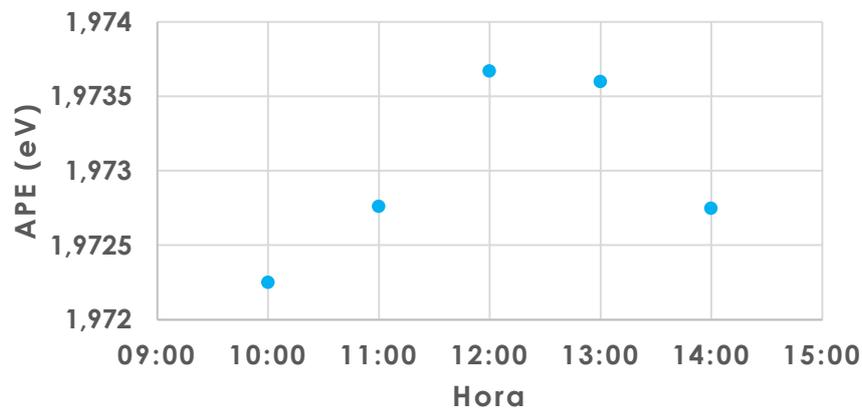
4.1.2. Influência do parâmetro Massa Ar nos espectros solares

A influência do parâmetro Massa Ar nos espectros solares de Cachoeira Paulista foi analisada através do estudo da variação da energia média dos fótons (APE) e do Fator de Formato Espectral Relativo (FFER) do espectro ao longo dos horários de coleta e ao longo do ano. Para este estudo foram utilizados espectros de fevereiro a dezembro coletados sob as condições de céu limpo.

Para mostrar como os espectros variaram em função do horário, foram plotados os valores de APE médio para cada horário de coleta. Estes dados são mostrados na Figura 4.11, onde os pontos do gráfico são médias dos valores do APE obtidos para dias ensolarados nos meses de fevereiro a

dezembro de 2015. Como pode ser visto, o valor máximo ocorre entre os horários das 12:00h e 13:00h e os mínimos às 10:00h e 14:00h. Como o parâmetro Massa Ar apresenta seus menores valores em horários próximos ao meio dia solar, que oscila entre ± 16 min ao redor do meio dia do horário oficial (desconsiderando o horário de verão), então pode-se dizer que a energia média dos fótons aumentou conforme o horário se aproximou do meio dia oficial.

Figura 4.11 – Variação do APE médio de acordo com o horário do dia.

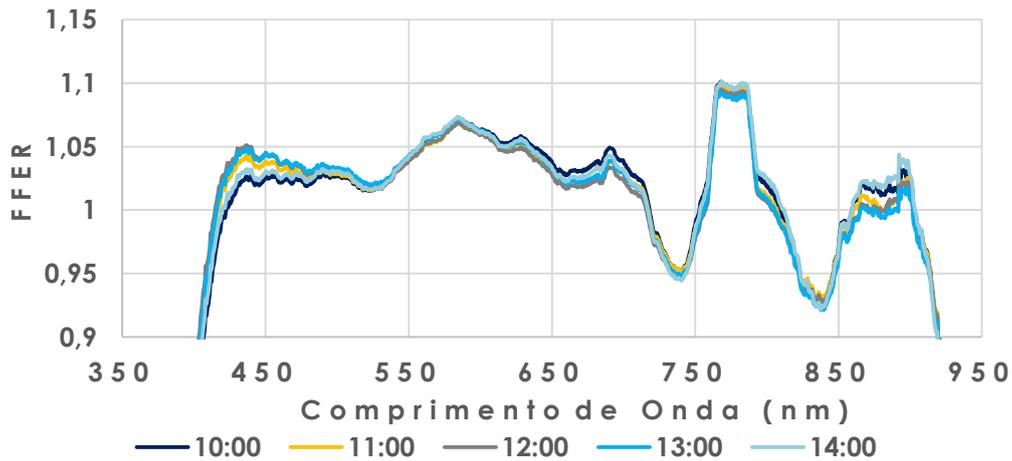


Fonte: Produção do Autor.

Para analisar como que o parâmetro Massa Ar influenciou na energia média dos fótons como resultado da variação do horário de coleta, os FFER de todos os horários foram plotados para quatro meses do ano e são mostrados na Figura 4.12 para o mês de fevereiro, Figura 4.13 para o mês de abril, Figura 4.14 para o mês de julho e Figura 4.15 para o mês de setembro. Como pode ser observado, em todos eles a tendência do espectro foi de ter um formato com maiores intensidades nas regiões de menor comprimento de onda e o contrário nos maiores valores de comprimento de onda conforme o horário se aproximava das 12:00 horas. A explicação para estas mudanças está relacionada à diminuição do parâmetro Massa Ar e a consequente diminuição do efeito causado pelo espalhamento Rayleigh. Conforme o Sol se aproxima da zênite (que ocorre próximo ao meio dia) a radiação solar percorre um caminho menor na atmosfera do que as 10:00h ou as 14:00h, resultando em um espalhamento menos intenso. Deste modo há modificações no formato espectral e, como este fenômeno físico é mais pronunciado nos menores valores de λ , uma

diminuição deste espalhamento acaba levando a maiores intensidades nas regiões do visível e ultravioleta. Como nestas regiões os fótons são mais energéticos, a energia média dos fótons se eleva. Nos gráficos das Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 pode-se observar que as regiões nas quais ocorrem absorções por gases não apresentaram variações significativas entre si.

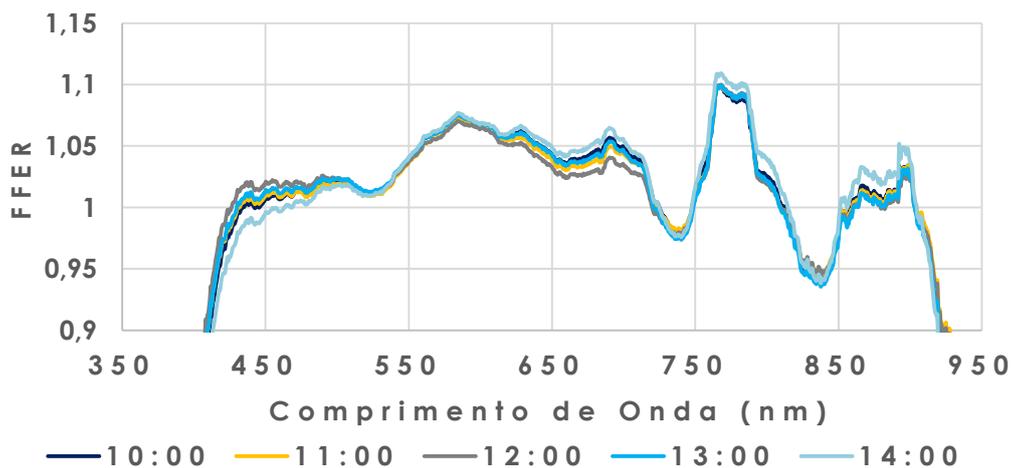
Figura 4.12 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de fevereiro.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

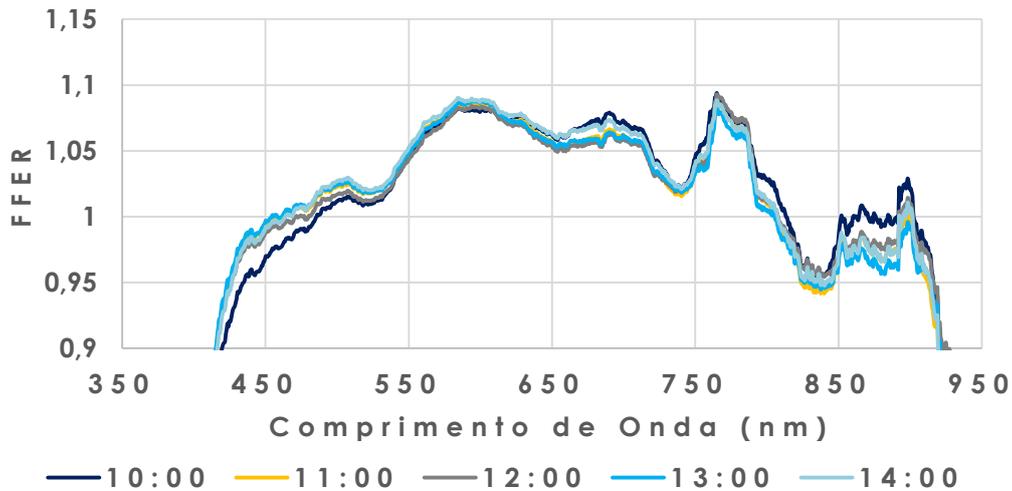
Figura 4.13 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de abril.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

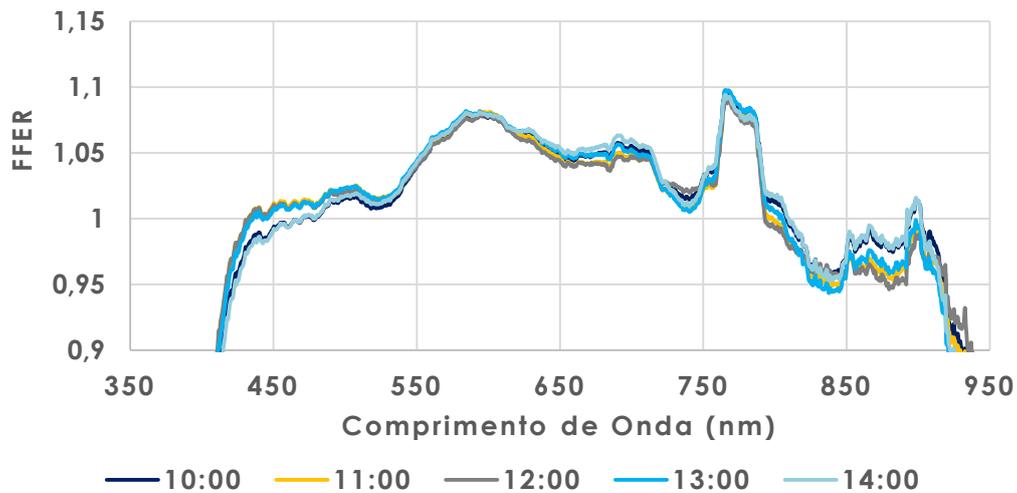
Figura 4.14 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de julho.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.15 – Curvas médias normalizadas obtidas em diferentes horários para o mês de setembro.



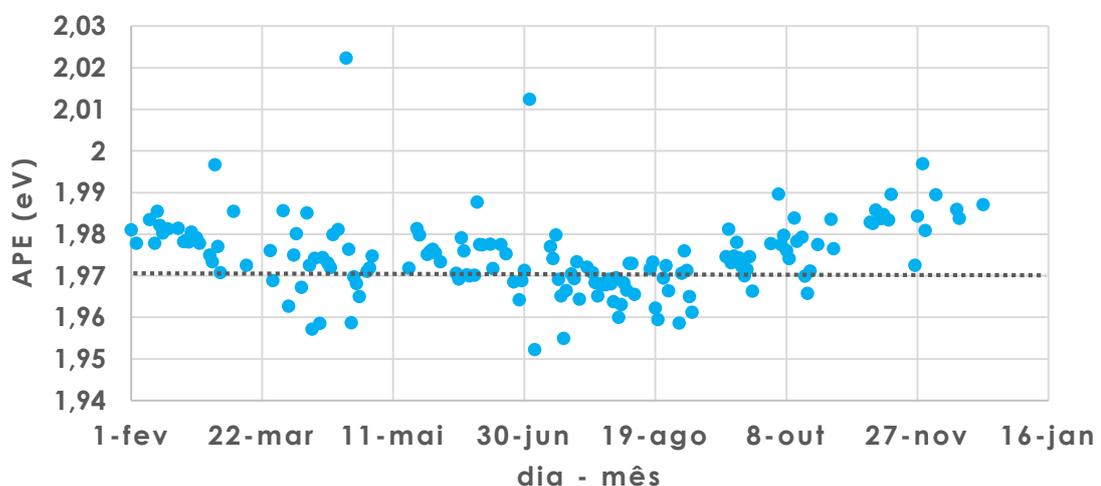
Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

A variação do espectro solar durante o ano também foi analisada, sendo que somente dados espectrais coletados às 12:00h sob a condição de céu limpo foram utilizados. Seus valores de APE foram plotados em função do tempo e são mostrados na Figura 4.16, onde a linha pontilhada representa o valor do APE para o espectro AM1.5G, que é de 1,97eV. Nesta figura

pode ser observado que a maioria dos espectros (aproximadamente 70%) apresentaram valores de APE maiores que 1,97 eV do espectro AM1.5G. Isto significa que em média os fótons que compõem os espectros coletados em campo foram mais energéticos que o padrão para a maioria dos dias para os horários de coleta. Ainda de acordo com a Figura 4.16, percebe-se que a energia média dos fótons oscilou no período de fevereiro a dezembro do mesmo ano, apresentando os maiores valores para os meses próximos ao verão (novembro, dezembro e fevereiro) e os menores valores para os meses próximos ao inverno (julho e agosto).

Figura 4.16 – Variação da Energia Média dos Fótons para o horário das 12:00h ao longo dos meses para as condições de céu limpo.

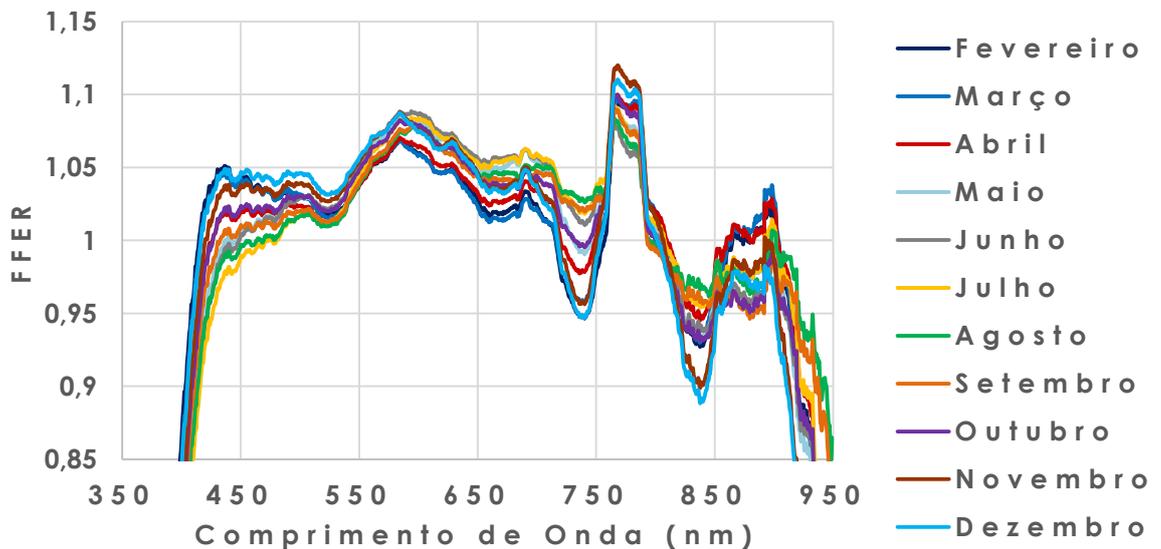


Fonte: Produção do Autor.

Um gráfico do FFER foi plotado para os dados das 12:00h coletados sob as condições de céu claro para cada mês, conforme mostra a Figura 4.17. Nele as influências do parâmetro Massa Ar e do vapor de água puderam ser observados. Para analisar o efeito da Massa Ar, os espectros foram comparados entre si, dando um maior foco na região espectral de menores comprimentos de onda (UV e VIS). Deste modo pôde-se observar que as curvas mostraram formatos diferentes conforme os meses passaram, sendo que para dezembro e fevereiro elas apresentaram intensidades maiores nos menores comprimentos de onda e menores intensidades nos maiores comprimentos de onda, ocorrendo o inverso para os meses de

julho e agosto. Estas diferenças provavelmente são resultado da variação da Massa Ar que, para a latitude de Cachoeira Paulista assume menores valores para períodos próximos ao solstício de verão e maiores valores para períodos próximo ao solstício de inverno. Por causa deste parâmetro apresentar um valor mais baixo em dezembro e fevereiro, há uma diminuição nos efeitos do espalhamento Rayleigh e por isso as regiões do ultravioleta e do visível tendem a serem maiores do que o restante do espectro, modificando o formato do mesmo e conseqüentemente elevando a energia média dos fótons. O contrário ocorre para os meses de julho e agosto, que apresentam menores valores de APE.

Figura 4.17 – Curvas do FFER calculadas para vários meses com dados das 12:00h coletados sob a condição de céu limpo. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.



Fonte: Produção do Autor.

Já os efeitos do vapor d'água foram analisados através das regiões espectrais de absorção deste elemento, localizadas em torno de 720 nm, 820 nm e 940 nm, onde se vê que os picos de absorção são muito mais pronunciados para os meses de novembro e dezembro do que julho ou agosto. Considerando que a tendência do clima na região sudeste brasileira é de ser mais úmido em meses relacionados à primavera e verão e mais seco nos relacionados ao outono e inverno, as mudanças em tais regiões espectrais são o indicativo de que em novembro e dezembro havia mais

água na atmosfera do que em julho ou agosto. Este pode ser um outro motivo que colaborou para os maiores valores de APE encontrados para este mesmo período, pois maiores quantidades de água na atmosfera estão relacionadas a uma maior absorção do Infravermelho, o que eleva o valor da energia média dos fótons.

As mudanças nas regiões de absorção do vapor d'água se devem a concentração deste elemento na atmosfera, que pode ser maior ou menor por vários motivos, tais como: clima local, época do ano, proximidade de lagos, montanhas ou do mar, presença ou não de vegetações, etc. As variações na Massa Ar associados a fatores locais também podem causar mudanças nas regiões de absorção do vapor d'água pelo fato deste elemento estar contido no ar e quão maior for a massa ar, maior será os efeitos causados pelo vapor d'água. Porém, se esta fosse a principal causa para o caso analisado, nos meses onde os efeitos da massa de ar foram menos intensos (como em dezembro) os vales nos quais ocorreram a absorção da água deveriam ser menos pronunciados, o que não aconteceu. Por isso a causa mais provável é de que a quantidade de vapor de água na atmosfera tenha variado ao longo do ano.

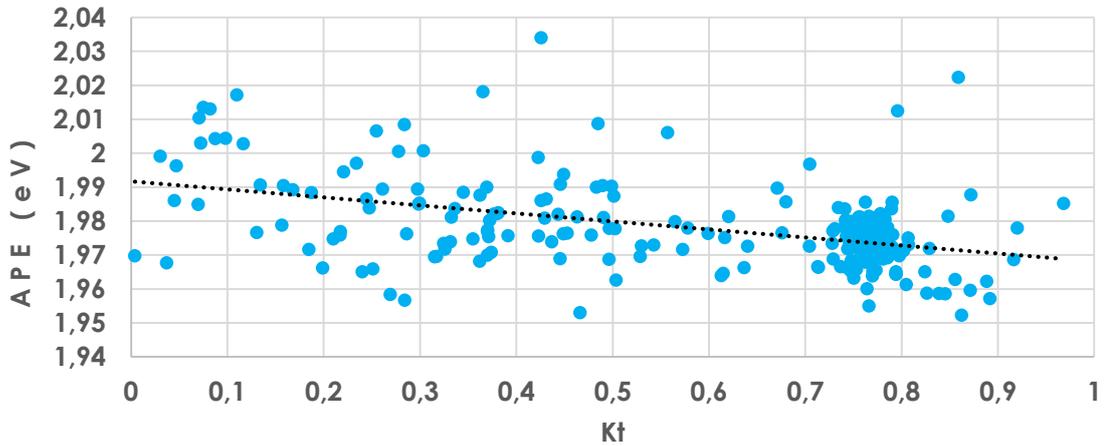
Outras influências ocasionadas pela absorção da radiação por parte de elementos como o O_3 e O_2 não foram tratados neste trabalho pelo fato de não exercerem influências significativas na conversão fotovoltaica das tecnologias estudadas.

4.1.3. Influência das condições de céu no espectro solar

Para analisar a influência da cobertura de nuvens no espectro solar, a energia média dos fótons e o fator de formato espectral relativo foram analisados para as três condições possíveis de céu (céu limpo, céu parcialmente nublado e céu nublado). Nesta análise somente os espectros das 12:00h foram utilizados a fim de reduzir a influência do parâmetro Massa Ar. Um gráfico mostrando a variação do valor do APE de acordo com o Índice de Limpeza ao longo dos meses de pesquisa para o horário

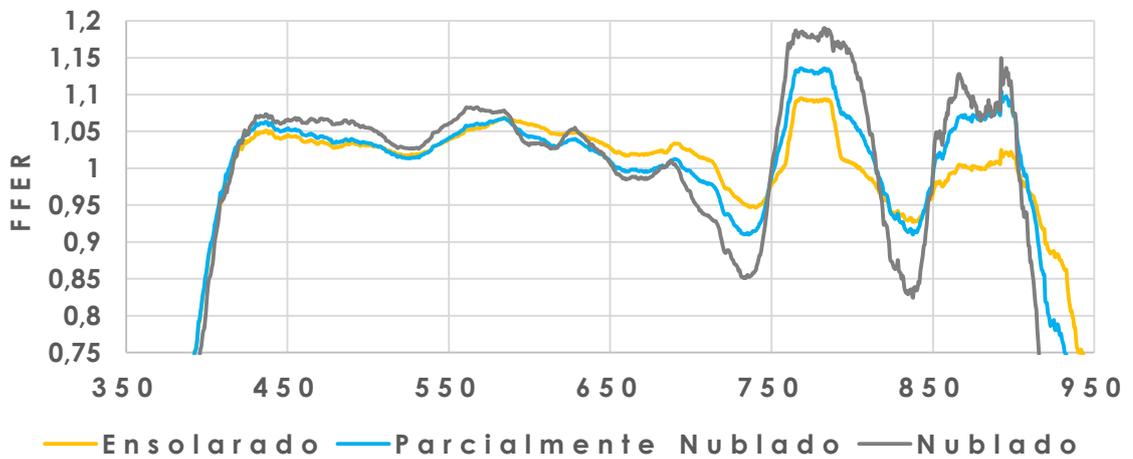
das 12:00h é mostrado na Figura 4.18 e nas Figuras 4.19 e 4.20 são mostrados gráficos do FFER para os meses de fevereiro e julho traçados para as três condições de céu com dados das 12:00h.

Figura 4.18 – Variação da Energia Média dos Fótons de acordo com o Índice de Limpeza ao longo dos meses para o horário das 12:00h.



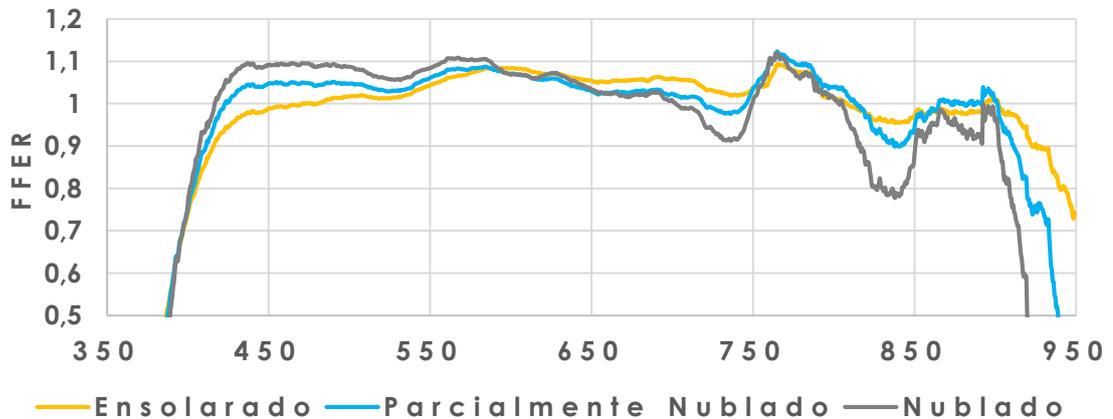
Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.19 – Curvas do FFER obtidas para diferentes condições de céu no mês de fevereiro. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.20 – Curvas do FFER obtidas para diferentes condições de céu no mês de julho. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.



Fonte: Produção do Autor.

De acordo com a Figura 4.18 a tendência da energia média dos fótons foi de aumentar conforme o índice de limpidez diminuiu. Este comportamento pode ser explicado através da análise dos gráficos de FFER presentes nas Figuras 4.19 e 4.20. De acordo com eles pode-se perceber primeiramente que o formato dos espectros de céu nublado é diferente do de céu limpo e parcialmente nublado, onde as principais diferenças são os picos mais acentuados nas bandas de absorção da água e o formato espectral com intensidade ligeiramente maior nos menores comprimentos de onda. Estas diferenças muito provavelmente se devem a presença de nuvens que, além de absorverem radiação devido ao vapor d'água, contribuem com o espalhamento Mie. O espalhamento Mie possui uma dependência menor com o comprimento de onda do que o espalhamento Rayleigh e por isso afeta o espectro de maneira mais homogênea, levando às maiores intensidades na região do ultravioleta e visível. A soma destes dois efeitos deixa o espectro, em média, mais rico em fótons com maior quantidade de energia, elevando o APE quando o céu se encontra encoberto.

Com base nas análises realizadas a respeito das condições de céu, pode-se observar que a presença de água na atmosfera é capaz de influenciar no formato do espectro de duas maneiras distintas: primeiramente

absorvendo a radiação eletromagnética referente às suas bandas, que podem ser causados tanto pelo vapor d'água suspenso na atmosfera quanto pela presença de nuvens, e o segundo pelo espalhamento Mie, que muda o formato do espectro devido somente à presença de nuvens.

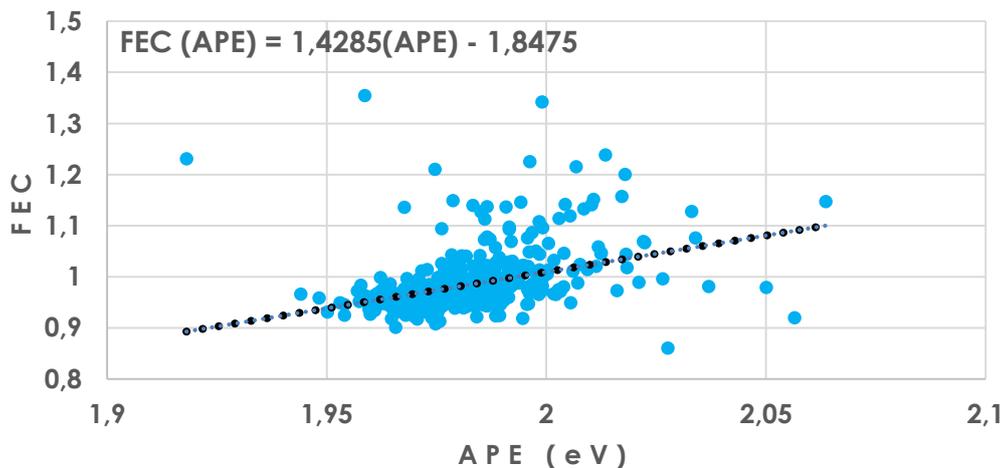
Considerando os resultados das análises, pôde-se constatar que o espectro mudou ao longo do tempo como resultado das mudanças nos valores de Massa Ar e da presença das nuvens. Como foi visto, espectros coletados em meses diferentes, horários diferentes e diferentes condições de céu mostraram diferenças entre si. Isto nos mostra que o espectro solar está sob constante mudança e que estas mudanças se devem a diversos fatores que estão relacionados ao local onde foi coletado o espectro. Isto acaba por reforçar a ideia de que as caracterizações de módulos fotovoltaicos realizadas no STC não são suficientemente representativas para as condições encontradas em campo para as mais diversas localidades.

4.2. INFLUÊNCIA DO ESPECTRO NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

4.2.1. Influência do espectro da radiação solar nos módulos fotovoltaicos

O efeito causado pelo espectro solar nos módulos fotovoltaicos em campo foi estudado relacionando os resultados de fator espectral corrigido (FEC) com a energia média dos fótons (APE) para os módulos de Silício amorfo, Silício microcristalino, Silício policristalino, Silício monocristalino, Arseneto de Gálio e tripla junção. Estes gráficos para todos os módulos estudados estão na sessão C1 do Anexo C e para exemplificá-los, na Figura 4.21 é mostrado o gráfico obtido para o módulo de Silício amorfo. Para todos eles foram realizados ajustes lineares que geraram retas e equações que representaram a tendência de variação da distribuição dos pontos da relação entre o FEC e a APE.

Figura 4.21 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício amorfo.



Fonte: Produção do Autor.

Analisando os gráficos apresentados na sessão C1 do Anexo C e na Figura 4.21, observou-se que o fator espectral corrigido tendeu a variar proporcionalmente com o valor da energia média dos fótons para todas as tecnologias dentro do intervalo de comprimento de onda analisado (de 350 nm a 950 nm). Esta proporcionalidade foi avaliada através dos coeficientes angulares das equações de ajuste linear e se mostrou crescente para todas as tecnologias devido ao sinal positivo dos coeficientes citados. Assim, pode-se dizer que maiores valores de FEC estão relacionados a maiores valores de APE. Como tal parâmetro é maior para espectros mais ricos na região do visível ou mais pobres na região do infravermelho, tem-se que melhores casamentos espectrais entre o espectro incidente e a resposta espectral dos módulos fotovoltaicos tenderam a ocorrer sob condições de menores valores de Massa Ar ou maiores quantidades de água na atmosfera.

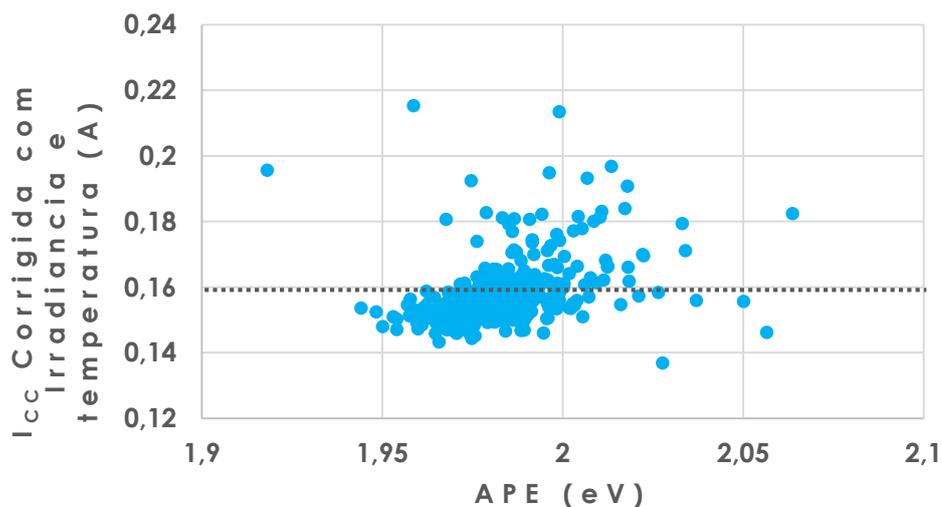
Comparando os valores de coeficiente angular da equação de ajuste linear para os seis módulos fotovoltaicos, observou-se que para algumas tecnologias ela se mostrou maior que para outras, como no caso do a-Si que teve um coeficiente maior que o m-Si. Como o coeficiente angular indica a inclinação da reta do ajuste, ele acaba dando informações a respeito da variação do FEC com o APE, mostrando que para o módulo de

a-Si esta variação foi maior e por isso provavelmente ele apresenta uma maior susceptibilidade às variações espectrais. A diferença entre os valores de coeficiente angular dos módulos fotovoltaicos está relacionada a faixa espectral da resposta destes dispositivos e a região que são capazes de absorver. Para algumas tecnologias, esta faixa espectral cobre uma parte do espectro que é menor e sofrem variações constantemente, o que as levam a ser mais influenciadas pelas variações espectrais, como é o caso do a-Si. Já para outras tecnologias, tais como as baseadas em Silício cristalino, a resposta espectral se estende por uma faixa maior do espectro e, por ser capaz de absorver a radiação em uma maior região, as oscilações espectrais acabam tendo um menor efeito, como é o caso do módulo de m-Si. Para o módulo de tripla junção obteve-se o menor coeficiente de inclinação da reta de ajuste, indicando que as variações no intervalo avaliado do espectro podem não exercer um grande efeito sobre essa tecnologia.

Considerando as variações do FEC com os valores de APE e considerando a definição do FEC de que ele pode ser considerado como a razão entre a corrente de curto circuito em campo devidamente corrigida em irradiância e temperatura para as mesmas condições do STC e a corrente de curto circuito sob as condições do STC, pode-se afirmar que a corrente medida para os módulos em campo apresentaram variações com relação à corrente medida em laboratório. Levando em consideração que os parâmetros ambientais que influenciam diretamente nos módulos fotovoltaicos são a irradiância, temperatura e o espectro solar, esse fato mostra a influência das variações espectrais na corrente gerada pelo módulo fotovoltaico. Assim, as variações do espectro solar influenciam na corrente gerada como resultado de um melhor ou pior casamento entre eles e a resposta espectral dos módulos. Isto significa que se um dispositivo fotovoltaico estiver sob as mesmas condições de irradiância e temperatura, mas com espectros solares diferentes, a corrente produzida por ele poderá ser maior para o espectro que possuir um melhor casamento espectral com a tecnologia utilizada. Na sessão C2 do Anexo C há gráficos para todas as tecnologias que mostram as variações da corrente de curto circuito medida

em campo corrigidas em irradiância e temperatura para o padrão STC em função do espectros valores de APE para todas as tecnologias. Para ilustrar estes gráficos encontra-se na Figura 4.22 o gráfico do a-Si. Como pode ser visto em todos eles, para menores valores de APE a tendência foi da I_{cc} em campo ser menor que a obtida sob o STC. Conforme o APE aumentou, a I_{cc} em campo também tendeu a aumentar, vindo a superar a I_{cc} em laboratório para valores de APE próximos aos 2 eV. Nesses casos diz-se que houveram os chamados ganhos espectrais, que significam basicamente que a I_{cc} em campo devidamente corrigida em irradiância e temperatura para as mesmas condições do STC superou a I_{cc} obtida em laboratório sob as condições do STC devido à melhor casamento espectral ocorrido em campo.

Figura 4.22 – Variação da I_{cc} coletada em campo devidamente corrigida com a temperatura e irradiância para o módulo de a-Si com a energia média dos fótons.



A linha tracejada representa o valor de I_{cc} obtida sob o STC.

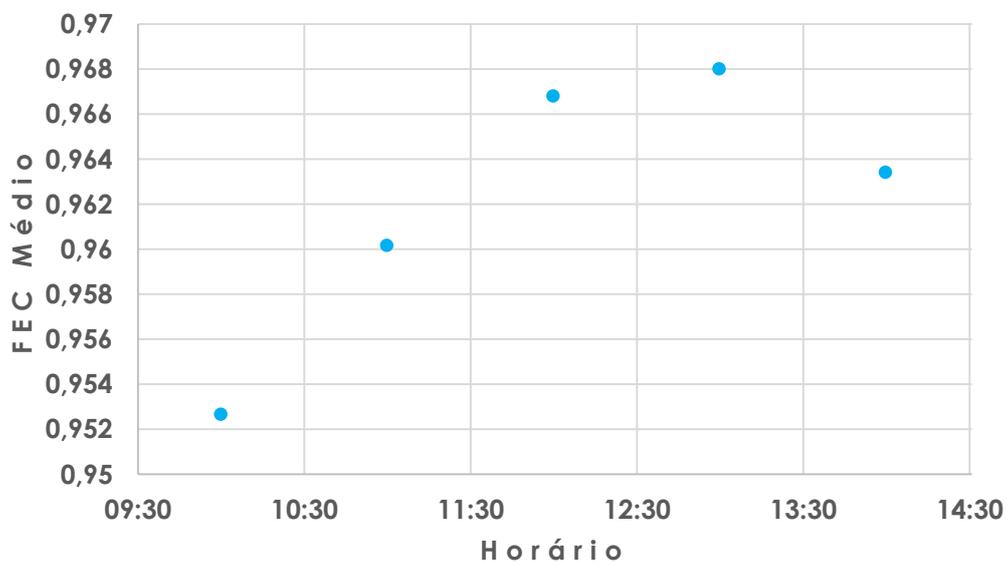
Fonte: Produção do Autor.

4.2.2. Influência da Massa Ar, vapor de água e das núvens nos módulos fotovoltaicos

Como os melhores casamentos espectrais para as tecnologias estudadas ocorreram para os espectros com fótons de maior energia média, o estudo da variação do fator espectral corrigido com a Massa Ar e com as condições de céu foi realizado com a finalidade de se avaliar como estes parâmetros

atmosféricos influenciaram o funcionamento dos módulos fotovoltaicos estudados. Gráficos para análise do efeito da Massa Ar causado pela variação do horário de coleta dos dados podem ser encontrados no Anexo D, sendo que na Figura 4.23 é mostrado um exemplo da variação do fator espectral corrigido médio com as horas de medição para o módulo de a-Si. De acordo com os gráficos da sessão D1 do Anexo D e com a Figura 4.23, os melhores casamentos espectrais ocorreram para as 13:00h para todos os módulos, com exceção do módulo de p-Si que apresentou o maior FEC médio para as 14:00 horas. Considerando que o meio dia solar oscila próximo ao meio dia do horário oficial durante o ano, os melhores casamentos não ocorreram para os menores valores de Massa Ar neste caso. Deste modo, pode ser que outros fatores atmosféricos estejam influenciando todos os módulos fotovoltaicos neste caso, sendo necessários mais estudos desta natureza.

Figura 4.23 – Exemplo da variação do Fator Espectral Corrigido médio com os horários de medição para o módulo de a-Si.

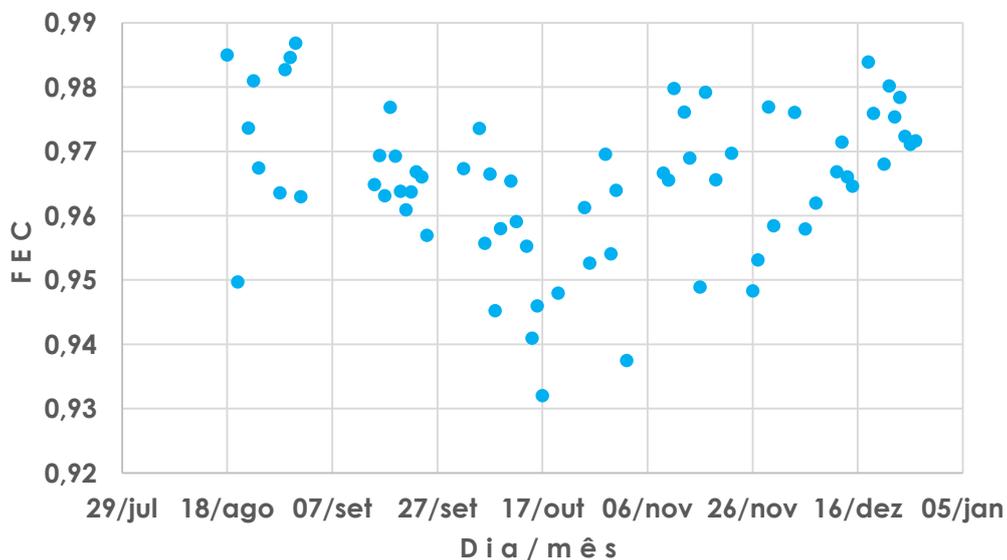


Fonte: Produção do Autor.

Os valores de fator espectral corrigido para todas as tecnologias também foram plotados no período de agosto a dezembro nos horários das 12:00h para se avaliar o efeito causado pelas variações da Massa Ar ao longo dos meses nos módulos fotovoltaicos. Estes gráficos estão na sessão D2 do Anexo D, sendo que o referente ao módulo de a-Si também é mostrado na

Figura 4.24 para o horário das 12:00h como exemplo. Nestes gráficos pode-se observar que para os módulos de Silício microcristalino, policristalino e monocristalino e o minimódulo de Arseneto de Gálio a tendência do FEC foi de aumentar durante o período estudado. Analisando o mesmo intervalo de tempo no gráfico da Figura 4.16 e as curvas de FFER relacionadas a estes meses na Figura 4.17, pode-se afirmar que o aumento desse fator está relacionado à elevação da energia média dos fótons ocasionada pela diminuição da massa de ar e o provável aumento da quantidade de água na atmosfera.

Figura 4.24 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com a condição de céu limpo para o módulo de a-Si.



Fonte: Produção do Autor.

Para os módulos de Silício amorfo e de tripla junção a variação do fator espectral corrigido apresentou um comportamento diferente ao longo do tempo se comparado às outras tecnologias estudadas. Esperava-se que para os módulos de Silício amorfo e de tripla junção o FEC apresentasse uma elevação ao longo dos meses avaliados (como o ocorrido para as outras tecnologias), uma vez que para o mesmo período de tempo o APE se elevou e tais tecnologias apresentaram seus FEC proporcionais a este parâmetro. No caso do a-Si observou-se uma queda no FEC para os meses de agosto a outubro, havendo a elevação deste parâmetro para os demais meses. O mais provável que tenha acontecido com o a-Si é que sua

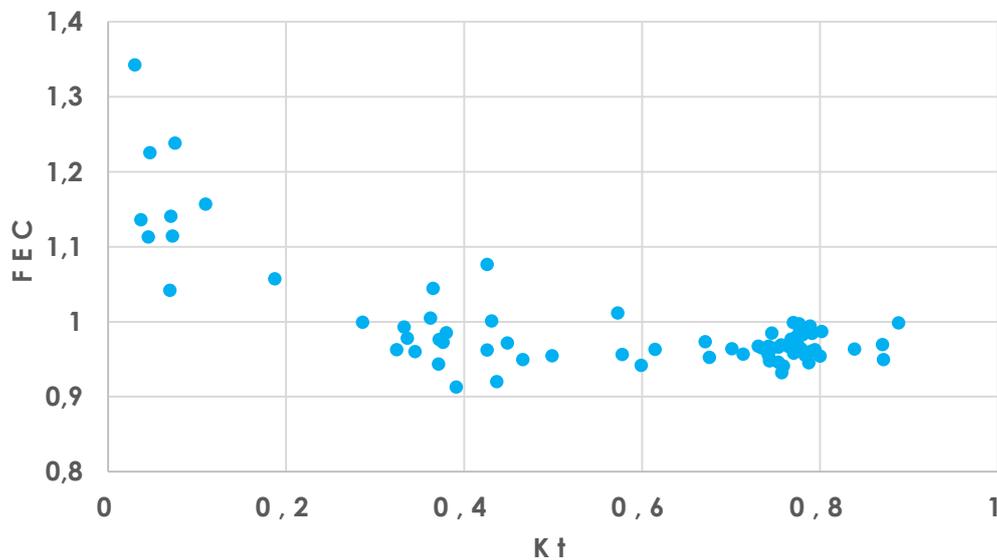
eficiência tenha experimentado uma queda como resultado do efeito Staebler-Wronsky. Mais dados deste módulo coletados ao longo do ano serão necessários para confirmar esta hipótese, uma vez que este efeito tende a se estabilizar com o tempo. No caso da tripla junção foi observada uma tendência de queda do FEC durante todo o período de estudo. Este tipo de tecnologia apresenta uma resposta espectral diferente para cada subcélula e, dependendo do casamento entre tais respostas e o espectro incidente, a corrente produzida por ela será a gerada por uma das três subcélulas. Como o espectro está em constante mudança, esta avaliação acaba exigindo mais informações que extrapolam o escopo deste trabalho. Por isso outros dados relacionados a este módulo, à atmosfera e aos espectros serão necessários para uma melhor avaliação. Além disso, a subcélula de Germânio possui uma resposta espectral na região do infravermelho próximo e por este motivo pode ser que o vapor de água esteja influenciando a corrente do módulo de tripla junção consideravelmente quando comparado com os outros módulos. Outra possibilidade é a de que outros elementos atmosféricos não considerados neste trabalho também estejam exercendo efeitos significativos neste módulo, como é o caso do Dióxido de Carbono, que apresenta linhas de absorção no Infravermelho.

Ainda de acordo com os gráficos das figuras presentes na sessão D2 do Anexo D e na Figura 4.24, observa-se que os módulos de Silício tiveram seus valores de fator espectral corrigidos menores que um para as 12h e 13h ao longo do período de trabalho. Isto significa que em campo a maioria dos módulos não apresentaram ganhos espectrais para condições que são consideradas como ideais para geração fotovoltaica, isto é, com céu ensolarado em horários próximos ao meio dia solar. Isto mostra que em campo o casamento espectral não foi melhor do que em laboratório obtido com o espectro padrão para a maioria das vezes. Este comportamento foi diferente do observado para os módulos de Arseneto de Gálio e tripla junção, que tiveram seus valores de FEC ora acima e ora abaixo de um.

Quanto aos efeitos das condições de céu, estes foram estudados através dos gráficos da variação do fator espectral corrigido com o índice de

limpidez que estão no Anexo E para as seis tecnologias. Para exemplificar, na Figura 4.25 é mostrado o gráfico do FEC versus o K_T para o módulo de Silício amorfo. Como pode ser observado, para todas as tecnologias os valores de FEC ficaram entre 0,9 e 1 para medidas realizadas com céu limpo ($K_T > 0,65$), e aumentou conforme o valor do K_T diminuiu, chegando a ocorrer ganhos espectrais para os menores valores deste índice. Isto indica que os casamentos espectrais ficaram melhores conforme K_T diminuiu a ponto da corrente medida em campo corrigida com o valor de Irradiância e temperatura se tornar maior que a medida em laboratório nas condições do STC.

Figura 4.25 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o módulo de a-Si.



Fonte: Produção do Autor.

5 CONCLUSÕES

Considerando que os efeitos espectrais nos dispositivos fotovoltaicos em campo para diversas tecnologias ainda não são bem compreendidos, este trabalho teve como objetivo principal conhecer os espectros obtidos em campo e estudar as influências de suas variações nos módulos fotovoltaicos de seis tecnologias diferentes. Os resultados mostraram primeiramente que o espectro padrão ASTM G173-03 não é representativo para os encontrados na localização de Cachoeira Paulista sob as condições estudadas, sendo que o mesmo pode acontecer para outras regiões do país. Além disso, pôde ser observado que os espectros sofreram variações, mostrando que o casamento entre eles e a resposta espectral dos módulos pode ser maior ou menor dependendo da época do ano, horário do dia, da condição de cobertura de céu e do tipo de tecnologia utilizada. Considerando que a variação espectral da radiação solar está relacionada com as condições da atmosfera local, pode-se dizer que os valores de eficiência obtidos em laboratório sob o espectro padrão não são suficientes para representar a operação de um módulo fotovoltaico em campo para diversas regiões.

Os resultados também mostraram que os espectros solares podem influenciar nos valores de corrente produzidos pelos módulos e que seus efeitos podem ser mais pronunciados em certas tecnologias fotovoltaica quando comparadas com outras. Por exemplo, o módulo de Silício amorfo aparentou sofrer muito mais os efeitos das variações espectrais que o de Silício microcristalino, comportamento este que pode estar relacionado à largura da faixa espectral no qual tais dispositivos conseguem absorver a radiação solar. O módulo de Silício amorfo apresenta uma resposta espectral que se estende por um intervalo menor que o de Silício monocristalino, o que pode torná-lo muito mais influenciável pelas variações espectrais. Por isso, o espectro da radiação solar pode vir a ser um fator a ser considerado durante o levantamento do potencial fotovoltaico de uma determinada localidade, auxiliando na escolha da melhor tecnologia de módulos fotovoltaicos.

A metodologia desenvolvida neste trabalho teve como principal meta o desenvolvimento experimental de um sistema para caracterização espectral da radiação solar e o estudo do impacto de suas variações em tecnologias de módulos fotovoltaicos baseadas no Silício, Arseneto de Gálio ou tripla junção. Esta metodologia demonstrou ser eficiente, simples de ser utilizada e de baixo custo. Para que estudos como este possam ter uma abrangência maior é importante que em trabalhos futuros espectros com maiores faixas sejam coletados, outras tecnologias de módulos fotovoltaicos sejam avaliadas e que sejam realizadas medições e estudos em outras regiões do país, como por exemplo em grandes centros urbanos. Através da criação de um banco de dados com uma série de espectros coletados ao longo do dia e de anos para diferentes regiões brasileiras será possível determinar o espectro predominante, vindo a contribuir para a elaboração de um espectro médio para cada região brasileira que será mais representativo do que o espectro padrão ASTM G173-03.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Encarte especial sobre a crise hídrica**. Brasília: SPR, 2015. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2015.
- 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. **Energy**, v. 67, p. 435-443, 2014.
- ALVARENGA, C. A. **O Módulo fotovoltaico para gerador solar de eletricidade**. Belo Horizonte: SOLENERG, 2014. Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br/files/modulo-fotovoltaico-para-gerador-solar-de-eletricidade-solenerg-out14.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E490-00A**: standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. West Conshohocken, 2014.
- 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. West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E948 – 15**: standard test method for electrical performance of photovoltaic cells using reference cells under simulated sunlight. West Conshohocken, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E1036 – 15**: standard test methods for electrical performance of nonconcentrator terrestrial photovoltaic modules and arrays using reference cells. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E973 – 10**: standard test method for determination of the spectral mismatch parameter between a photovoltaic device and a photovoltaic reference cell. West Conshohocken, 2015.

ANDERSON, A. J. **Photovoltaic translation equations**: a new approach. Golden: NREL, 1996. 25p. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/20279.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>>. Acesso em: 15 out. 2015.

ANSPAUGH, B. E. **GaAs solar cell radiation handbook**. Pasadena: NASA, 1996. 328p. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19970037642>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

ARDUINO. **ARDUINO UNO**. 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 26 nov. 2015.

AVRUTIN, V.; IZYUMSKAYA, N.; MORKOÇ, H. Semiconductor solar cells: recent progress in terrestrial applications. **Superlattices and Microstructures**, v. 49, n. 4, p. 337-364, 2011.

BELOTO, F. A. **Estudo das características de células solares de silício monocristalino**. 1983. 133p. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.

BERNI, L. A. **Grandezas radiométricas**. São José dos Campos: INPE, 2014. (Apresentado na disciplina Introdução à Radiometria ministrada em 19 set. 2014).

_____. **Fontes de radiação**. São José dos Campos: INPE, 2014.
(Apresentado na disciplina Introdução à Radiometria ministrada em 27 out. 2014).

BERNI, L. A.; VILELA, W. A.; BELOTO, A. F.; SENA, F. O. System for measuring the angular response of radiometers. In: IBERO AMERICAN OPTICS MEETING, 8.; LATIN AMERICAN MEETING ON OPTICS, LASERS, AND APPLICATIONS, 11. 2013, Porto. **Proceedings of the SPIE**, v.8785, Nov. 2013. DOI: 10.1117/12.2019888.

BETTS, T. R. **Investigation of photovoltaic device operation under varying spectral conditions**. 2004. 129p. Tese (Doutorado em Filosofia) - Loughborough University, Loughborough, 2004. Disponível em: <dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/7720/3/Thesis-2005-Betts.pdf&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 25 set. 2015.

CAMPBELL SCIENTIFIC BRASIL. **CR1000**: datalogger de medição e controle. São Paulo: Campbell Scientific, 2015. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/cr1000>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

CAMPBELL SCIENTIFIC BRASIL. **AM16/32B**: 16- or 32-channel relay multiplexer. São Paulo: Campbell Scientific, 2015. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com/am16-32b>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

CERQUEIRA, G. A.; PINTO, H. S.; FARIA, I. D.; BAPTISTA, J. C. R.; KASSMAYER, K.; SOUZA, L. B. G.; KOHLER, M. A.; ABBUD, O. A.; PINTO, V. C. **A crise hídrica e suas consequências**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas, 2015. (Boletim Legislativo, 27). Disponível em: <<https://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/boletins-legislativos/bol27>>. Acesso em: 5 set. 2015.

CHEN, C. J. **Physics of solar energy**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

COUTTS, T. J.; MEAKIN, J. D.; MEAKIN, J. D. (Eds.). **Current topics in photovoltaics**. Londres: Academic press, 1990.

DIRNBERGER, D.; BLACKBURN, G.; MÜLLER, B.; REISE, C. On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v.132, p. 431-442, 2015.

EDMUND OPTICS. **Metallic mirror coatings**. 2015. Barrington: Edmund Optics, 2015. Disponível em:
<<http://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/metallic-mirror-coatings/>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei and particles**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.

EL CHAAR, L.; LAMONT, L. A.; EL ZEIN, N. Review of photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2165-2175, 2011.

EM DISCUSSÃO! Brasília: SEGRAF, v. 25, jun. 2015. 66p. Disponível em:
<http://www12.senado.gov.br/emdiscussao/edicoes/o-desafio-da-energia/@@images/arquivo_pdf/>. Acesso em: 25 out. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Leilão de energia de reserva de 2014**: participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos: visão geral. Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em:
<http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%202014/NT_EPE-DEE-NT-150_2014.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Leilão de energia de reserva de 2015**: participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos: visão geral. Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em:
<[http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Reserva%20\(2015\)/NT_EPE-DEE-NT-127_2015-r0_completo.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Reserva%20(2015)/NT_EPE-DEE-NT-127_2015-r0_completo.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2016.

FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Amônia (NH₃) atmosférica: fontes, transformação, sorvedouros e métodos de análise. **Química Nova**, v. 27, n. 1, p. 123-130, 2004. Disponível em

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422004000100022&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 28 out. 2015.

FERNÁNDEZ, E. F.; ALMONACID, F.; RUIZ-ARIAS, J. A.; SORIA-MOYA, A. Analysis of the spectral variations on the performance of high concentrator photovoltaic modules operating under different real climate conditions. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 127, p. 179-187, 2014.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE). **Photovoltaics report**. Freiburg, mar. 2015. 43 slides. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

FRITSCHEN, L. J.; GAY, L. W. **Environmental instrumentation**. New York: Springer Science & Business Media, 1979.

FTHENAKIS, V. **Could CdTe PV modules pollute the environment?** Long Island: Brookhaven National Laboratory, 2002. Disponível em: <<http://www.docstoc.com/docs/23846772/Could-CdTe-PV-Modules-Pollute-the-Environment>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

GENTIL, B. **Estudo de usabilidade de ambientes virtuais tridimensionais através do Second Life**. 2008. 163 p. Dissertação (Mestrado em Design) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=12044@1&msg=28#>. Acesso em: 22 out. 2015.

GHENSEV, A. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. 2006. 154 p. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_almir.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2015.

GREEN, M. A; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E. D. Solar cell efficiency tables (Version 45). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 23, n. 1, p. 1-9, 2015.

HAAG, R. **Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental**. 2012. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

HARVEY, D. Spectroscopic Methods. In: _____. **Analytical chemistry 2.0**. Greencastle: MacGranHill, 2009. cap 10, p 543-666. Disponível em: <http://acad.depauw.edu/harvey_web/eText%20Project/AnalyticalChemistry2.0.html>. Acesso em: 20 out. 2015.

HATHAWAY, D. H. The solar cycle. **Living Reviews In Solar Physics**, v. 7, n. 1, p. 1-81, 2010. Disponível em: <<http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2010-1/>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

HORVATH, H. Atmospheric light absorption: a review. **Atmospheric Environment Part A: General Topics**, v. 27, n. 3, p. 293-317, 1993.

INTERNATIONAL ADVANCED RESEARCH CENTRE FOR POWDER METALLURGY AND NEW MATERIALS (ARCI). **Pilot scale R&D for CIGS thin film solar cells**. Telangana: ARCI, 2016. Disponível em: <<http://www.arci.res.in/programmes-csem#153>>. Acesso em: 13 jan. 2016.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2007: mitigation of climate change**. Reino Unido: Cambridge University Press, 2007. 863 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4_wg3_full_report.pdf>. Acesso em: 18 set. 2015.

_____. **Climate change 2013: the physical science basis**. Reino Unido: Cambridge University Press, 2013. 222 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf>. Acesso em: 21 set. 2015.

_____. **Renewable energy sources and climate change mitigation**. Reino Unido: Cambridge University Press, 2012. 246 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf>. Acesso em: 21 set. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Solar energy perspectives**. Luxemburgo: Imprimerie Centrale, 2011. 234 p. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/solar_energy_perspectives2011.pdf>. Acesso em: 18 set. 2015.

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

ISHII, T.; OTANI, K.; TAKASHIMA, T. Effects of solar spectrum and module temperature on outdoor performance of photovoltaic modules in round-robin measurements in Japan. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 19, n. 2, p. 141-148, 2011.

JACOB, D. **Introduction to atmospheric chemistry**. Princeton: Princeton University Press, 1999.

JARDINE, C. N.; BETTS, T. R.; GOTTSCHALG, R.; INFELD, D. G.; LANE, K. Influence of spectral effects on the performance of multijunction amorphous silicon cells. In: PHOTOVOLTAIC IN EUROPE CONFERENCE, 2002, Roma. **Proceedings...** Itália: ETA-Florence Renewable Energies, 2002.

KLEIN, G. A. **Industrial color physics**. Herrenberg: Springer, 2010.

KÖHLER, A; BÄSSLER, H. **Electronic processes in organic semiconductors: an introduction**. Weinheim: John Wiley & Sons, 2015.

KWARIKUNDA, N.; VAN DYK, E. E.; VORSTER, F. J.; OKULLO, W. Effect of spectral changes on I-V parameters of triple junction solar cells. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE SA INSTITUTE OF PHYSICS, 58., 2013, Johannesburg. **Proceedings...** SAIP, 2013. Disponível em: <<http://events.saip.org.za/getFile.py/access?contribId=266&sessionId=7&resId=0&materialId=paper&confId=32>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

LEE, H. S. Solar cells. In: LEE, H. S. (eds.). **Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. p. 478-483.

LIOU, K. N. **Introduction to atmospheric radiation**. 2.ed. San Diego: Academic press, 2002.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2002.

MACCARTNEY, E. J. **Absorption and emission by atmospheric gases the physical processes**. New York: John Wiley, 1983.

MARQUES, K.; PEREIRA, T. P.; ASSIS, S. V. Análise do comportamento mensal do índice de limpidez. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2000. p. 116-121. Disponível em: < <http://www.cbmet.com/cbm-files/12-05950f2745451a32944d9ac46c59567c.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT). **The future of solar energy**: an interdisciplinary MIT study. Massachusetts: Cambridge University Press, 2015. Disponível em: <https://mitei.mit.edu/system/files/MIT_Future_of_Solar_Energy_Study_compressed.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

MCEVOY, A.; CASTANER, L.; MARKVART, T. **Solar cells**: materials, manufacture and operation. Oxford: Academic Press, 2012.

MILES, R. W.; HYNES, K. M.; FORBES, I. Photovoltaic solar cells: an overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, v. 51, n. 1, p. 1-42, 2005.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **ProGD**: Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica. Brasília: MME, dez. 2015. 17 slides. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3013891/15.12.2015+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+ProGD/bee12bc8-e635-42f2-b66c-fa5cb507fd06?version=1.0>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

MOOSMÜLLER, H.; CHAKRABARTY, R. K.; ARNOTT, W. P. Aerosol light absorption and its measurement: a review. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 110, n. 11, p. 844-878, 2009.

MYERS, D. Evaluation of the performance of the PVUSA rating methodology applied to DUAL junction PV technology. In: AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY ANNUAL CONFERENCE, 2009, Buffalo. **Proceedings...** Springfield: NREL, 2009. p. 1-7. Disponível em: < <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45376.pdf>>. Acesso em: 31 nov. 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Tour of the electromagnetic spectrum**. [S.l.]: NASA, 2012. Disponível em < http://missionscience.nasa.gov/ems/TourOfEMS_Booklet_Web.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2015.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Research cell efficiency records**. 25 fev. 2016. 1 fotografia, color., 65 cm x 116 cm. Disponível em: <http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg>. Acesso em: 14 abr. 2016.

NOFUENTES, G.; GARCÍA-DOMINGO, B.; MUÑOZ, J. V.; CHENLO, F. Analysis of the dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution. **Applied Energy**, v. 113, p. 302-309, 2014.

NOLL, S. Removing the signature of the Earth's atmosphere from astronomical spectra. Innsbruck: Uni Innsbruck, abr. 2014. 46 slides. Disponível em: <http://www.mpe.mpg.de/5816549/noll_apr2014.pdf>. Acesso em: 26 out. 2015.

PALMER, J. M.; GRANT, B. G. **The art of radiometry**. Bellingham: Spie Press, 2009.

PEREIRA, E.; MARTINS, F.; ABREU, S.; RUTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 64 p. Disponível em < http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2015.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; THOMAZ, J. C.; NOGUEIRA, J. **Treinamento teórico-prático em avaliação de potencial de recurso energético solar**. Natal: Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, 2014. 83 p.

PERLOTTI, E. et al. **Proposta para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**: estudo do grupo setorial de sistemas fotovoltaicos da ABINEE. São Paulo: ABINEE, 2012. Disponível em < <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014. 529 p. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2015.

PV EDUCATION. **Properties of sunlight**. Desenvolvido por Christiana Honsberg e Stuart Bowden. 2015. Disponível em: < <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/photon-flux>>. Acesso em: 20 out. 2015.

PVPERFORMANCE MODELING COLLABORATIVE (PVPMC). **Spectral mismatch**. Desenvolvido por SANDIA. Disponível em: <<https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-mismatch/>>. Acesso em: 13 nov. 2015.

RESENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (Ren 21). **10 years of renewable energy progress**. Paris: Ren21 Secretariat, 2014. 48 p. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/TopicalReports/REN21_10yr.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2016.

ROBLES-KELLY, A.; HUYNH, C. P. **Imaging spectroscopy for scene analysis**. Londres: Springer, 2013.

SAYÃO, A. C. **Estudo da variabilidade sazonal da profundidade óptica do aerossol em São Paulo a partir de radiômetros MFRSR**. 2008. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-16072008-231852/>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

STADLER, A. Transparent conducting oxides: an up-to-date overview. **Materials**, v. 5, n. 4, p. 661-683, 2012.

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. **Journal of applied physics**, v. 32, n. 3, p. 510-519, 1961.

SILVA, V. A. M. **influência da cobertura do céu na estimativa da radiação solar utilizando modelo digital de elevação**. 2011. 56 p. Monografia (Especialização em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL. **O que é o SIN**. Brasília: ONS, 2014. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 28 mar. 2016.

SMITH, R. M.; JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Outdoor PV module degradation of current-voltage parameters. In: WORLD RENEWABLE ENERGY FORUM, 2012, Denver. **Proceedings...** Springfield: NREL, 2012. p. 1-7. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/53713.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

TANAKA, A. Toxicity of indium arsenide, gallium arsenide, and aluminium gallium arsenide. **Toxicology and Applied Pharmacology**, v. 198, n. 3, p. 405-411, 2004.

TRAGER, F. **Handbook of lasers and optics**. New York: Springer, 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **O Sol: a nossa estrela**. Desenvolvido por Kepler S. O. Filho e Maria F. O. Saraiva. Porto Alegre: UFRGS, 2015. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Climate change indicators in the United States: 2014**. 3.ed. Washington, D.C.:EPA, 2014. 107 p. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/climatechange/pdfs/climateindicators-full-2014.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2015.

VILELA, W. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. 2010. 177 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologias Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/389G8B5>>. Acesso em: 13 maio 2016.

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

YOON, H. W.; GIBSON, C. E. **NIST measurement services: spectral irradiance calibrations**. Gaithersburg: NIST, 2011. Disponível em: <<http://www.nist.gov/calibrations/upload/sp250-89.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2015.

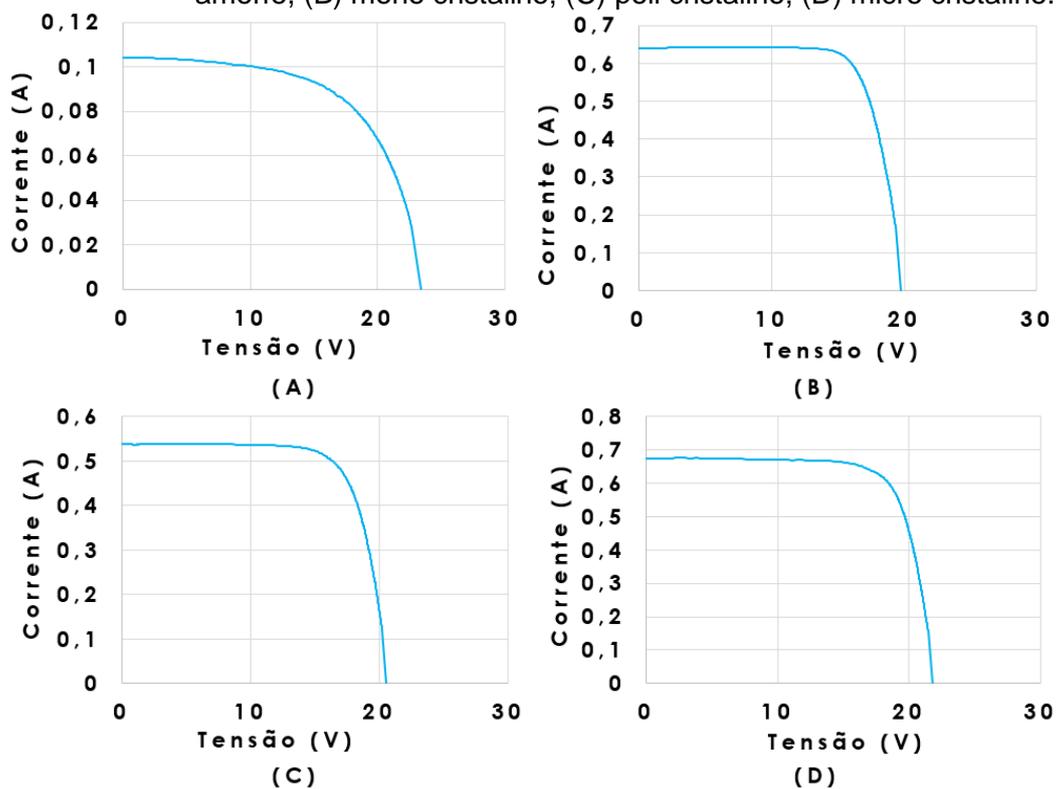
YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: óptica e física moderna**. São Paulo: Pearson, 2009.

ZEMAN, M. Solar cell conversion-efficiency limits. In: ZEMAN, M. (ed.). **Solar cells**. Delft: [S.n.], 2015. p. 5.1-5.12. Disponível em: <<http://aerostudents.com/files/solarCells/solarCellsTheoryFullVersion.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS I x V DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

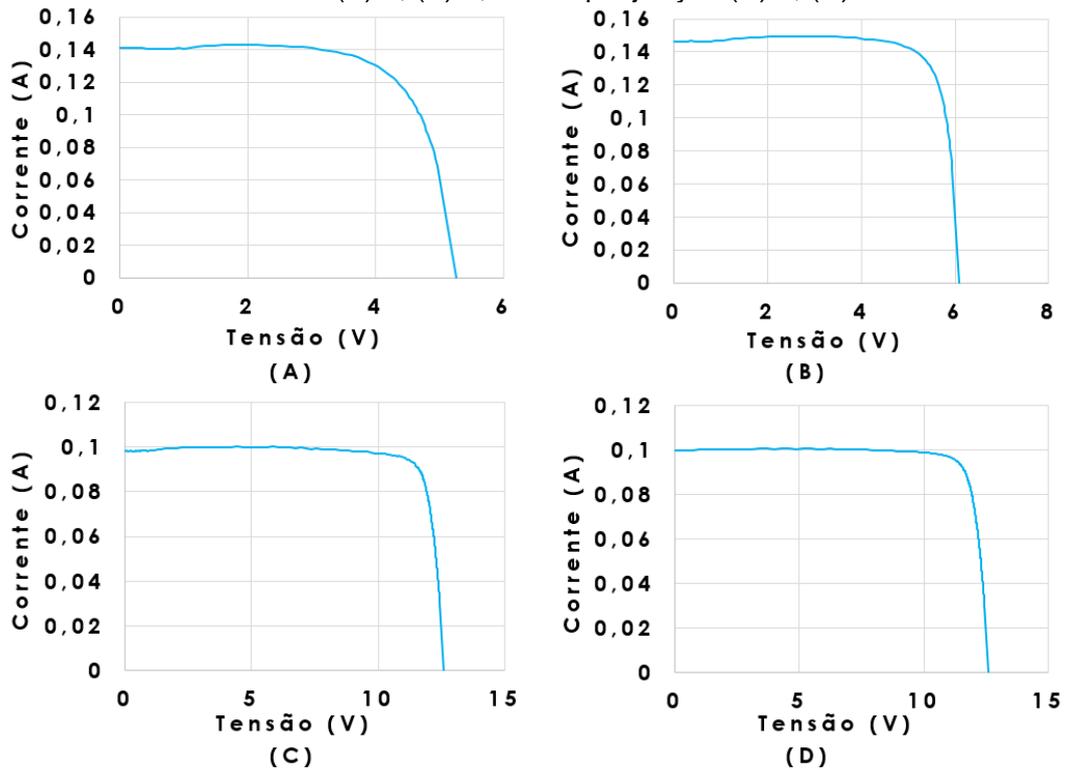
A.1 Curvas I x V obtidas sob o Simulador Solar de modelo Sol 2mx2m da Optosol

Figura A.1 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G dos módulos de Silício – (A) amorfo, (B) mono cristalino, (C) poli cristalino, (D) micro cristalino.



Fonte: Produção do Autor.

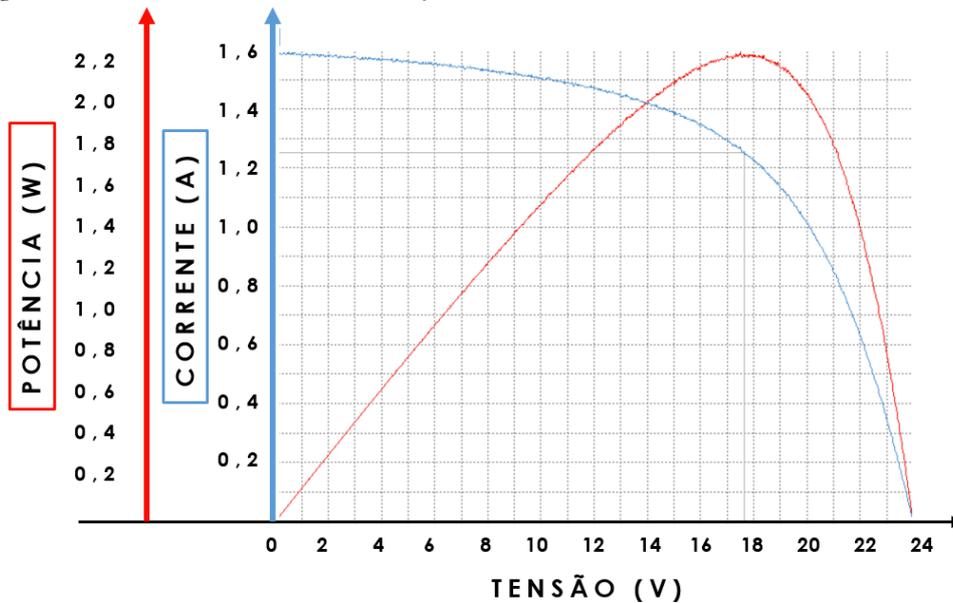
Figura A.2 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G dos minimódulos de Arseneto de Gálio – (A) 1, (B) 2, e de tripla junção (C) 1, (D) 2.



Fonte: Produção do Autor.

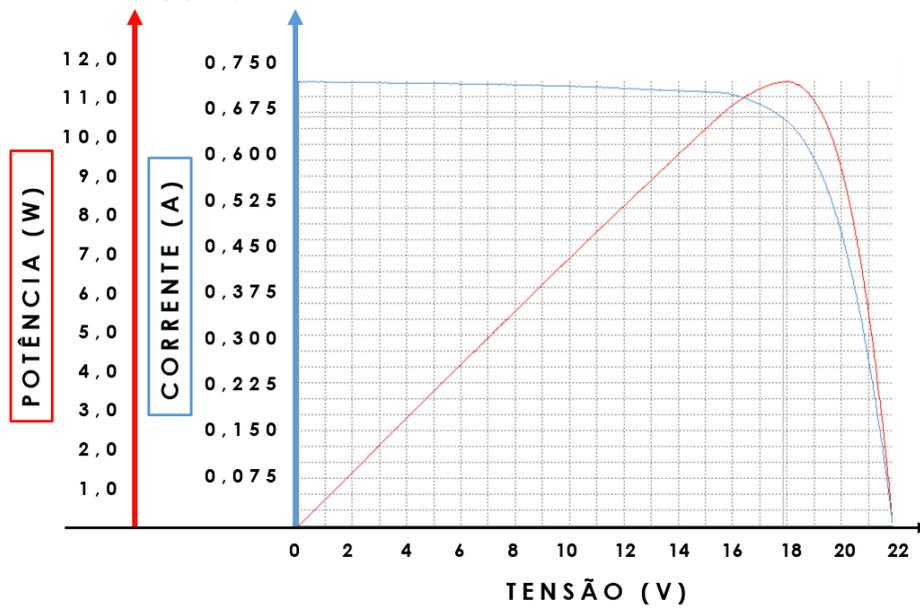
A.2 Curvas I x V obtidas sob o Simulador Solar de modelo HighLight LMT da PASAN

Figura A.3 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do módulo de Silício amorfo.



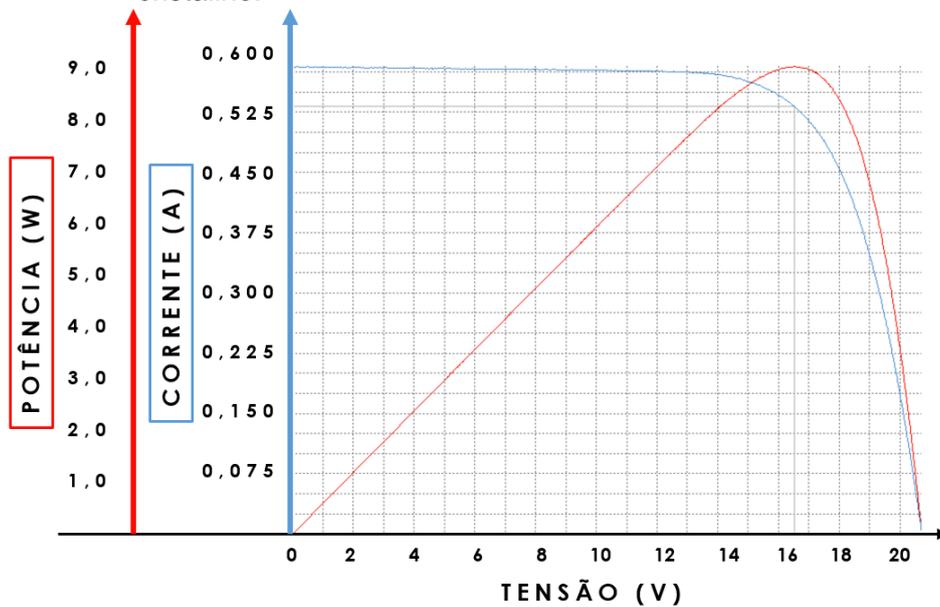
Fonte: Produção do Autor.

Figura A.4 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do módulos de Silício micro cristalino.



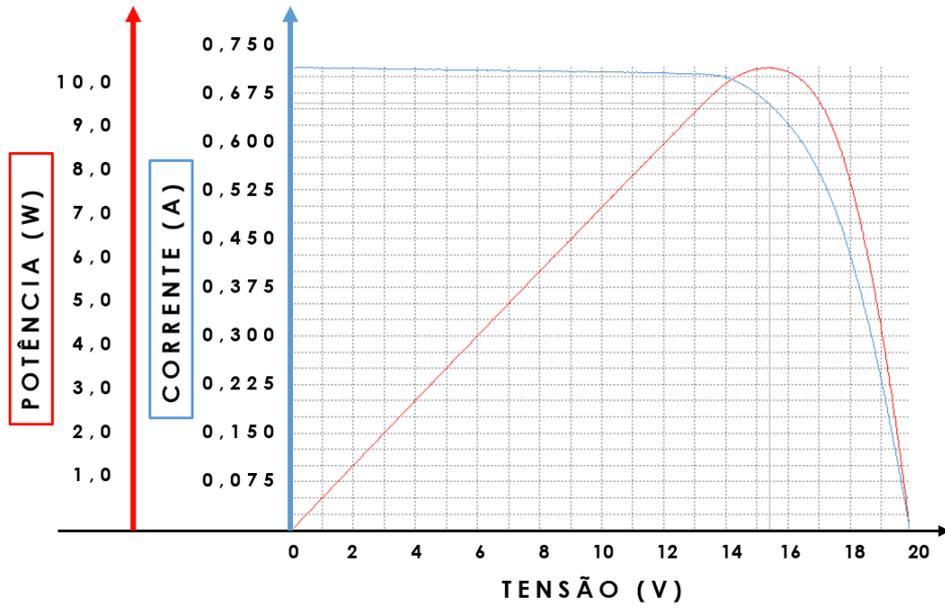
Fonte: Produção do Autor.

Figura A.5 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do módulos de Silício poli cristalino.



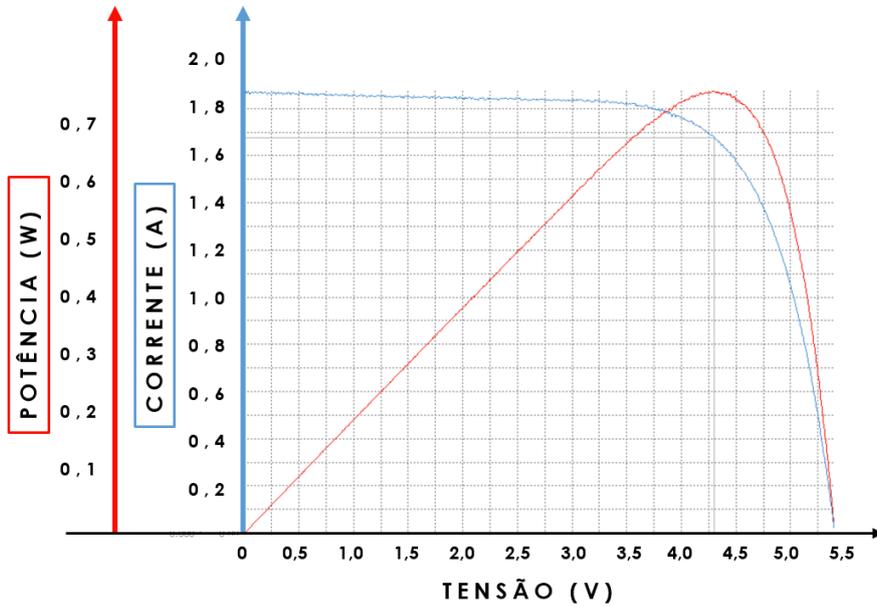
Fonte: Produção do Autor.

Figura A.6 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do módulo de Silício mono cristalino.



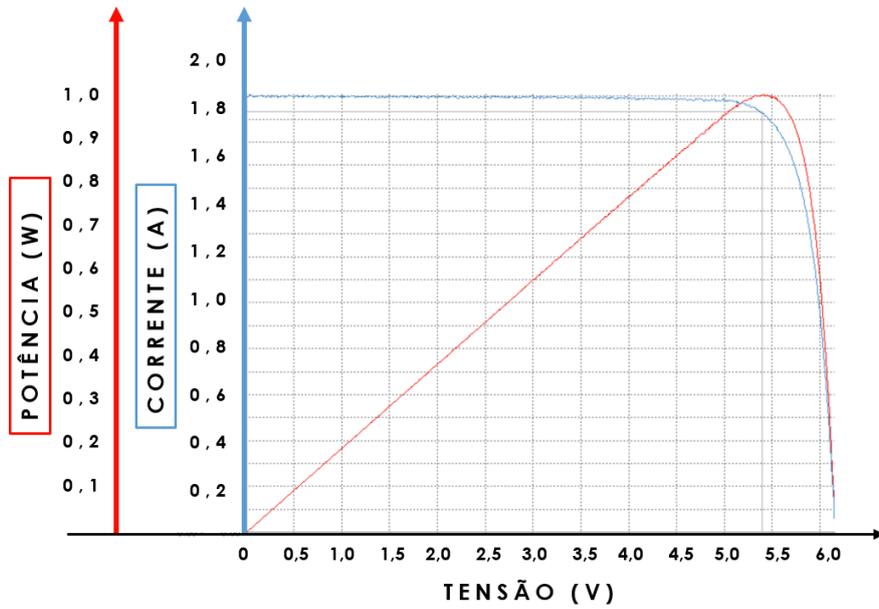
Fonte: Produção do Autor.

Figura A.7 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de Arseneto de Gálio 1.



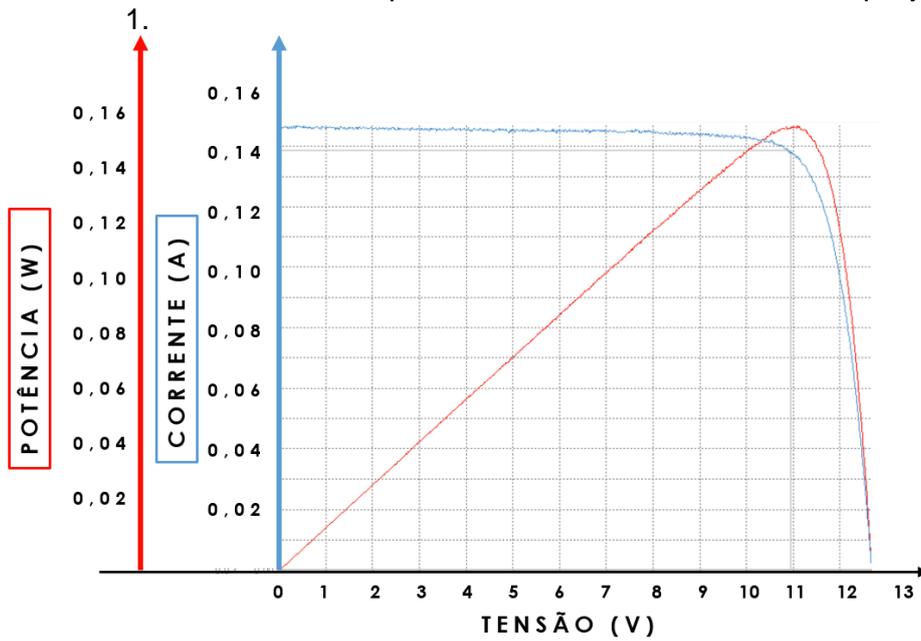
Fonte: Produção do Autor.

Figura A.8 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de Arseneto de Gálio 2.



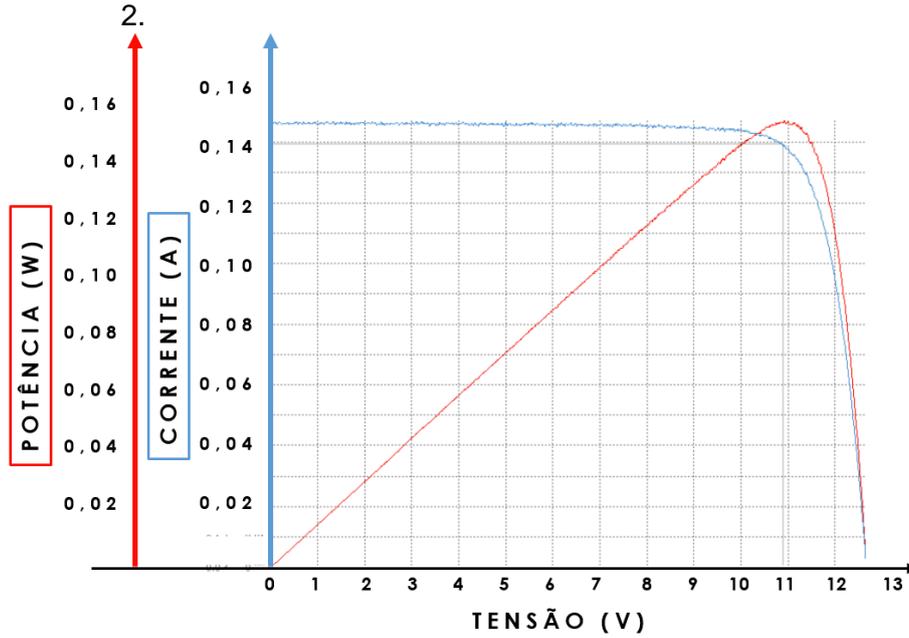
Fonte: Produção do Autor.

Figura A.9 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de tripla junção



Fonte: Produção do Autor.

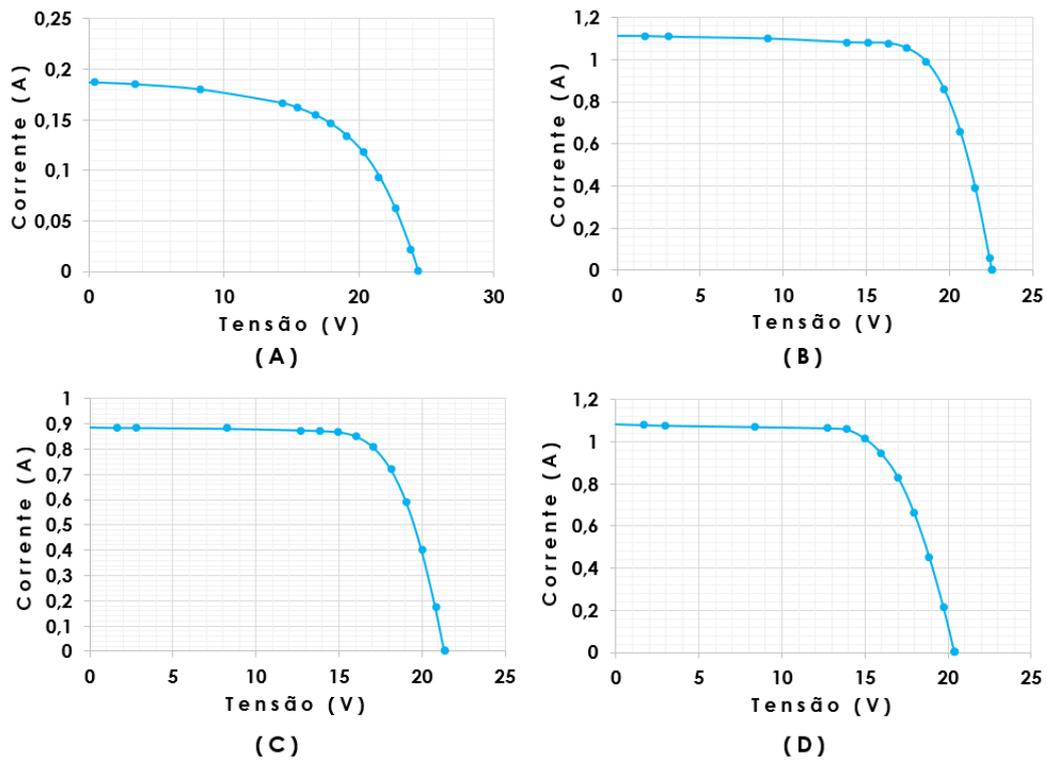
Figura A.10 – Curvas I x V sob o espectro AM1.5G do minimódulo de tripla junção



Fonte: Produção do Autor.

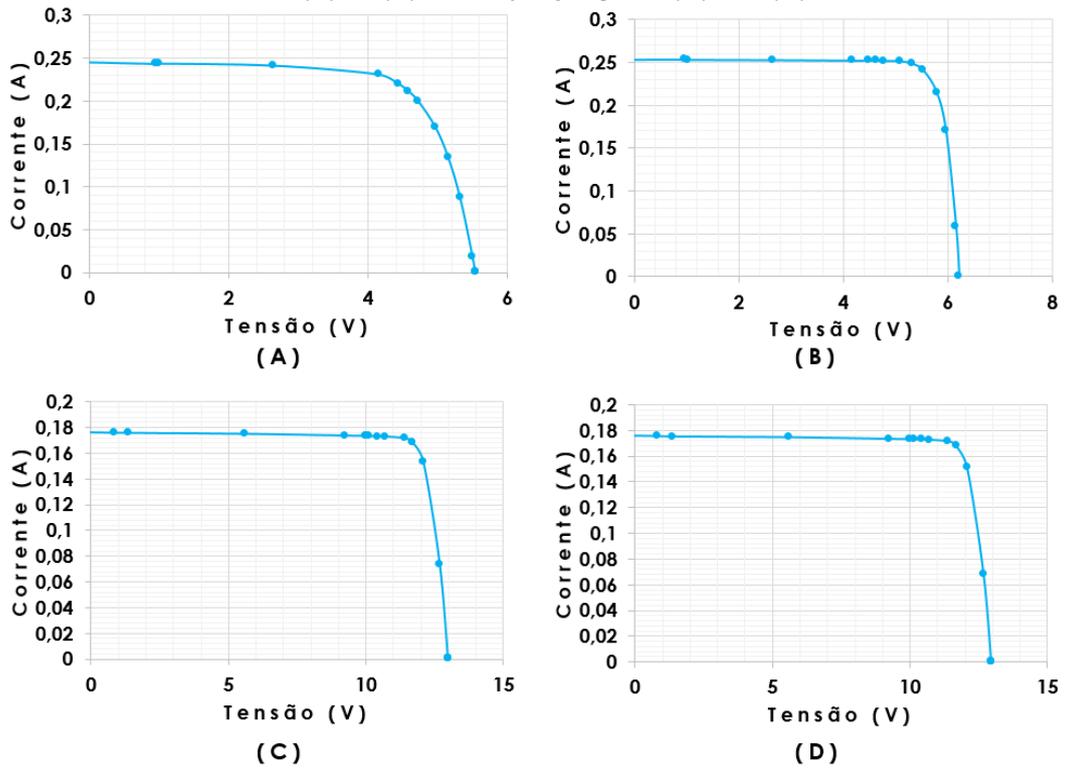
A.3 Curvas I x V obtidas sob o Simulador Solar de modelo LAPPS da Alpha – Ômega

Figura A.11 – Curvas I x V sob o espectro AM0 dos módulos de Silício – (A) amorfo, (B) mono cristalino, (C) poli cristalino e (D) micro cristalino.



Fonte: Produção do Autor.

Figura A.12 – Curvas I x V sob o espectro AM0 dos minimódulos de Arseneto de Gálio – (A) 1, (B) 2, e tripla junção - (C) 1 e (D) 2.

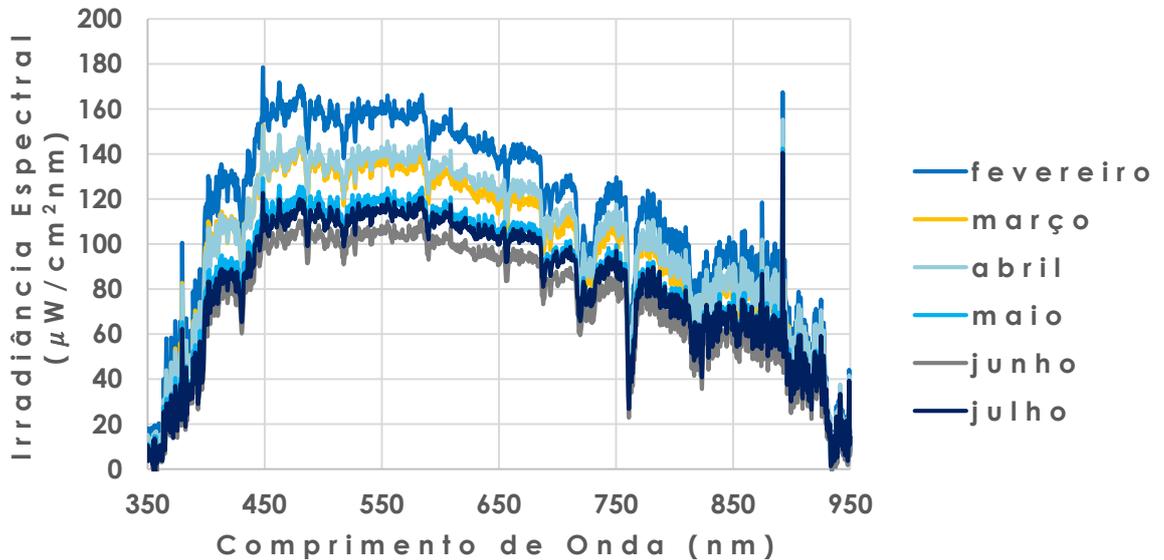


Fonte: Produção do Autor

ANEXO B – DADOS ESPECTRAIS COLETADOS

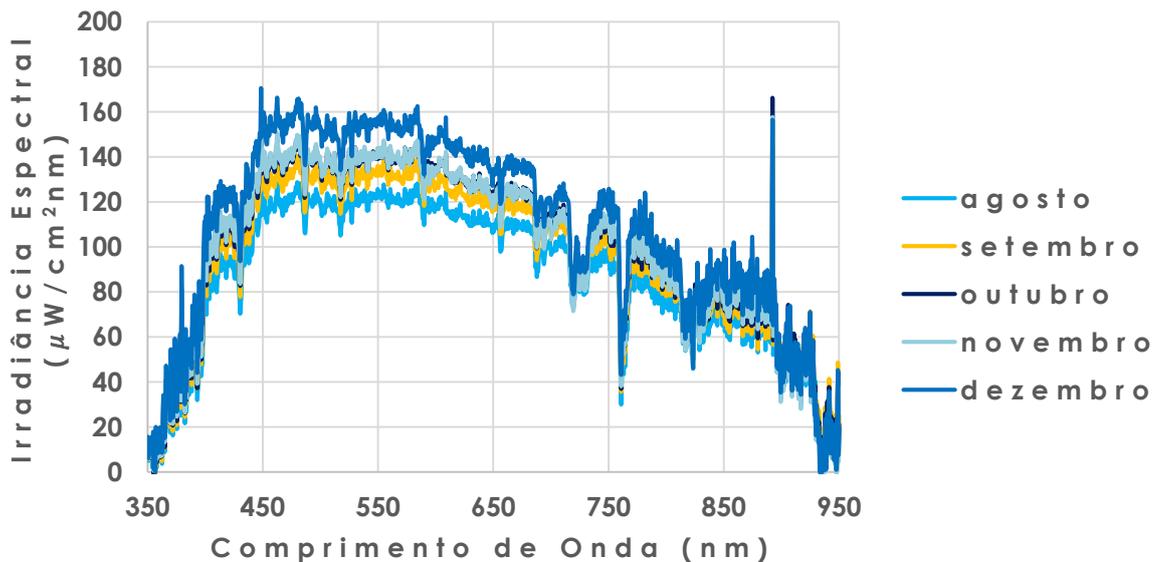
B.1 Variações espectrais ao longo do ano

Figura B.1 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00 sob condição de céu ensolarado para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho e julho.



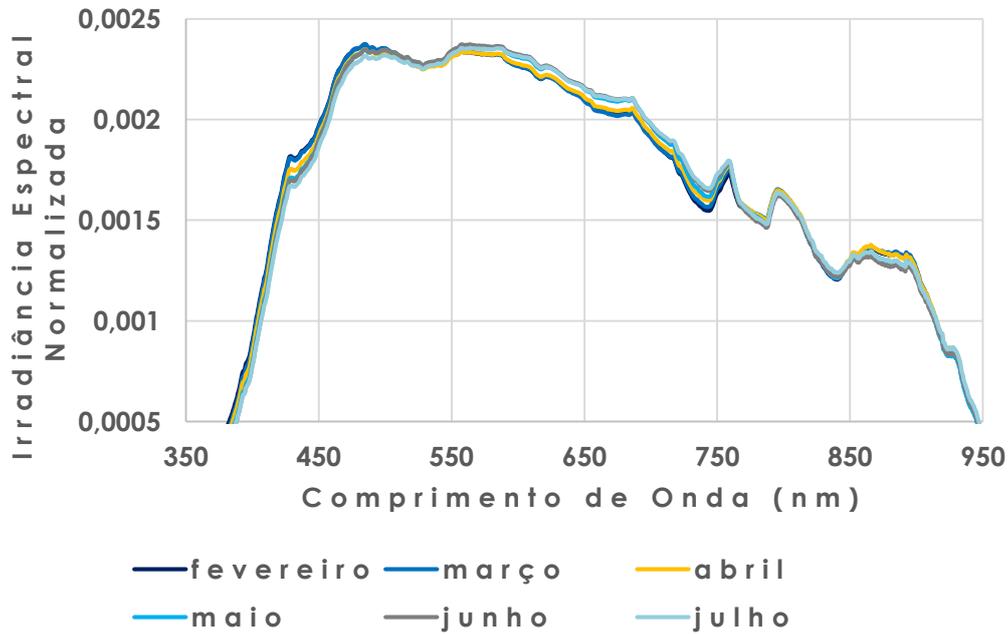
Fonte: Produção do Autor.

Figura B.2 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00 sob condição de céu ensolarado para os meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro.



Fonte: Produção do Autor.

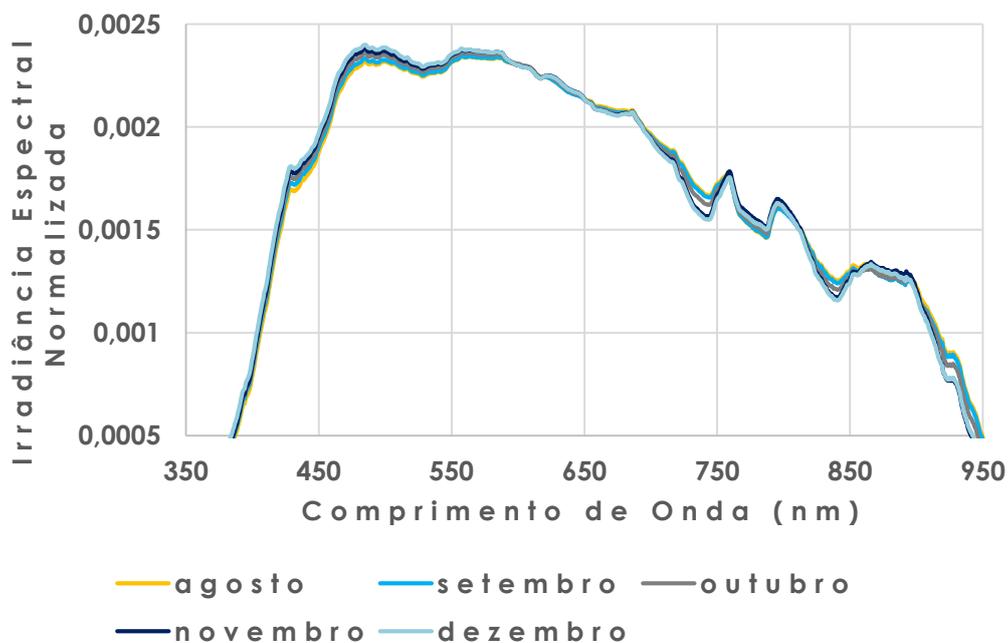
Figura B.3 – Espectros médios normalizados da irradiância solar coletados às 12:00h sob condição de céu ensolarado para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho e julho.



Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

Figura B.4 – Espectros médios normalizados da irradiância solar coletados às 12:00h sob condição de céu ensolarado para os meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro. Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

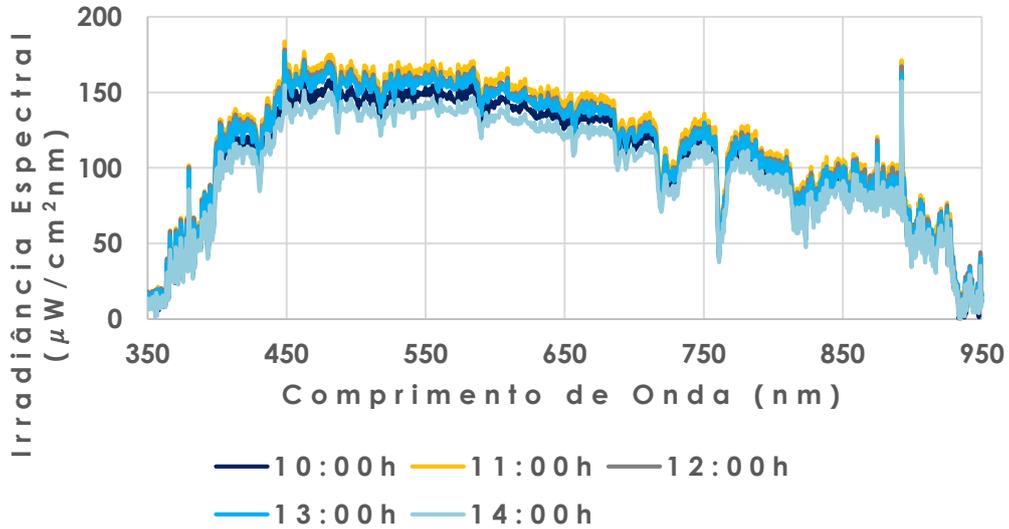


Os gráficos foram suavizados com a técnica de média móvel.

Fonte: Produção do Autor.

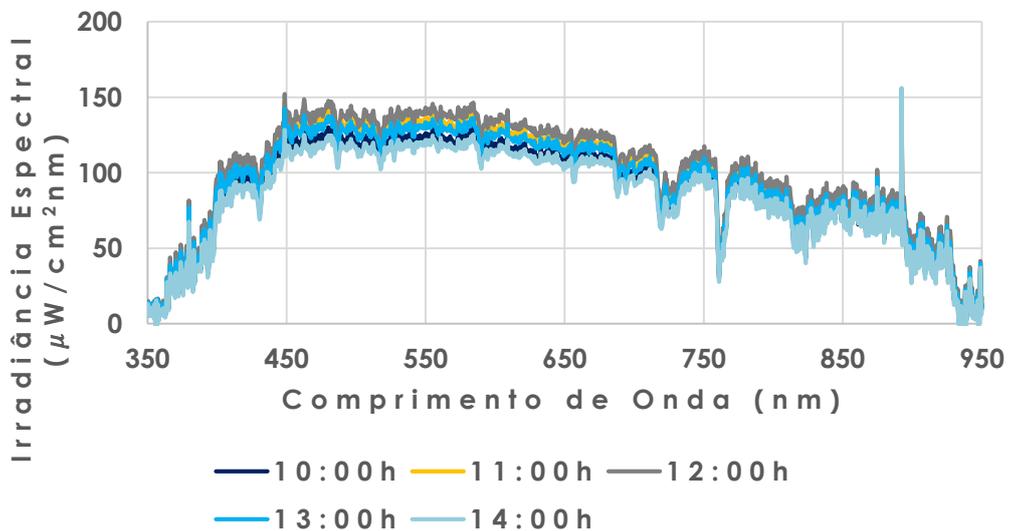
B.2 Variações espectrais ao longo das horas

Figura B.5 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de fevereiro.



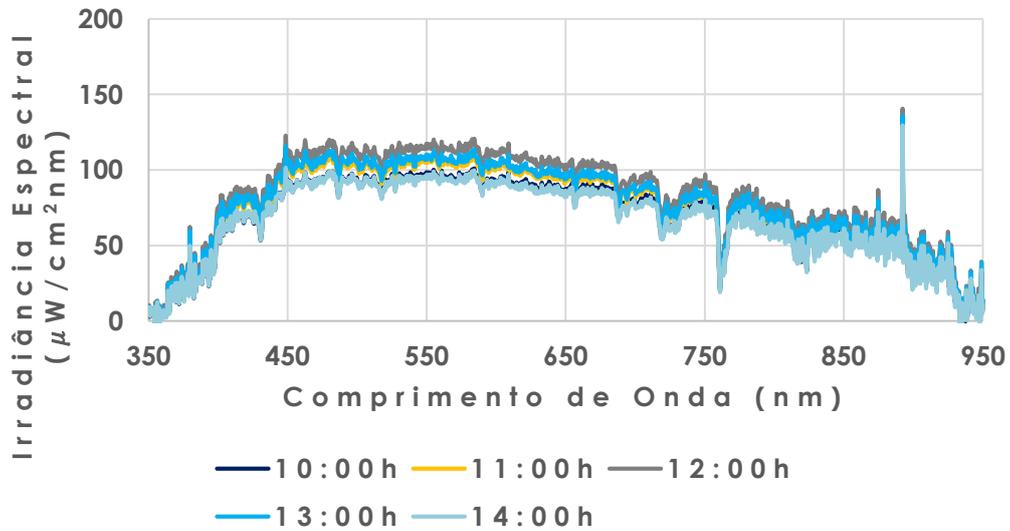
Fonte: Produção do Autor.

Figura B.6 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de abril.



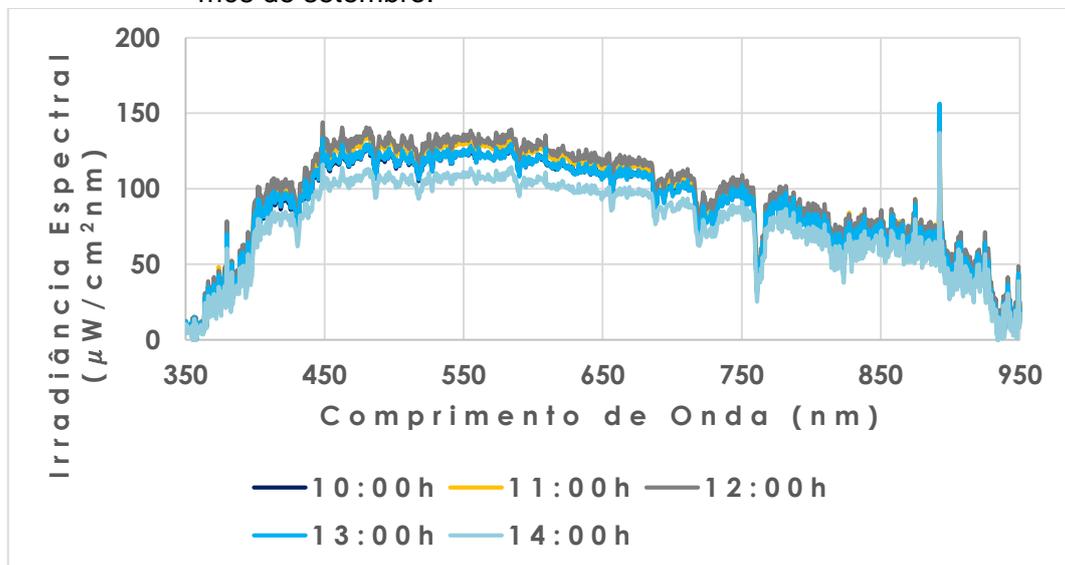
Fonte: Produção do Autor.

Figura B.7 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de julho.



Fonte: Produção do Autor.

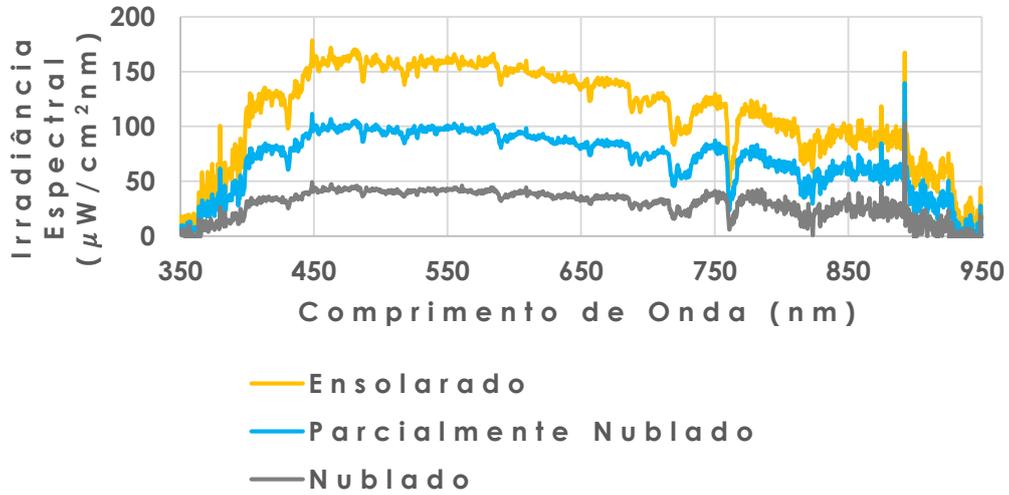
Figura B.8 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h e 14:00h sob condição de céu ensolarado para o mês de setembro.



Fonte: Produção do Autor.

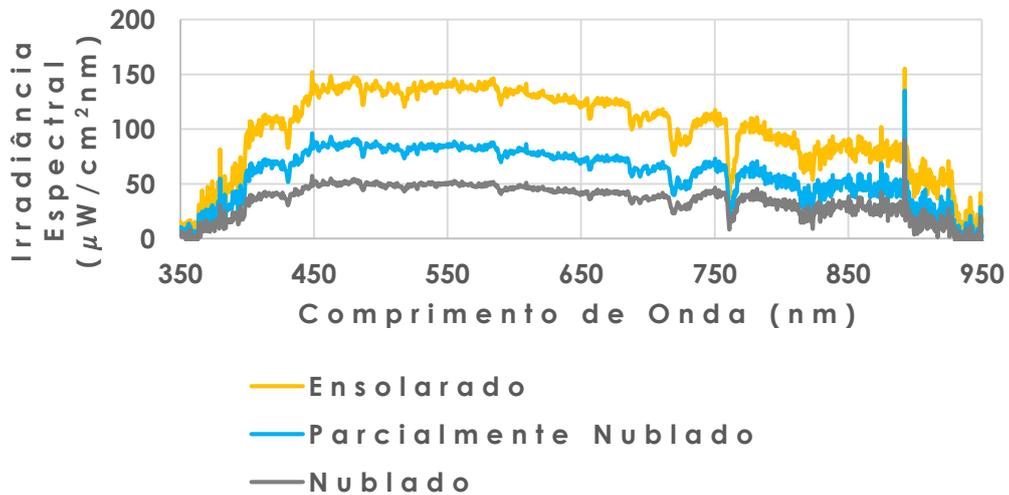
B.3 Variações espectrais de acordo com as condições de céu

Figura B.9 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de fevereiro.



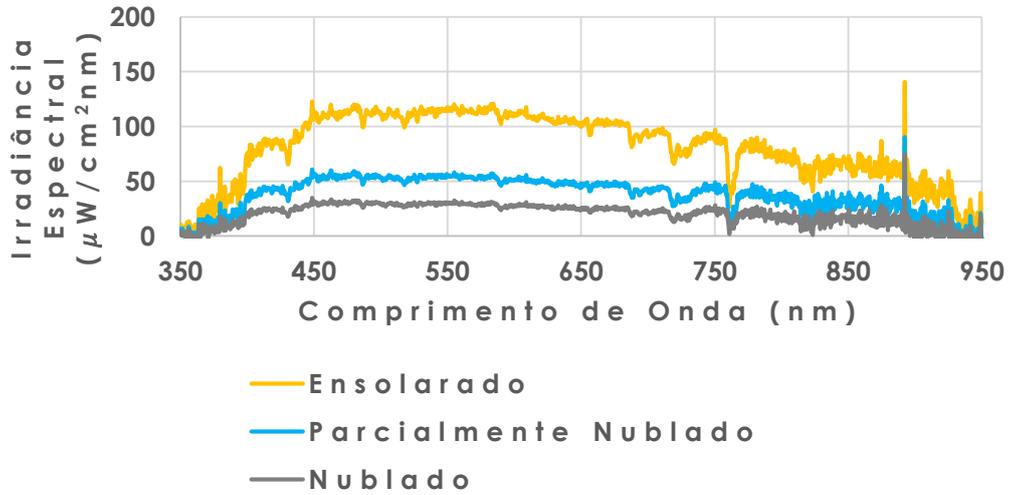
Fonte: Produção do Autor.

Figura B.10 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de abril.



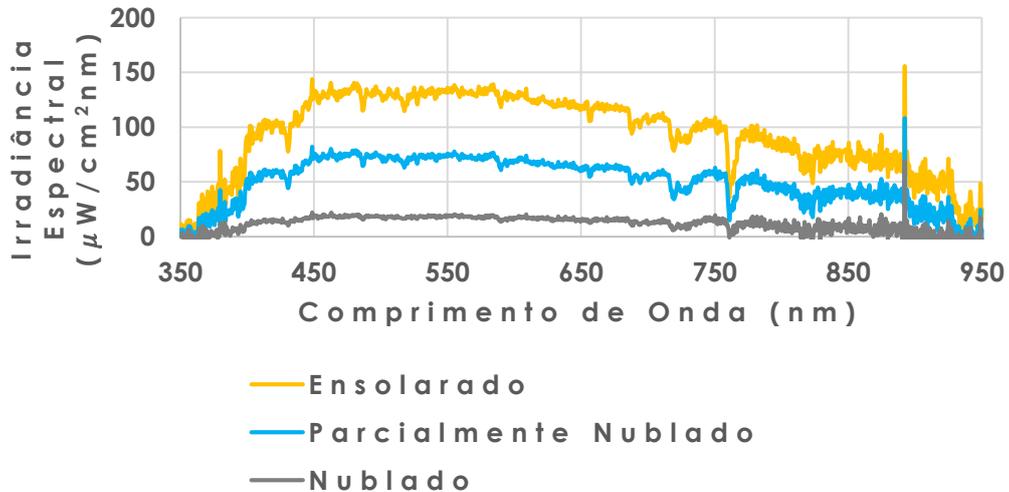
Fonte: Produção do Autor.

Figura B.11 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de julho.



Fonte: Produção do Autor.

Figura B.12 – Espectros médios da irradiância solar coletados às 12:00h sob as condições de céu ensolarado, parcialmente nublado e nublado para o mês de setembro.

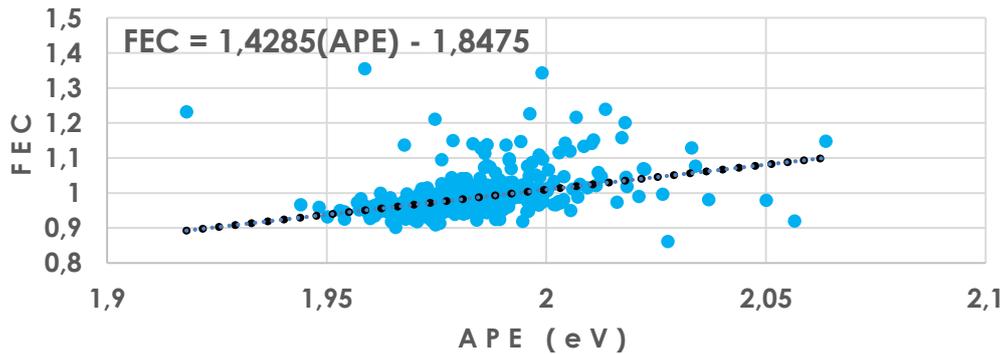


Fonte: Produção do Autor.

ANEXO C – RELAÇÃO DO APE COM OS VALORES DE FEC E CORRENTE DE CURTO CIRCUITO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

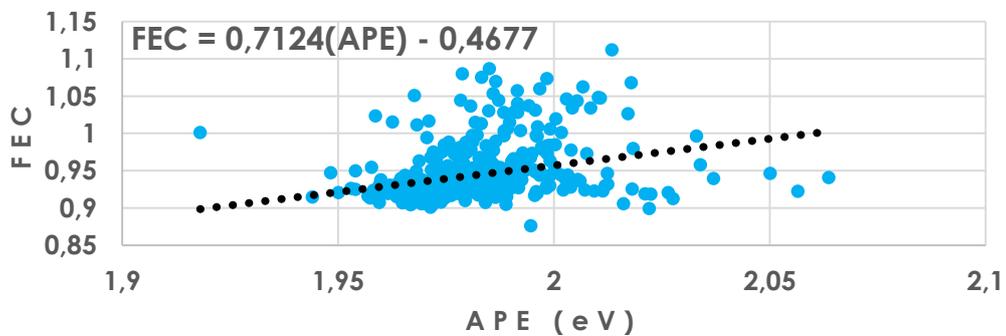
C.1 Gráficos da relação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons

Figura C.1 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício amorfo. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.



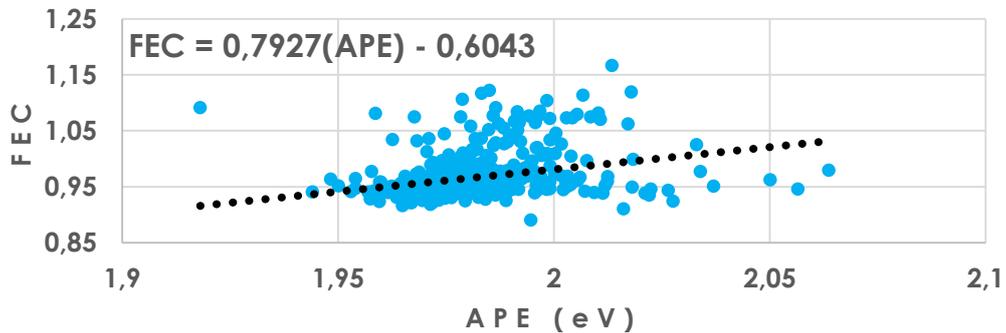
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.2 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício micro cristalino. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.



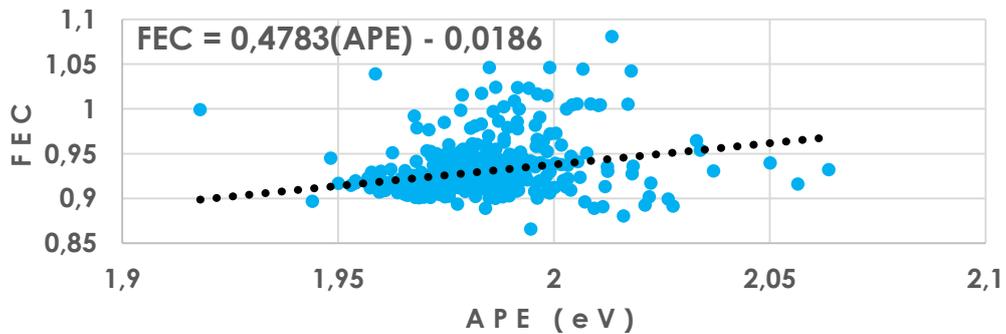
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.3 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício poli cristalino. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.



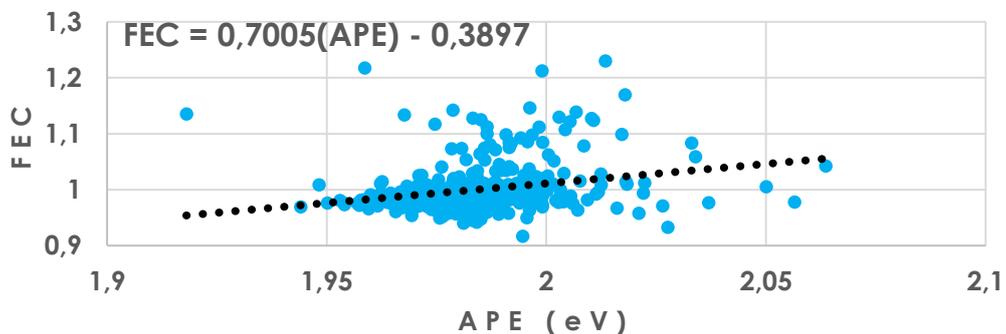
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.4 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício mono cristalino. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.



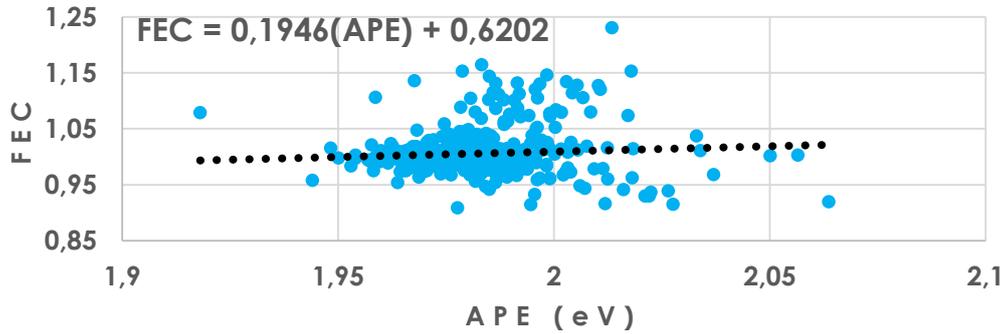
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.5 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.



Fonte: Produção do Autor.

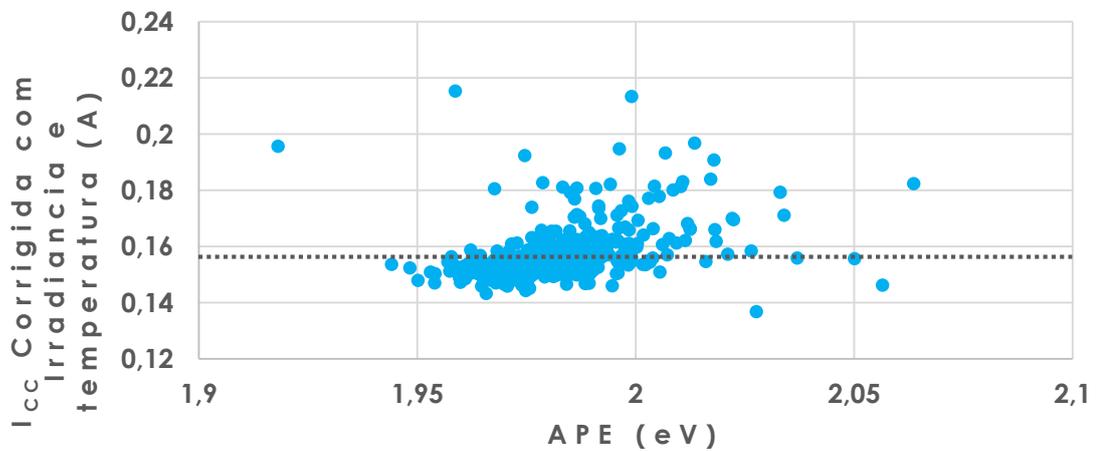
Figura C.6 – Variação do Fator Espectral Corrigido com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de tripla junção 1. A linha representa a tendência dos pontos e a equação apresentada descreve esta reta.



Fonte: Produção do Autor.

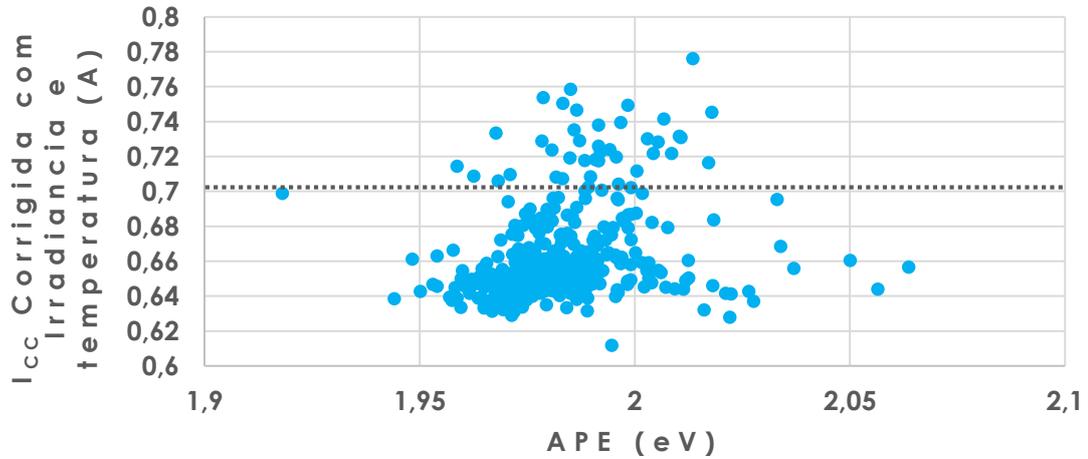
C.2 Gráficos da relação da Corrente de Curto Circuito Medida em campo corrigida em irradiância e temperatura com a Energia Média dos Fótons

Figura C.7 – Variação da I_{CC} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício amorfo. A linha representa a I_{CC} no STC.



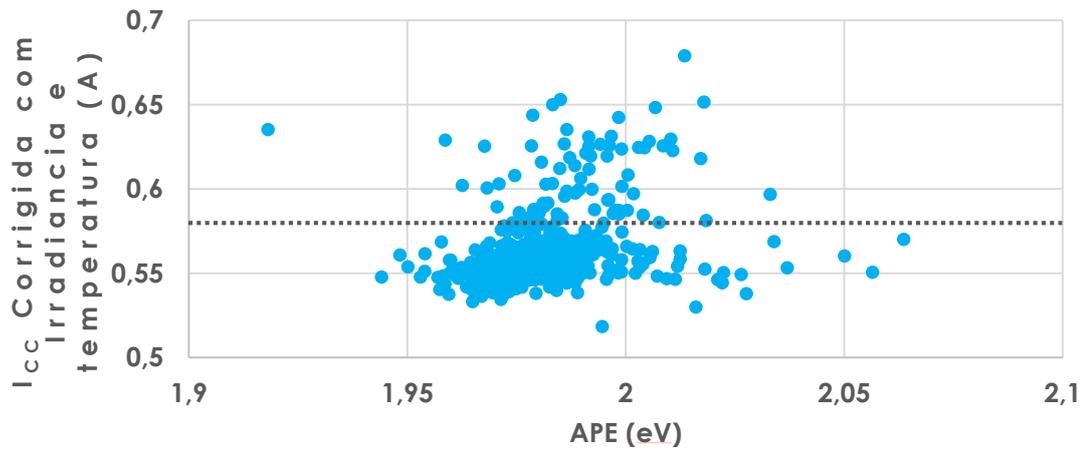
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.8 – Variação da I_{CC} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício micro cristalino. A linha representa a I_{CC} no STC.



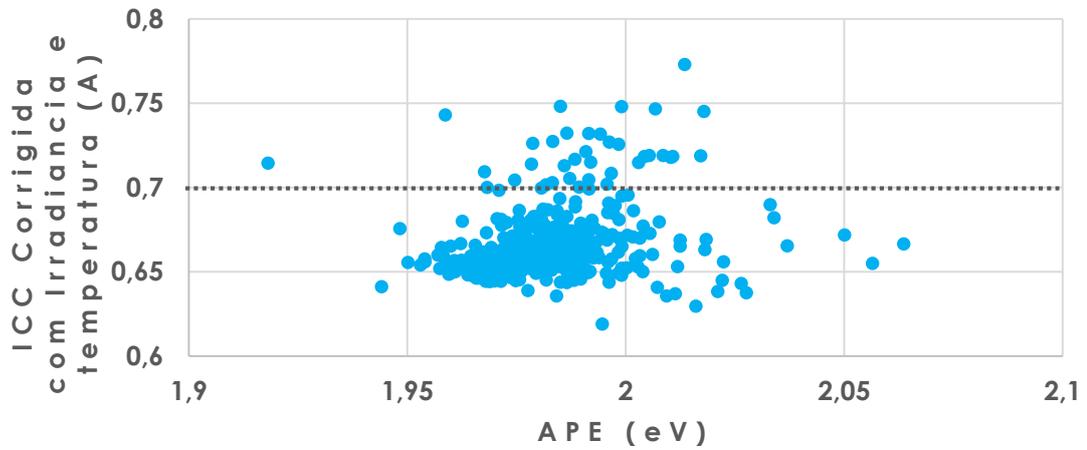
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.9 – Variação da I_{CC} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício poli cristalino. A linha representa a I_{CC} no STC.



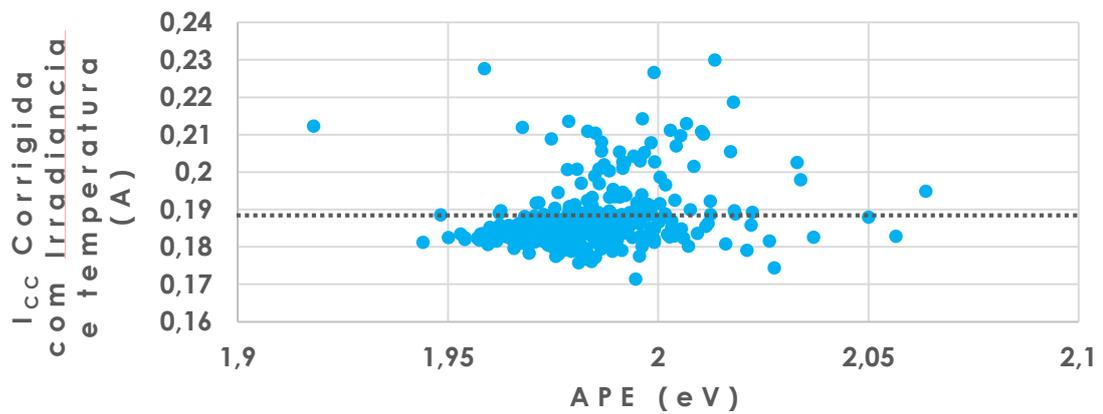
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.10 – Variação da I_{CC} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o módulo de Silício mono cristalino. A linha representa a I_{CC} no STC.



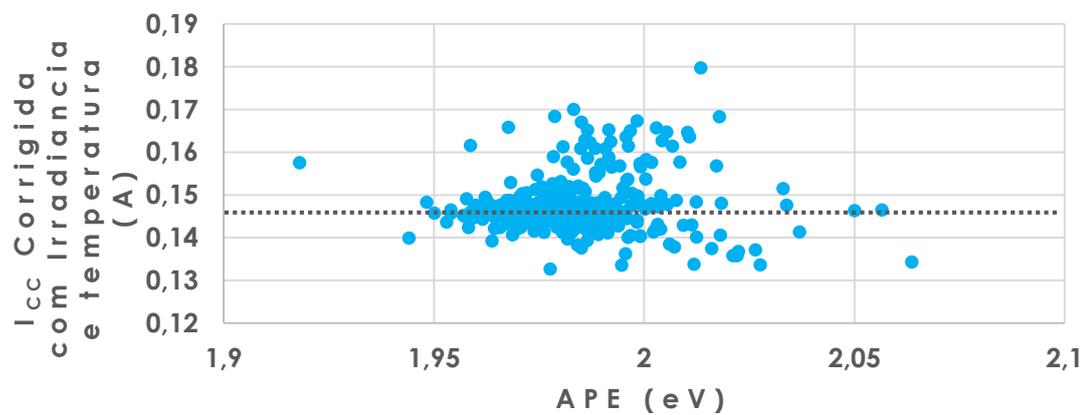
Fonte: Produção do Autor.

Figura C.11 – Variação da I_{CC} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1. A linha representa a I_{CC} no STC.



Fonte: Produção do Autor.

Figura C.12 – Variação da I_{CC} corrigido com a irradiância e temperatura para o STC com a Energia Média dos Fótons para o minimódulo de tripla junção 1. A linha representa a I_{CC} no STC.

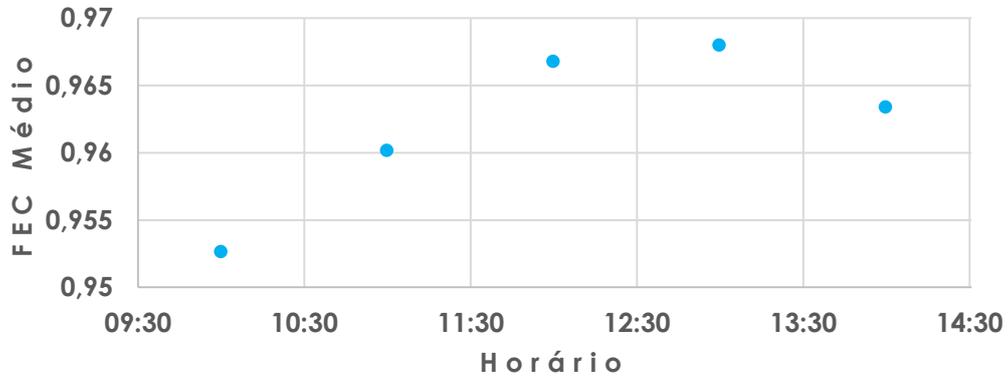


Fonte: Produção do Autor.

ANEXO D – VARIAÇÃO DO FEC COM O TEMPO

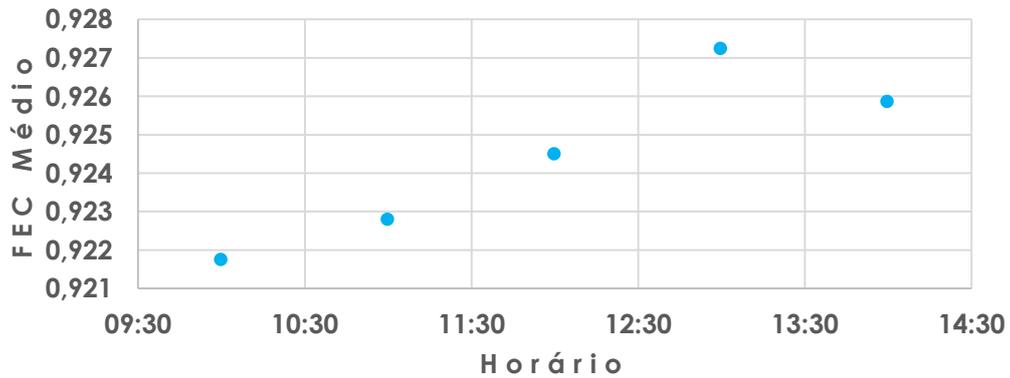
D.1 Gráficos da variação do FEC médio com os horários de medição

Figura D.1 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício amorfo.



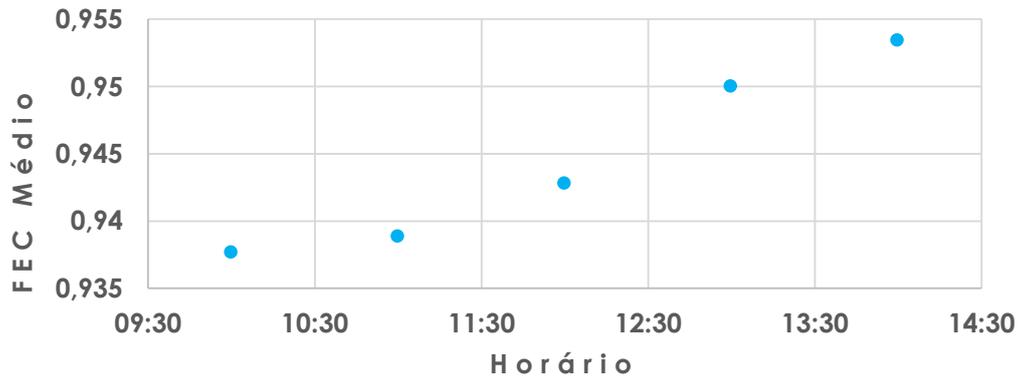
Fonte: Produção do Autor.

Figura D.2 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício micro cristalino.



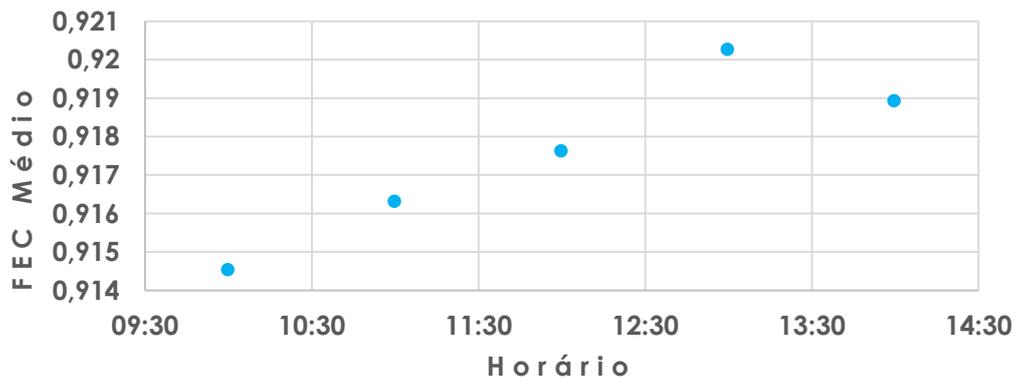
Fonte: Produção do Autor.

Figura D.3 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício poli cristalino.



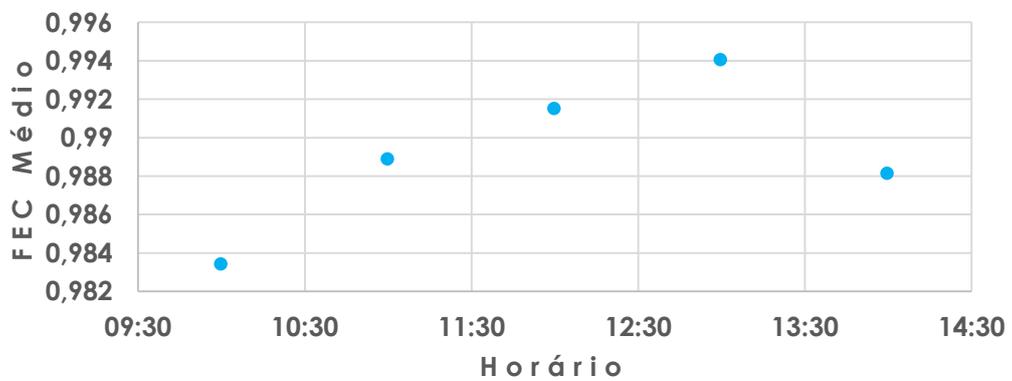
Fonte: Produção do Autor.

Figura D.4 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do módulo de Silício mono cristalino.



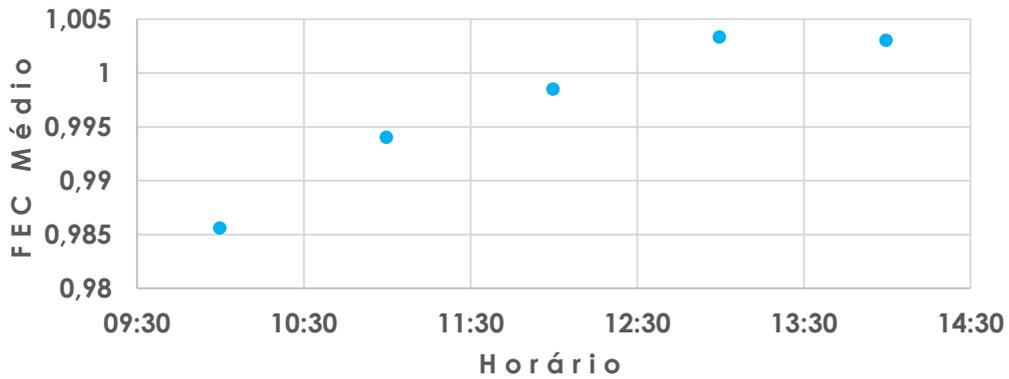
Fonte: Produção do Autor.

Figura D.5 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do minimódulo de Arseneto de Gálio 1.



Fonte: Produção do Autor.

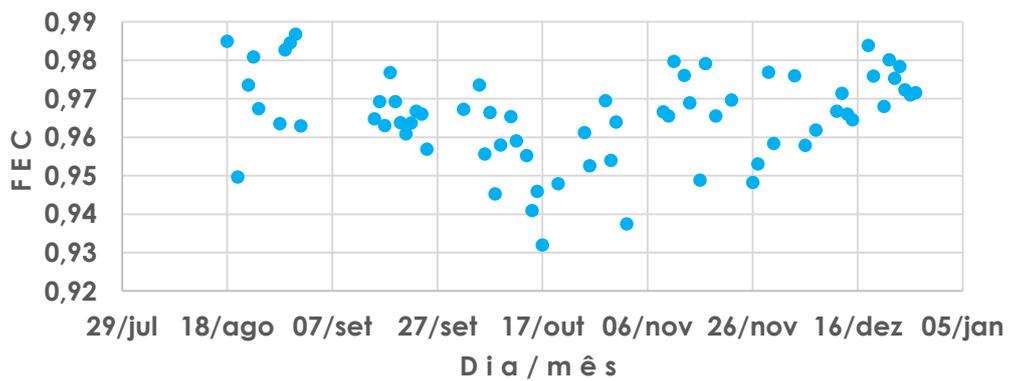
Figura D.6 – Fator Espectral Corrigido médio para os cinco horários de coleta de dados espectrais do minimódulo de tripla junção 1.



Fonte: Produção do Autor.

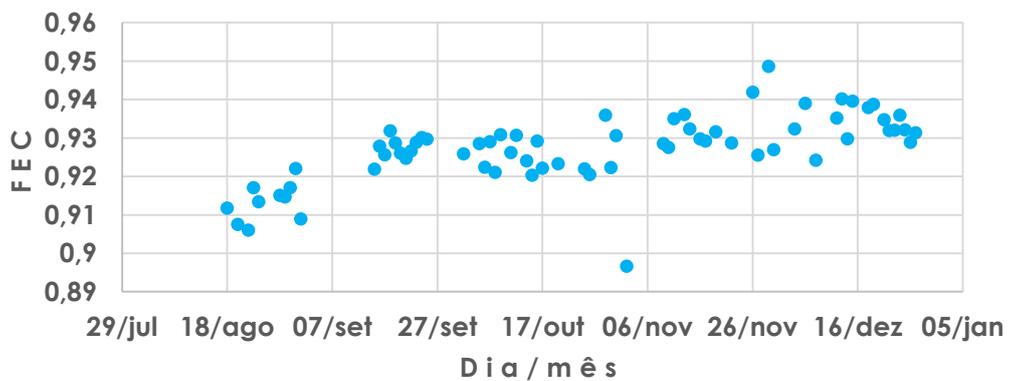
D.2 Gráficos da variação do FEC com os meses de medição

Figura D.7 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício amorfo.



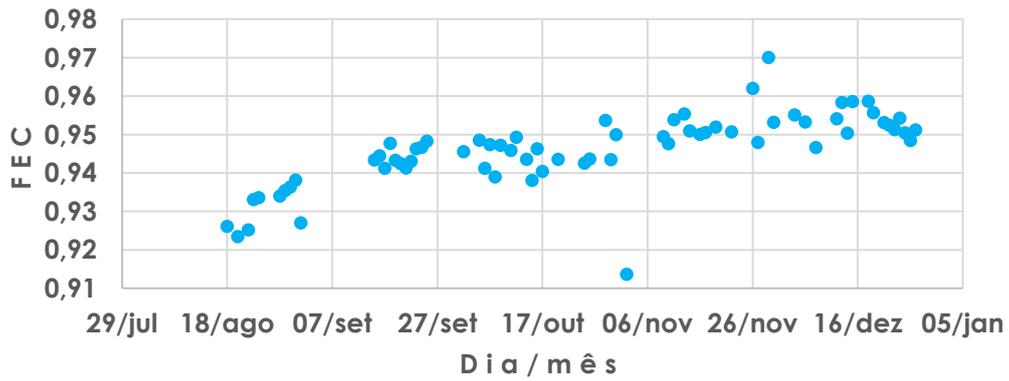
Fonte: Produção do Autor.

Figura D.8 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício micro cristalino.



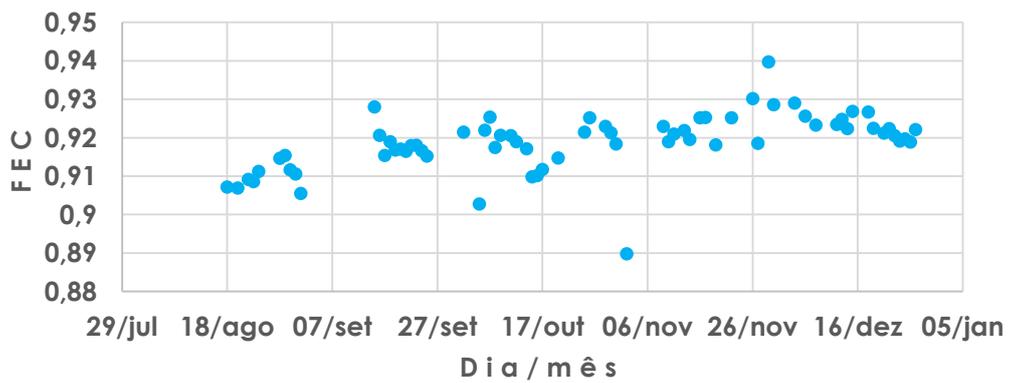
Fonte: Produção do Autor.

Figura D.9 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício poli cristalino.



Fonte: Produção do Autor.

Figura D.10 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o módulo de Silício mono cristalino.



Fonte: Produção do Autor.

Figura D.11 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1.

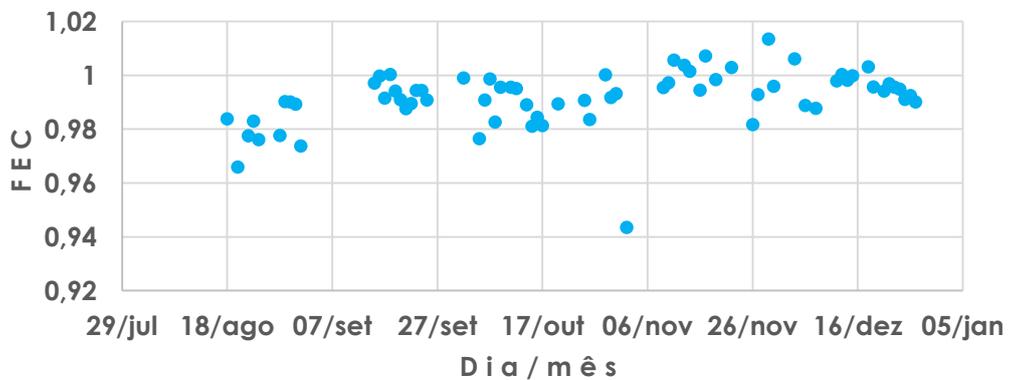
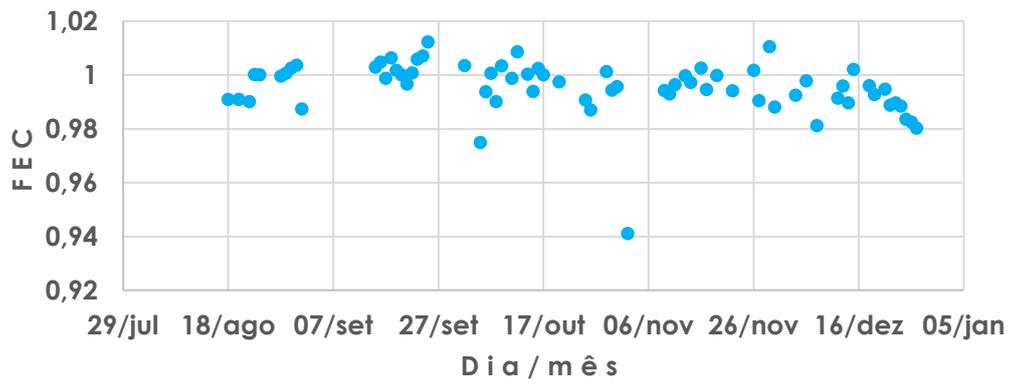
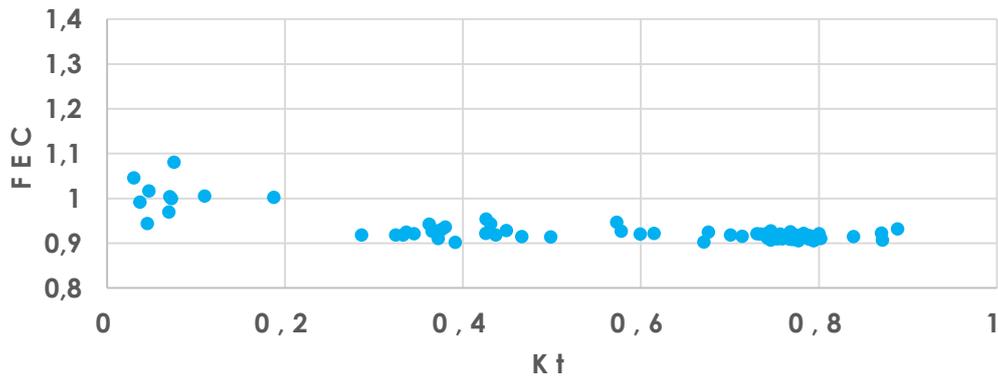


Figura D.12 – Fator Espectral Corrigido obtido às 12:00h de dias com céu limpo para o minimódulo de tripla junção 1.



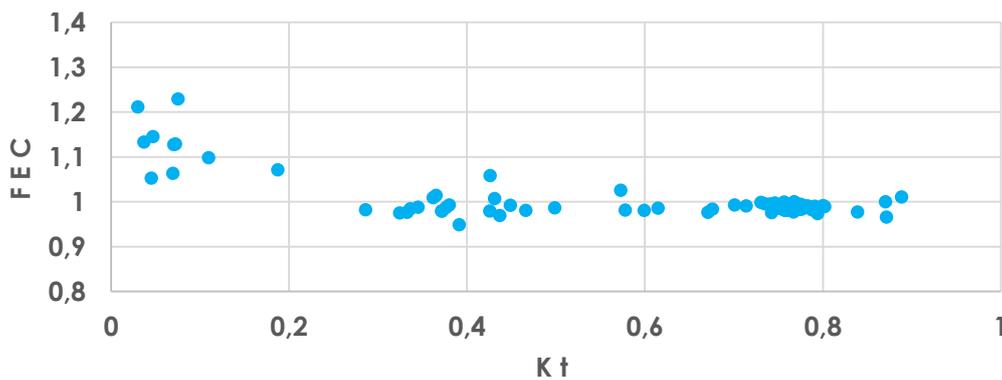
Fonte: Produção do Autor.

Figura E.4 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o módulo de Silício mono cristalino.



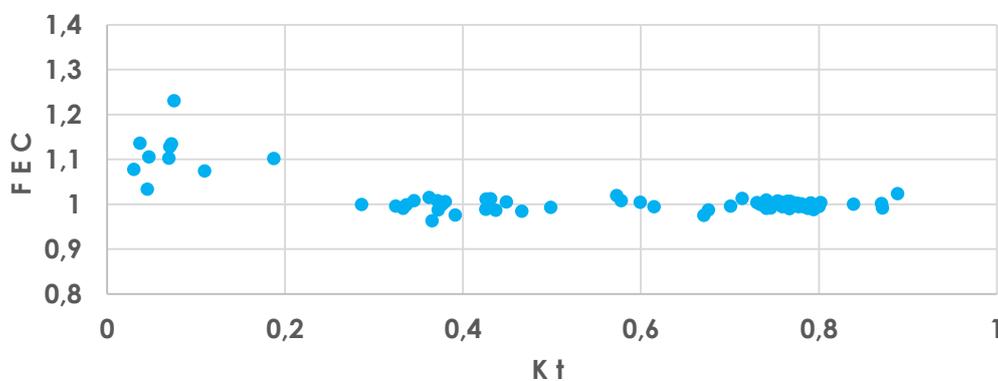
Fonte: Produção do Autor.

Figura E.5 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o minimódulo de Arseneto de Gálio 1.



Fonte: Produção do Autor.

Figura E.6 – Variação do Fator Espectral Corrigido com o Índice de Limpidez para o minimódulo de tripla junção 1.



Fonte: Produção do Autor.