

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL**

FERNANDO HOEFLING DOS SANTOS

**RENDIMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CONDIÇÕES
ESPECÍFICAS DO ESPECTRO SOLAR INCIDENTE NA SERRA GAÚCHA**

CAXIAS DO SUL - RS

2016

FERNANDO HOEFLING DOS SANTOS

**RENDIMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CONDIÇÕES
ESPECÍFICAS DO ESPECTRO SOLAR INCIDENTE NA SERRA GAÚCHA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Linha de pesquisa: Desempenho e controle de sistemas energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Diorge Alex Bão Zambra

CAXIAS DO SUL– RS

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

S237r Santos, Fernando Hoefling dos, 1977-
Rendimento de módulos fotovoltaicos sob condições específicas do
espectro solar incidente na Serra Gaúcha / Fernando Hoefling dos Santos.
– 2016.

124 f. : il. ; 30 cm

Apresenta bibliografia.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Diorge Alex Bão Zambra.

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia solar. 3. Energia elétrica.
4. Meteorologia – Farroupilha (RS). I. Título.

CDU 2. ed.: 620.92

Índice para o catálogo sistemático:

1. Energia – Fontes alternativas	620.92
2. Energia solar	551.521.37
3. Energia elétrica	537.214
4. Meteorologia – Farroupilha (RS)	551.5(816.5FARROUPILHA)

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Roberta da Silva Freitas – CRB 10/1730

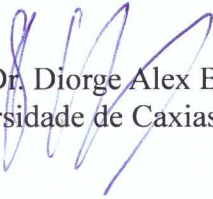
"Rendimento de Módulos Fotovoltaicos sob Condições Específicas do Espectro Solar Incidente na Serra Gaúcha"

Fernando Hoefling dos Santos

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 16 de maio de 2016.


Banca Examinadora:



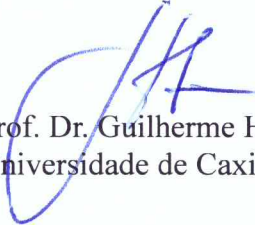
Prof. Dr. Diorge Alex Bão Zambra (orientador)
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Dario Eberhardt
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul



Prof. Dr. Alexandre Mesquita
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa
Universidade de Caxias do Sul

Dedico este trabalho a minha esposa Gisele Pertile e aos meus filhos João Pedro e João Antônio pelo apoio emocional e paciência demonstrada durante meu processo de formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por ser a base das minhas conquistas.

Aos meus pais Lúcia e João, por acreditarem nas minhas escolhas, apoiando-me e esforçando-se junto a mim, para que eu suprisse todas elas.

Ao Professor Diorge Zambra, pela dedicação em suas orientações prestadas na elaboração deste trabalho e pelo incentivo e colaboração no desenvolvimento das minhas ideias.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul que me acolheu junto ao grupo de servidores/docentes e me incentivou a realizar este mestrado profissional, e aos colegas docentes do IFRS Dr. Alexandre José Bühler e Dr. Nolvi Francisco Baggio Filho que, com as suas experiências na área de energia, auxiliaram-me no desenvolvido deste trabalho.

“O dia em que descobriremos exatamente o que é a eletricidade, isso irá marcar um evento provavelmente maior, mais importante que qualquer outro na História da Humanidade. Então, será apenas uma questão de tempo para que o Homem consiga ligar suas máquinas diretamente à própria natureza. Imagine o que está por vir...”

Nikola Tesla

RESUMO

O intuito desta dissertação é determinar qual o grau de influência que as condições meteorológicas e geográficas da cidade de Farroupilha apresentam sobre a capacidade de produção de energia fotovoltaica e também sobre o rendimento das três principais tecnologias (monojunção) de módulos para conversão fotovoltaica presentes no mercado mundial (silício monocristalino, silício policristalino e filme fino de silício amorfo) e, por conseguinte, no correto dimensionamento de sistemas de cogeração conectados à rede de distribuição de energia elétrica local. O comportamento das diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos será determinado através das respostas espectrais, obtidas através da digitalização de gráficos ensaiados por instituição internacionalmente reconhecida (Fraunhofer ISE CalLab PV Cells) e a geração dos espectros médios mensais da radiação solar será determinada através da inserção dos dados meteorológicos de quinze anos de medições fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia e ensaiados sobre o *software* SMARTS 2.9.2 (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*). Dessa forma, foi possível verificar um aumento médio anual de 2,04% na corrente de curto-circuito para o módulo de silício monocristalino, 2,14% para o módulo de silício policristalino e 8,2% para o módulo de filme fino de silício amorfo; seguida de uma variação média anual na eficiência de conversão desses módulos fotovoltaicos de -1,75%, -1,66% e +4,19% respectivamente. Através do dimensionamento com as condições de rendimento sob a influência do espectro padrão (G173) e sob a influência particular do espectro da região da serra gaúcha, foi determinado qual dessas tecnologias apresenta as melhores características e menor tempo de retorno do investimento para as condições climáticas e geográficas específicas da cidade de Farroupilha, RS.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Resposta espectral. Rendimento de sistemas FV.

ABSTRACT

The purpose of this work is to determine the degree of influence that the meteorological and geographical conditions of Farroupilha city feature on the photovoltaic energy production capacity and also on the efficiency of the three main modules technologies for photovoltaic conversion present in the world market and, therefore, in the correct sizing of cogeneration systems connected to the local power grid. The behavior of the different technologies of photovoltaic panels will be determined by the spectral responses obtained by scanning graphic tested by internationally recognized institution and the generation of monthly average spectra of solar radiation is determined by the insertion of meteorological data of fourteen years of measurements provided by National Institute of Meteorology and tested on the SMARTS software 2.9.2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine). Thus, we found an average annual increase of 2.04% in the short-circuit current to the monocrystalline silicon module, 2.14% for polycrystalline silicon module and 8.2% for thin film module amorphous silicon; followed by an average annual variation in the conversion efficiency of these photovoltaic modules -1.75%, -1.66% and + 4.19% consecutively. It will be executed sizing with performance conditions under the influence of the standard spectrum (G173-03) and under the particular influence of the spectrum of the Serra Gaúcha region, it was determined which of these technologies has the best features and lower return time of the investment to the specific climatic and geographic conditions of the city of Farroupilha, RS.

Keywords: Photovoltaic energy. Spectral response. Efficiency of PV systems.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 UM BREVE PANORAMA DA GERAÇÃO MUNDIAL DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	11
1.2 VARIABILIDADE NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA: PROBLEMA DE DISPONIBILIDADE DE ENERGIA OU ALTERAÇÃO NO RENDIMENTO?.....	16
1.3 OBJETIVOS	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	19
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	21
2.3 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS EMPREGADAS NA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS.....	24
2.3.1 Células de cristais de silício monocristalinos	25
2.3.2 Células de cristais de silício policristalinos	26
2.3.3 Filmes finos	27
2.3.3.1 Telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS).....	27
2.3.3.2 Silício amorfo (a-Si)	27
2.3.3.3 Silício microcristalino (μ c-Si)	28
2.3.4 Silício crescido em fitas (Si-fitas)	28
2.3.5 Células orgânicas e à base de corantes	29
2.4 ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR.....	29
2.5 PARÂMETROS QUE ALTERAM A DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL SOLAR.....	32
2.6 CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 CONDIÇÕES PARA CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS TERRESTRES	41
3.2 DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	44
3.3 OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS ESPECTRAIS DAS DIFERENTES TECNOLOGIAS UTILIZADAS NA DISSERTAÇÃO	47
3.4 GERAÇÃO DOS ESPECTROS SOLARES MÉDIOS MENSAIS	51
3.5 OBTENÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	53

4. RESULTADOS	67
5. APLICAÇÕES DOS RESULTADOS EM UM DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDÊNCIAL	71
5.1 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ENERGIA A SER GERADA.....	71
5.2 DIMENSIONAMENTO DO NÚMERO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	72
5.3 DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR	77
5.4 DEMAIS COMPONENTES DO CIRCUITO	80
5.5 ESTUDO DO RETORNO DO INVESTIMENTO.....	83
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE A – EXEMPLO DE TABELA DE OBTENÇÃO DA I_{CC}.	96
ANEXO A – CONSTANTES DAS EQUAÇÕES DE GERAÇÃO DAS RESPOSTAS ESPECTRAIS (1.14 a 1.27)	119
ANEXO B – RELATÓRIO DOS DADOS DE ENTRADA NO <i>SOFTWARE SMARTS</i> (ESPECTRO PADRÃO).....	121
ANEXO C – RELATÓRIO DOS DADOS DE ENTRADA NO <i>SOFTWARE SMARTS</i> (ESPECTRO DE FARROUPILHA - DEZEMBRO).....	122
ANEXO D – EXEMPLOS DE DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CAXIAS DO SUL.	123
ANEXO F – EXEMPLOS DE DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BENTO GONÇALVES.....	124

1. INTRODUÇÃO

A geração de eletricidade proveniente de fontes alternativas e limpas de energia representa uma parcela muito pequena da produção da energia elétrica do Brasil. Quando comparamos apenas a geração fotovoltaica em nosso país (19,2 MWp registrado junto a ANEEL até 11/2015) com a capacidade instalada nos países que apresentam uma maior contribuição proveniente de instalações fotovoltaicas (38,24 GWp instalado na Alemanha até 2014), verifica-se um contrassenso ao comparar os dados de insolação contidos em mapas solarimétricos, pois a pior localização de insolação no território brasileiro possui uma média de insolação de aproximadamente 4.200 Wh/m².dia, litoral de Santa Catarina e Paraná, superior à melhor localização da Alemanha, com média de insolação próxima do valor de 3.500 Wh/m².dia. Parte dessa falta de interesse pelos brasileiros advém da falta de informações sobre o sistema de geração de eletricidade pelo efeito fotovoltaico que, quando implementado em localizações geográficas diferentes, apresenta variações na energia gerada, descredibilizando a homogeneidade da qualidade dos componentes de um sistema que ainda possui um alto custo inicial, mas uma desconhecida e boa relação custo benefício. Ao longo deste primeiro capítulo, será apresentado um resumo do cenário mundial e nacional da utilização de sistemas fotovoltaicos e do impacto oferecido ao sistema de transmissão e distribuição do estado do Rio Grande do Sul, caso uma pequena parcela dos consumidores residenciais adotasse a fonte fotovoltaica como complementação do consumo energético, assim como a busca de hipóteses para o comportamento variável de sistemas idênticos, implementados em diferentes regiões.

1.1 UM BREVE PANORAMA DA GERAÇÃO MUNDIAL DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

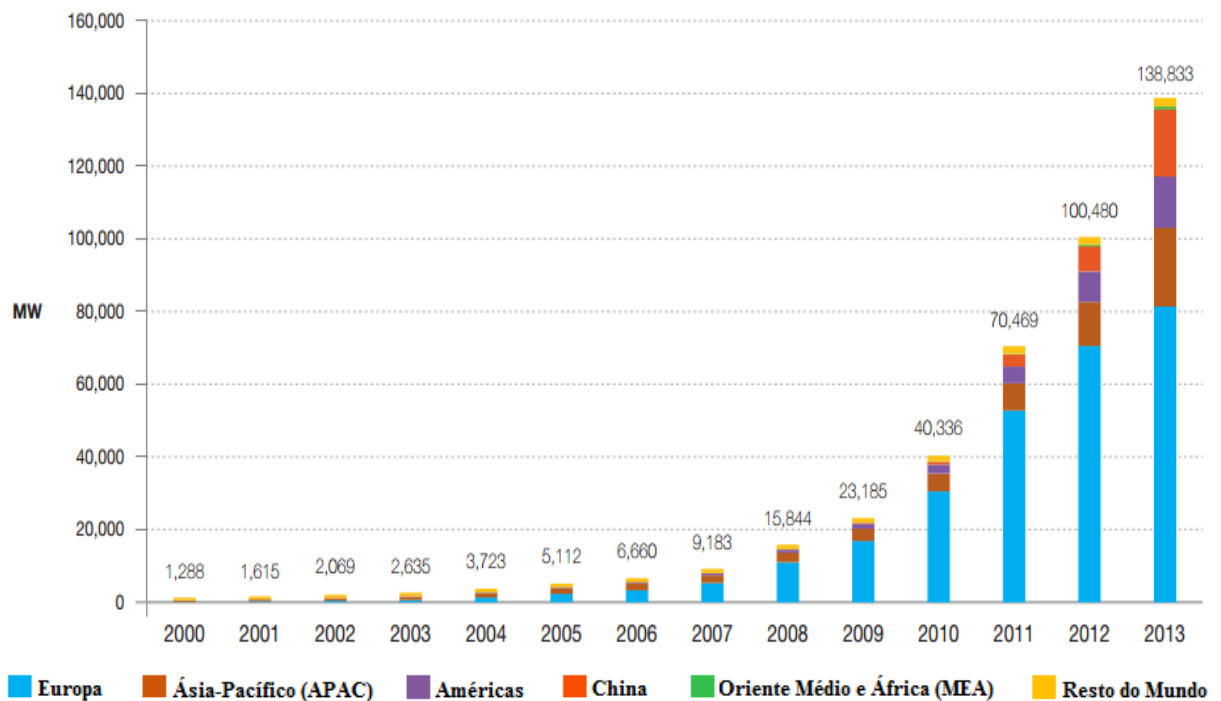
Tendo em vista os grandes desafios e perspectivas de mudança que são esperados nas próximas décadas ao plano energético-ambiental, juntam-se questões importantes de competitividade econômica e de segurança no abastecimento de energia elétrica. Deste modo, existe a necessidade de antecipar-se qual será a capacidade de geração de energia e como será feita a proteção do sistema de transmissão/distribuição de energia elétrica. Uma das soluções passa pela possibilidade de qualquer indivíduo vir a ser um pequeno produtor de eletricidade. Para isso, é necessário recorrer às miniturbinas eólicas ou módulos solares fotovoltaicas, visto que essas são as tecnologias de mais fácil aplicabilidade para serem instaladas em zonas urbanas, apresentando um pequeno impacto ambiental. Assim, qualquer pessoa pode tornar-se um produtor de energia, fornecendo-a para todos os tipos de consumidores (restaurantes,

hotéis, empresas ou residências). Essa solução traz, em sua concepção, inúmeras vantagens em relação às soluções tradicionais de geração centralizada de energia elétrica, sendo um diferencial importante para a independência energética dos consumidores.

A geração mundial de energia elétrica proveniente de fonte solar tem apresentado um crescimento significativo durante a última década, sendo que o crescimento mais significativo ocorreu no período de 2010 a 2013 (European Photovoltaic Industry Association, 2014).

A figura 1 mostra a evolução mundial da geração elétrica através do efeito fotovoltaico de 2000 a 2013.

Figura 1: Gráfico da evolução mundial da geração fotovoltaica de 2000 a 2013.



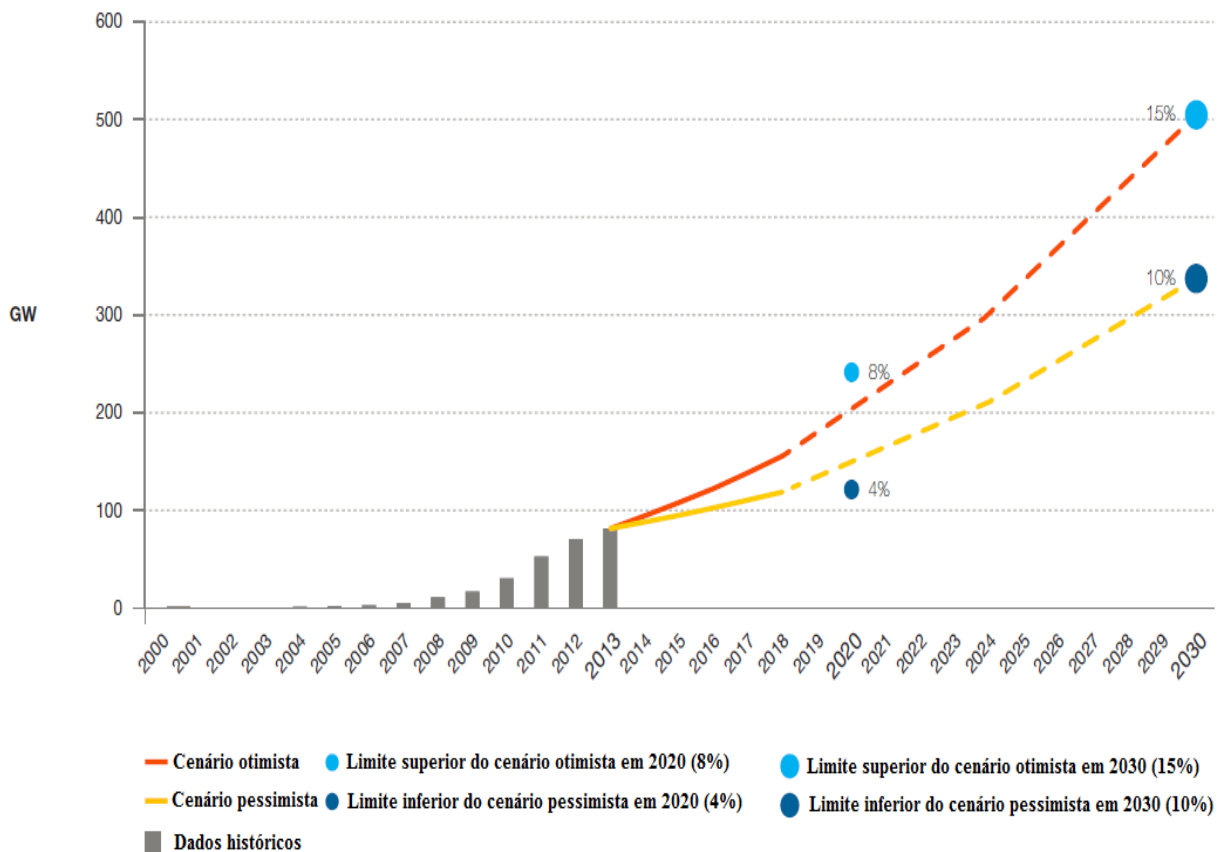
Fonte: EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*)

Ao longo da última década, a energia solar fotovoltaica apresentou um crescimento exponencial, tendo atingido a marca de aproximadamente 140 GW instalados no mundo ao final de 2013 (*European Photovoltaic Industry Association*, 2014), o equivalente à energia necessária para alimentar 45 milhões de lares.

A Europa apresenta uma parcela de aproximadamente 59% de toda essa energia solar convertida em eletricidade, o que representa 81,464 GW gerados. Os países asiáticos contribuem com 40,592 GW, os Estados Unidos com 13,727 GW e o restante distribuído entre várias nações.

As perspectivas de crescimento na geração de energia solar para o mercado mundial até 2030 são apresentadas na figura 2, onde é possível verificar duas curvas. A vermelha representando um crescimento com uma perspectiva otimista e a curva amarela representando uma perspectiva pessimista.

Figura 2: Gráfico da previsão da capacidade cumulativa de geração fotovoltaica até 2030.

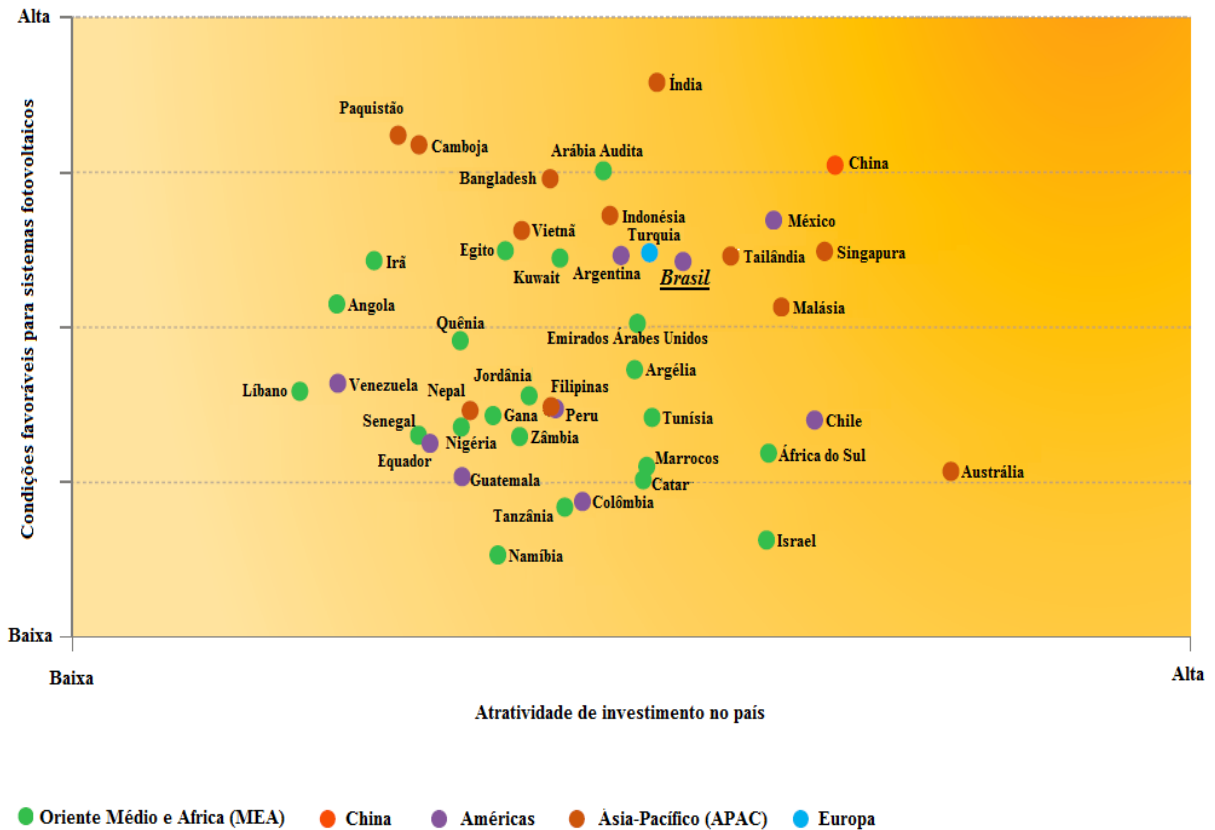


Fonte: EPIA (adaptado pelo autor).

De acordo com a figura 3, o Brasil apresenta um enorme potencial de geração de energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico. Contudo, o país passou a ter regulamentação para o acesso à mini e à microgeração, apenas em 2012 com a Resolução Normativa ANEEL N°482. A pesquisa na área fotovoltaica tem sido incentivada através de chamadas públicas para fomento desta área, como por exemplo, a chamada N° 13/2011 da ANEEL, na qual foram aprovados diversos projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação de centrais fotovoltaicas entre 0,5 MW e 3 MW a serem concluídos nos próximos 2 anos, totalizando 24,4 MW. Atualmente, a potência instalada, registrada junto à ANEEL, é de somente 19,2 MW (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015). Situação que coloca o Brasil em uma posição de marginalidade na área de geração de energia fotovoltaica, desvalorizando a imagem do país no que se refere à geração de energias renováveis a partir de fontes limpas, e

desvalorizando a imagem do bloco econômico BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China), à qual pertence.

Figura 3: Gráfico do mapeamento das oportunidades de geração fotovoltaica dos países localizados no chamado “cinturão solar”.



Fonte: EPIA (adaptado pelo autor).

A partir da publicação da resolução 482 de 17 de Abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012), ficaram estabelecidas as condições gerais para o acesso de sistemas de microgeração e minigeração conectados à rede de distribuição de energia elétrica. Esta resolução estipulou 240 dias para as concessionárias estabelecerem as suas regras específicas de acesso, permitindo aos consumidores atuarem como geradores distribuídos, injetando energia na rede elétrica, e utilizando esta energia como compensação do seu consumo.

Esta resolução gera uma grande expectativa para a utilização de geração distribuída a partir de fontes alternativas, como solar, visto que este sistema possui uma imprevisibilidade de geração devido à intempéries.

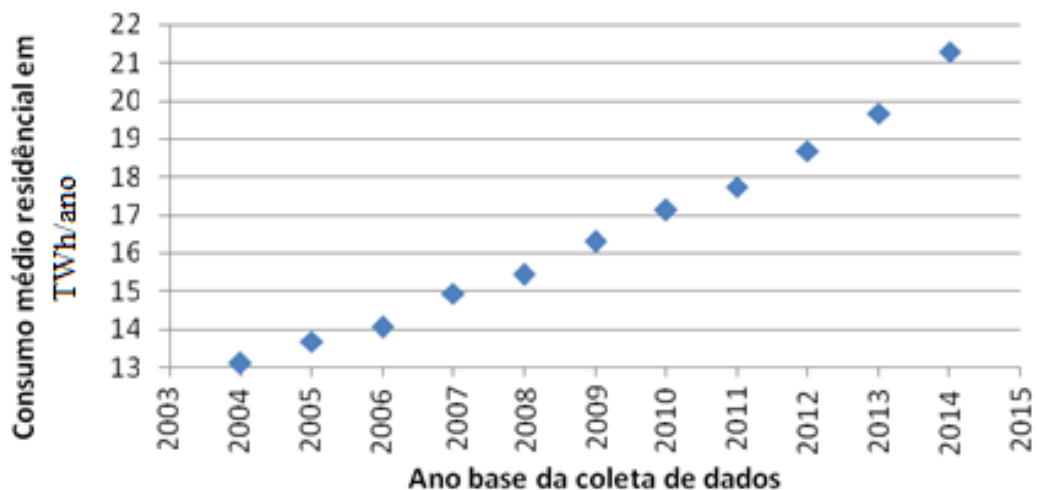
Na região da serra gaúcha, localidade para a qual este trabalho será desenvolvido, há pouco mais de cinco empreendimentos de geração fotovoltaica de micro e minigeração de

energia, registrados junto a ANEEL até a data de 27/11/2015, sendo que a geração de energia fotovoltaica no estado do Rio Grande do Sul totaliza pouco mais de 369,53 kWp de módulos fotovoltaicos instalados. Dados obtidos do Banco de Informações de Geração (BIG) – ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015).

As condições de mercado se mostram mais favoráveis para a implementação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, uma vez que os preços dos componentes fotovoltaicos sofreram uma grande redução nos últimos anos, por um aumento no custo da energia no Brasil e a implementação de Resolução Normativa para acesso à mini e à microgeração (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012). A região da Serra Gaúcha em relação ao estado do Rio Grande do Sul (RS), o RS em relação ao Brasil e o país em relação ao cenário mundial, apresentam consecutivamente uma parcela insignificante de participação na utilização da tecnologia fotovoltaica.

Segundo o relatório de consumo mensal de energia elétrica por região, 2004-2015 fornecido pelo EPE (Empresa de Pesquisas Energética, 2015), observa-se que o consumo residencial da região sul do Brasil corresponde em média a 1.773.589,25 MWh/mês, o que equivale a um consumo médio de 21.283.071 MWh/ano para 2014, conforme figura 4.

Figura 4: Curva de crescimento do consumo médio anual para consumidores residenciais da região sul.



Fonte: EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

Só no Rio Grande do Sul, o consumo mensal representa, em média, aproximadamente 586,88 GWh, o que reporta a uma média de consumo per capto de 176,2 kWh/mês, entre os anos de 2009 e 2013. Analisando os dados fornecidos pela EPE, pode-se verificar que a utilização da energia renovável e limpa, proveniente da fonte solar, por apenas dez por cento da população do Rio Grande do Sul, reduziria o “transito” de aproximadamente

58,69 GWh/mês ou 704,26 GWh/ano (Empresa de Pesquisa Energética, 2014). Fato que reduziria significativamente a sobrecarga no sistema elétrico nacional e poria o estado do Rio Grande do sul em uma posição de destaque no que se refere à utilização de energia de fonte renovável e limpa perante o restante do país, caminhando para a autossuficiência energética proveniente de fontes limpas.

1.2 VARIABILIDADE NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA: PROBLEMA DE DISPONIBILIDADE DE ENERGIA OU ALTERAÇÃO NO RENDIMENTO?

Durante as últimas duas décadas, tem-se publicado diversos trabalhos científicos a respeito de sistemas autônomos e isolados de geração fotovoltaica, apresentando suas principais características, vantagens e desvantagens e desenvolvimentos de novas topologias de sistemas e ou circuitos eletrônicos para conversão da energia fotovoltaica gerada através dos painéis. Contudo, as condições climáticas e geográficas regionais influenciam no espectro da radiação solar, modificando significativamente a capacidade de conversão dos painéis solares (IEC 60904-3, 2008).

A evolução da tecnologia dos materiais (referente ao silício) e a determinação de qual topologia de circuitos conversores apresenta os melhores resultados são temas de estudos exaustivos, de acordo com o número de publicações de artigos. Porém, sistemas com características construtivas idênticas, implementados em diferentes regiões do Brasil podem apresentar respostas distintas. Isso se deve ao fato de cada região apresentar condições que afetam diretamente o espectro da radiação solar gerando estas possíveis discrepâncias de resultados.

O propósito deste trabalho é a verificação do grau de influência das condições ambientais da serra gaúcha na alteração do espectro da radiação solar e qual o impacto para as principais tecnologias de conversão de energia fotovoltaica empregadas em módulos comerciais.

Atualmente, estão difundidas no mercado mundial diferentes tecnologias para a conversão da radiação solar em energia elétrica, cada qual com suas particularidades construtivas, eficiência de conversão e resultados divergentes para as mais diversas condições ambientais.

As tecnologias mais comumente utilizadas na fabricação de células para módulos fotovoltaicos são as de silício monocristalino (c-Si), silício policristalino (mc-Si), filmes finos de silício amorfo (a-Si), filmes finos de silício microcristalino (μ c-Si), filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), filmes finos de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS), células híbridas e uma

nova tecnologia promissora chamada de células de material orgânico, cujos módulos são conhecidos por “Painéis Fotovoltaicos Orgânicos” (OPVs).

Cada uma destas tecnologias apresenta sua curva característica de produção de energia, onde é levada em consideração a temperatura do painel e a irradiância global recebida pelo mesmo. Porém, a resposta em frequência do espectro da radiação solar não apresenta a relevância necessária no processo de caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos, que é realizado por laboratórios dedicados e autorizados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) tais como o LABSOL – Laboratório de Energia Solar (UFRGS) e o LESF – Laboratório de Etiquetagem de Sistemas Fotovoltaicos (USP).

Sabe-se que as condições climáticas e geográficas, tais como poluição do ar, dias nublados, partículas de água em suspensão, hora do dia, da localização do sistema e a espessura da camada de ar alteram significativamente a radiação solar incidente na crosta terrestre.

De acordo com Gasparin, Bühler e Krenzinger (2012), ocorre uma mudança na distribuição espectral ao longo do dia, o que ocasiona uma mudança da corrente de curto-circuito (I_{sc}) gerada pelo módulo fotovoltaico, já que este apresenta uma determinada curva de resposta espectral associada à tecnologia utilizada em sua fabricação. Assim, fica evidente que uma análise das condições locais associada com a curva de resposta em frequência dos módulos fotovoltaicos pode vir a determinar qual a tecnologia de conversão é mais adequada para uma condição regional específica, no caso, as condições da cidade de Farroupilha/RS.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Determinar qual das três principais tecnologia de produção de painel fotovoltaico monojunção (módulos de silício monocristalinos, módulos de silício policristalinos e módulos de filme fino de silício amorfo) possui uma maior eficiência média anual na conversão de energia, sob as condições regionais específicas do espectro solar da serra gaúcha.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar equações para a curva de resposta ao espectro solar das três principais tecnologias que se encontram disponíveis no mercado, sendo elas, de silício mono e policristalino e as de filmes finos de silício amorfo;

- Determinar a variação do espectro da radiação solar ao longo de um ano, gerando uma curva média mensal para a região da serra gaúcha, mais precisamente da cidade de Farroupilha;
- Obter as respostas dos diferentes sistemas instalados sob as condições específicas do espectro solar incidente em Farroupilha;
- Determinar o retorno do investimento da implementação destas tecnologias, de acordo com as regras para acesso à mini e microgeração estabelecidas pela resolução 482 da ANEEL e regulamentação específica da concessionária local para a compensação de energia para uma residência cujos dados de consumo médio anual serão obtidos sobre o estudo das contas de energia da mesma.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados os principais acontecimentos históricos que repercutiram na evolução das células fotovoltaicas até o presente momento, explicando o princípio de funcionamento da conversão fotovoltaica, destacando as principais tecnologias de fabricação para células monojunção utilizadas no mercado mundial e a forma padronizada para realização da caracterização desses. Será exposta, ainda, a distribuição em frequência do espectro solar e os principais fatores geográficos e meteorológicos que alteram essa distribuição.

2.1 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820 – 1891) que desenvolveu o primeiro dispositivo fotovoltaico ao submergir dois eletrodos de prata ou platina em uma solução ácida, observando que quando expostos à radiação solar apresentavam uma diferença de potencial em seus terminais (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPEL - CRESESB, 2014). Em 1873, Willoughby Smith verificou o mesmo efeito em um sólido de selênio e três anos mais tarde, em 1876, William Grylls Adams e Richard Evans Day descobriram que, ao iluminar uma junção entre um filme de selênio depositado em um substrato de ferro e com um segundo filme de ouro, poderiam criar o efeito fotovoltaico. Porém, esse efeito produziu novas dúvidas a respeito da natureza do fóton, pois até este momento o mesmo era tratado como matéria (Isaac Newton, 1666), mas em 1801 o físico britânico Thomas Young descobriu que o fóton apresentava propriedades de onda eletromagnéticas, pois sofria difração e interferência.

A explicação do fenômeno fotovoltaico só foi possível com o advento da teoria das bandas e a física dos semicondutores através das teorias da mecânica quântica apresentada por Albert Einstein em 1905, baseado nos estudos sobre a radiação do corpo negro apresentado por Max Karl Ernst Ludwig Planck, em 1900. De acordo com BÜHLER, 2011, para explicar o efeito fotoelétrico, efeito diferente do fotovoltaico, Einstein retomou e comprovou a ideia que Newton defendera há séculos, de que o fóton possuía uma natureza corpuscular. A partir deste momento, a teoria da dualidade de propriedade do fóton (onda e partícula) foi aceita pela sociedade científica.

Em março de 1950, Calvin Fuller e Gerald Pearson, químicos do *Bell Laboratories* (Bell Labs) desenvolveram um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, controlando assim, as características do mesmo. Processo esse denominado de “dopagem”, a primeira célula fotovoltaica foi apresentada à sociedade científica em 25 de

abril de 1954 na reunião anual da *National Academy of Sciences* em Washington, com característica elétrica surpreendente para a época, apresentando 6% de rendimento e uma potência de $2,5 \text{ mW/cm}^2$, tendo os resultados sido publicados no *Journal of Applied Physics* (CHAPIN, FULLER, & PEARSON, 1954).

A “corrida espacial” e o mercado de telecomunicações impulsionaram e incentivaram pesquisas para a evolução das células fotovoltaicas. Contudo, só em 1973, com a crise na indústria petrolífera é que surgiu um súbito interesse por essa tecnologia, surgindo nesse período, vários programas de investimento com a finalidade de reduzir custos e aumentar o rendimento dessas células.

Nesta ocasião, Dick Swanson, da *New South Wales University*, na Austrália, apresentou uma célula solar de cristal de silício monocristalino que apresentava 25% de rendimento através do auxílio de um concentrador da radiação solar.

A maturidade da energia fotovoltaica advém das décadas de oitenta e noventa, motivada principalmente pela consciência das alterações climáticas e ambientais relacionadas à queima de combustíveis fósseis, a *Conference on the Changing Atmosphere* (1988) em Toronto – Canadá, *IPCC's First Assessment Report* (1990) em Sundsvall – Suécia, a Convenção-Quatro das Nações Unidas (UNFCCC) na ECO-92 no Rio de Janeiro – Brasil, são os principais eventos mundiais que culminaram com o tratado internacional conhecido como Protocolo de Quioto, o qual preconiza o compromisso dos países participantes em reduzir a emissão dos gases que geram o efeito estufa.

Israel foi o primeiro país a estabelecer uma política pública de energia solar (1980), seguida pela lei das tarifas garantidas na Alemanha (1991), revisada em 2000 quando passou a ser conhecida por Lei das Fontes Renováveis de Energia (EEG – *Erneuerbare Energien Gesetz*).

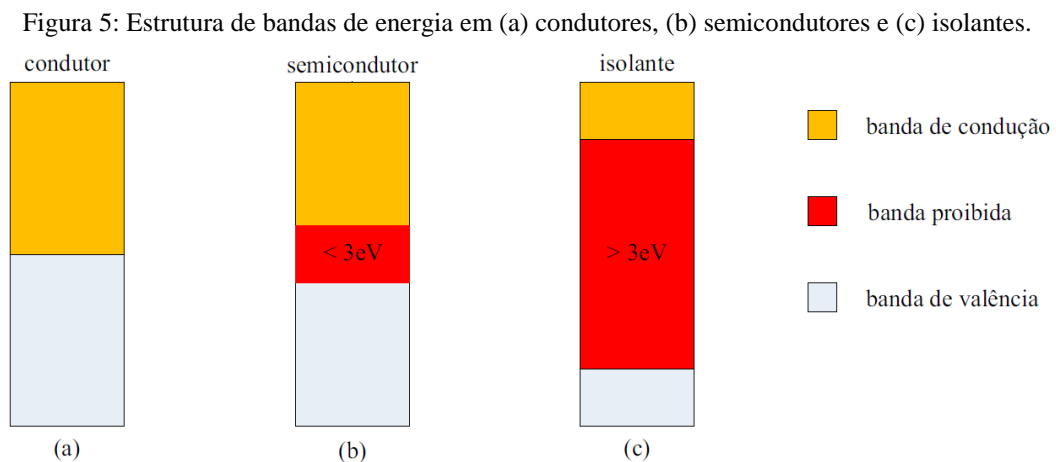
A tecnologia fotovoltaica está em constante desenvolvimento, sendo que, em 1998, Martin A. Green atingiu o rendimento de 24,7% com uma célula de silício monocristalino, sem a lente concentradora (SCHULTZ, GLUNZ, & WILEKE, 2004), e no ano de 2003, o grupo do *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems* anunciou um rendimento superior a 20% para células em silício policristalino (KING & al., 2003).

Células solares com configurações mais complexas chamadas de células em cascata ou multicamadas, que consistem na sobreposição de várias células semicondutoras, cada qual otimizada para um dado comprimento de onda do espectro da radiação solar, permitem atingir rendimentos de conversão superiores.

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que ocorre quando a radiação eletromagnética do Sol incide sobre um composto de materiais semicondutores com propriedades específicas (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Por definição, semicondutores são materiais que possuem sua banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução com ausência de elétrons sob temperatura de zero absoluto (0 K). Os semicondutores são materiais que não podem ser classificados como condutores nem como isolantes, pois necessitam de uma energia inferior a 3 eV (elétron-volt) para transportar um elétron da banda de valência para a banda de condução (energia de *gap*) e pela sua propriedade de condutividade que não está simplesmente relacionada ao “pulo” de elétrons para a camada de condução, mas também por apresentarem lacunas (vagas que foram criadas pela ausência de um elétron) que apresentam uma contribuição tão grande que as mesmas são tratadas como partículas com cargas positivas (CEPEL – CRESESB – 2014) conforme figura 5.



Fonte: CEPEL – CRESESB (2014)

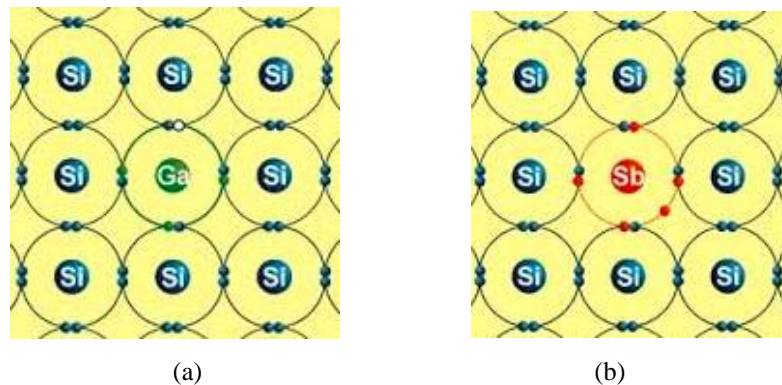
Vários elementos como o carbono (C), o silício (Si), o germânio (Ge), o arsênio (As), o fósforo (P), o selênio (Se) e o telúrio (Te) apresentam essas características. Além de compostos binários, tais como arsenieto de gálio (GaAs) e nitreto de gálio (GaN), compostos ternários e quartenários como InGaAsP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

Os semicondutores utilizados nos dispositivos de conversão fotovoltaica são capazes de absorver a energia da radiação solar e transferir parte desta energia para seus elétrons produzindo, assim, pares de portadores que são separados em cargas negativas e positivas devido ao campo elétrico existente na junção criada voluntariamente no semicondutor. Isso só

é possível graças ao processo físico conhecido como dopagem de semicondutores que consiste na introdução de impurezas químicas em um elemento semiconductor puro (difusibilidade).

Exemplificando o processo de dopagem da figura 6, um átomo de silício caracteriza-se por possuir quatro elétrons em sua camada de valência que formam ligações covalentes com os átomos vizinhos, resultando em oito elétrons compartilhados por cada átomo. Introduzindo-se nessa estrutura um átomo de gálio (Ga) que é trivalente, faltará um elétron para completar as ligações com os átomos de silício, provocando-se o aparecimento de lacunas o que caracteriza um semiconductor do tipo P. Adicionando-se o antimônio (Sb), elemento pentavalente, nesta situação, sobra um elétron das ligações entre o átomo de antimônio e os átomos de silício, provocando-se o aparecimento de elétrons livres que é característica de semicondutores do tipo N.

Figura 6: Formação dos (a) semicondutores do tipo P e (b) semicondutores do tipo N.

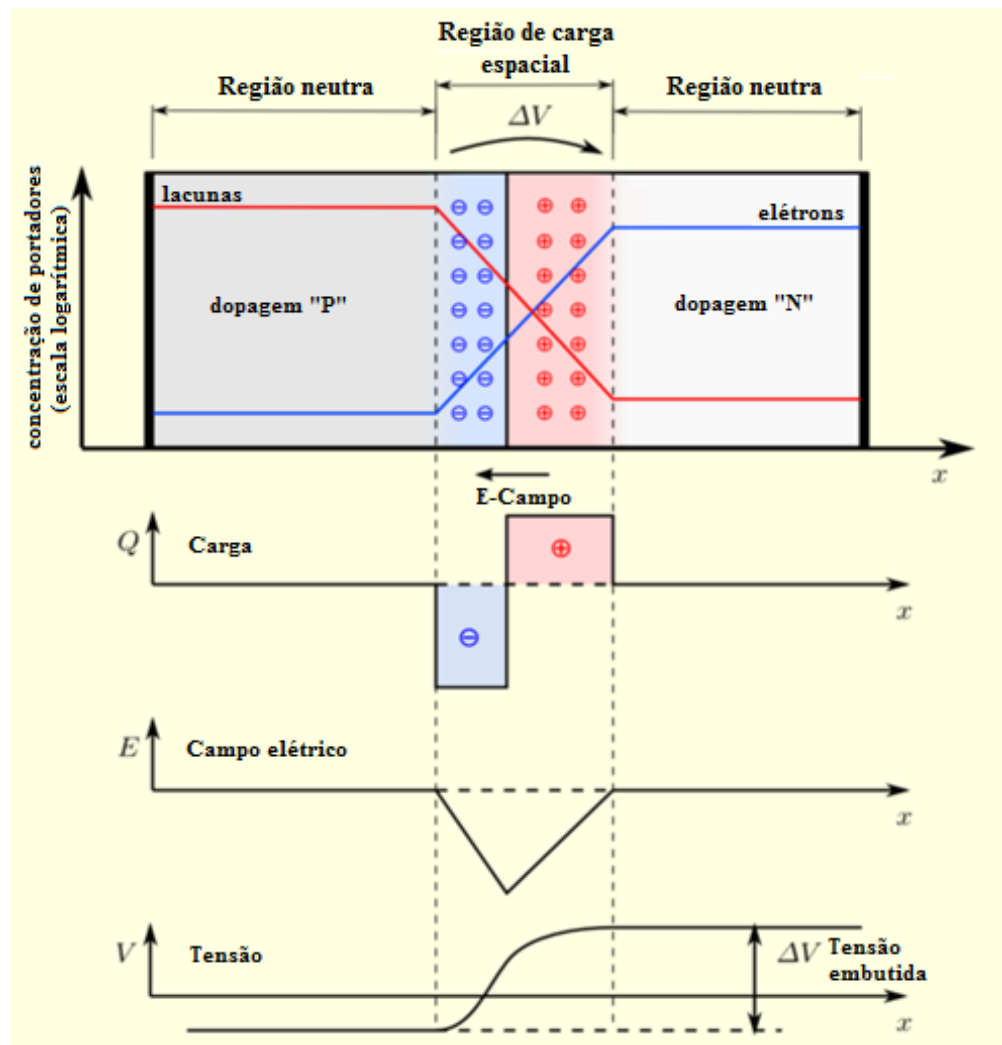


Fonte:(Así Funciona, 2012).

Uma célula fotovoltaica é composta basicamente pela junção de um material semiconductor do tipo P e um semiconductor do tipo N, podendo apresentar múltiplas junções e, por conseguinte, várias camadas.

O semiconductor do tipo N fica com uma alta concentração de elétrons que tendem a migrar para a região do tipo P do semiconductor que apresenta alta concentração de lacunas. Quando um elétron passa para a região do semiconductor do tipo P, deixa para trás um íon positivo doador no lado N. Quando uma lacuna migra para a região N, deixa no semiconductor tipo P um íon negativo aceitador. A figura 7 retrata uma junção PN em equilíbrio térmico. Segundo a Lei de Gauss, dessa difusão de elétrons e lacunas na região de transição entre as camadas, resulta um campo elétrico que se opõe à difusão original de cargas, conhecida como região de depleção.

Figura 7: Junção PN em equilíbrio térmico sem tensão aplicada. Abaixo, gráficos da densidade de carga (Q), campo elétrico (E) e variação de tensão (V).



Fonte: (Deutsche National Bibliothek)

A célula fotovoltaica geralmente é construída de forma que a camada do tipo N esteja localizada na parte superior desta célula, devido ao fato de que os fótons necessitam penetrar nesta camada para transferir energia suficiente, possibilitando aos elétrons “vencer” a barreira de potencial (região de depleção) e movimentar-se para a camada P.

Se os fótons da radiação solar fornecer energia maior que a energia de gap ($E_f > E_g$), elétrons da banda de valência libertar-se-ão das ligações químicas que o mantêm nessa posição, ocorre então a fotogeração de pares elétrons-lacunas que uma vez na região de carga espacial, estes serão separados pelo campo elétrico gerando um desequilíbrio ao acelerar os elétrons em direção ao lado “N” da junção e as lacunas para o lado “P”, gerando uma corrente elétrica através da junção no sentido da região “N” para a região “P”. Se esses elétrons forem

coletados por terminais metálicos posicionados um em cada lado dessa junção e havendo um circuito elétrico fechado ligado a esses terminais, esses elétrons circularão com a tendência de retornar para o terminal da camada N, gerando assim uma corrente elétrica. Caso não haja um circuito elétrico conectado aos terminais destas duas camadas, a corrente elétrica será nula. Porém, nessa situação, estará presente somente a diferença de potencial do campo elétrico formado na região de depleção (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPEL - CRESESB, 2014).

Visto que a tensão e a corrente geradas por uma única célula não possuem valores significativos para que essa energia seja utilizada na prática são conectadas várias células formando um circuito misto. Parte em série com o intuito de aumentar a tensão de saída e parte em paralelo para produzir uma corrente elétrica mais elevada. Esse circuito misto de células é encapsulado em um equipamento conhecido como módulo fotovoltaico que prove, ainda, a resistência mecânica para as células (HECKTHEUER, 2001). Com o desenvolvimento das tecnologias de fabricação de células, devido a evolução no rendimento e no tamanho das células, dificilmente encontra-se módulos fotovoltaicos com agrupamento em série.

Deve-se prestar atenção nas características elétricas das células que serão agrupadas em série, pois uma célula com menor capacidade de geração de corrente limitará o desempenho de todo o conjunto, efeito de *mismatch* (descasamento). O mesmo cuidado deve ser tomado ao que se refere ao agrupamento de módulos em série. Se forem associados módulos fotovoltaicos de tecnologias diferentes, a corrente do circuito ficará limitada pelas características elétricas do módulo que fornecer a menor corrente (HECKTHEUER, 2001).

2.3 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS EMPREGADAS NA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS

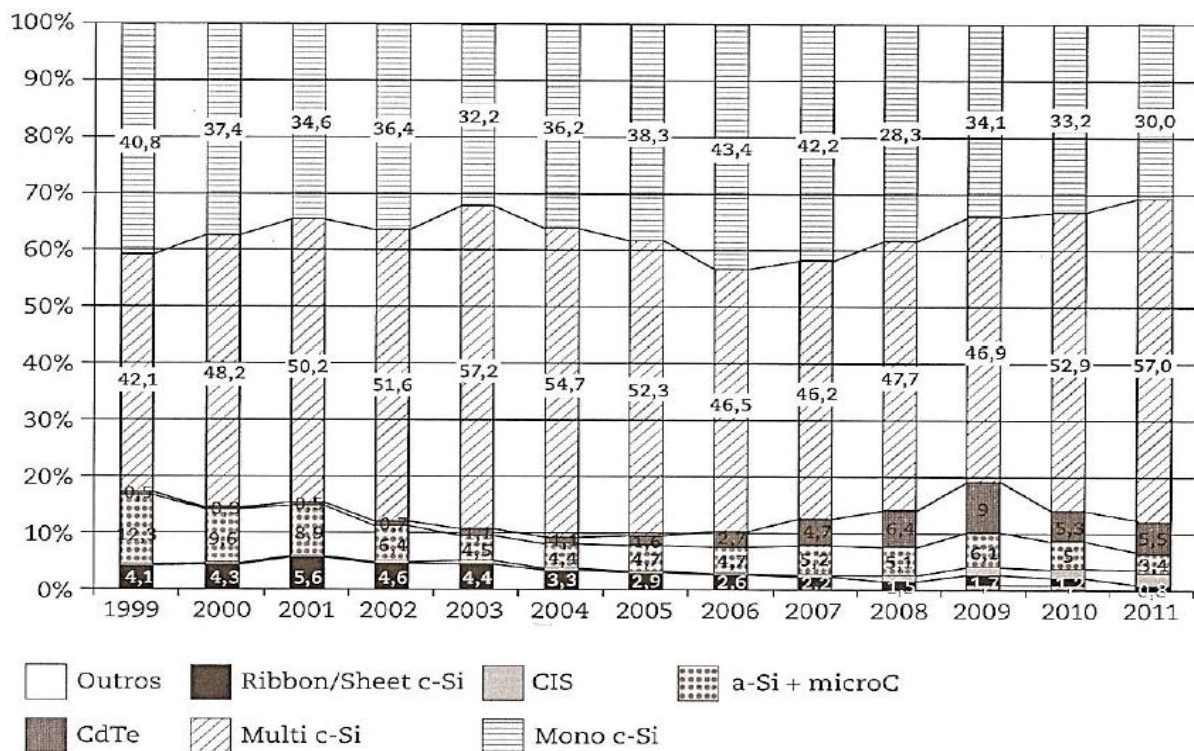
Atualmente, existem diversas tecnologias de fabricação para painéis fotovoltaicos, sendo que a grande maioria dos painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado mundial é fabricada à base de silício.

A obtenção do silício é possível através da purificação do quartzo, mineral abundantemente encontrado no solo brasileiro, sendo que a utilização em larga escala desse material deve-se, principalmente, ao aperfeiçoamento na fabricação de componentes eletrônicos, impulsionado pela evolução da microeletrônica (ZILLES, MACEDO, GALHARDO, & OLIVEIRA, 2012).

A utilização dos painéis de silício no mercado mundial é apresentada na figura 8, onde se pode verificar a grande participação dos painéis de silício policristalino (mc-Si),

totalizando aproximadamente 57% dos sistemas fotovoltaicos instalados até o final do ano de 2011, seguido dos painéis de silício monocristalino (c-Si) com aproximadamente 30% do mercado, e somadas, as tecnologias de filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), filmes finos de silício amorfo (a-Si) e outras tecnologias de filmes finos tais como disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício microcristalino (μ c-Si), silício crescido em fitas (Si-fitas), células baseadas em corantes (DSSC – *Dye Sensitized Solar Cells*) ou poliméricas, representam pouco mais de 10% dos sistemas fotovoltaicos instalados ao redor do mundo.

Figura 8: Participação das tecnologias de módulos fotovoltaicos no mercado mundial.



Fonte: Hering (2011).

2.3.1 Células de cristais de silício monocristalinos

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

O lingote resultante desse processo apresenta um aspecto brilhante, devido à distribuição homogênea das suas moléculas. É, então, fatiado em “*wafers*” e estes submetidos

a processos físicos de dopagem para que adquiram as propriedades fotovoltaicas. A célula recebe ainda uma película metálica no portador P, uma grade de conexões e um material antirreflexo no portador N (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

As células de silício monocristalinos, segunda tecnologia de conversão fotovoltaica mais utilizada no mercado mundial, apresentam o maior rendimento em comparação com as outras tecnologias monocamadas. O maior rendimento obtido para uma célula fotovoltaica de silício monocristalino é de 25,6% e, para módulos monocristalinos, o maior rendimento obtido até o ano 2014 foi de 22,4% (GREEN, EMERY, HISHIKAWA, WARTA, & DUNLOP, 2015). As células de silício monocristalino apresentam um custo de fabricação mais elevado que outras células de junção simples. Devido ao seu processo de cristalização, são quebradiças, necessitando assim de estrutura para garantir-lhes resistência mecânica, normalmente encontrada na coloração azul escura ou preta.

2.3.2 Células de cristais de silício policristalinos

As células fotovoltaicas policristalinas são fabricadas pelos métodos da solidificação direcional ou pelo método de carcaças eletromagnéticas semicontínuas (Theodore Frank Ciszek). (GHENSEV, 2006).

O lingote ou bloco de silício policristalino proveniente desse método de purificação é formado por aglomerados de pequenos cristais, com tamanhos e orientações distintas. Sua coloração é escura, geralmente azulada, apresentando manchas em sua coloração. É então fatiado em “*wafers*” com aparência heterogênea. Sofrem o processo de “dopagem” para que adquiram as propriedades fotovoltaicas, sendo que a célula acabada apresenta uma coloração azulada, podendo variar de acordo com o processo de aplicação do antirreflexo empregado (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

A tecnologia das células de silício policristalinos é a mais utilizada no mercado mundial por apresentar uma boa relação custo benefício, pois mesmo apresentando um rendimento ligeiramente menor que o da tecnologia monocristalina, apresenta custo de fabricação consideravelmente menor que os métodos empregados para a fabricação de células monocristalinas. O maior rendimento obtido para uma célula fotovoltaica de silício policristalino é de 20,8%, e para módulos policristalinos, o maior rendimento obtido até o ano 2014 foi de 18,5% (GREEN, EMERY, HISHIKAWA, WARTA, & DUNLOP, 2015). Também são quebradiças, rígidas com espessura na ordem de 0,2 mm, necessitando, assim, de estrutura para garantir-lhes resistência mecânica.

2.3.3 Filmes finos

Em contraponto à tecnologia de células fotovoltaicas cristalinas, os filmes finos são fabricados a partir da deposição de finas camadas de materiais semicondutores, na ordem de poucos micrometros por camada, sobre um substrato rígido ou flexível. A deposição das camadas ocorre a baixas temperaturas e em pequenas quantidades, por volta de 10 micra de espessura (GHENSEV, 2006), o que torna o processo de fabricação mais rápido, com uma menor quantidade de energia associada a sua fabricação e menor quantidade de material utilizado, tornando a fabricação desse tipo de célula fotovoltaica muito mais barata em comparação às células de silício mono e policristalino. Outra vantagem é a possibilidade de fabricação de células com formatos variados e de materiais flexíveis, facilitando sua incorporação na arquitetura de uma edificação ou de algum equipamento.

Pelo fato de cada painel tratar-se de uma única célula, os efeitos negativos do sombreamento são menores nessa tecnologia, apresentando um melhor aproveitamento para baixos níveis de radiação solar, principalmente para radiação difusa, e uma eficiência de conversão com um coeficiente de temperatura mais favorável, o que representa uma menor dependência térmica.

Por outro lado, essa tecnologia apresenta uma degradação muito rápida em comparação aos módulos de silício cristalinos, variando de acordo com o método e materiais empregados para a fabricação. Apesar de apresentar as vantagens citadas acima, estas células apresentam baixa eficiência na conversão fotovoltaica comparada as líderes de mercado.

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

As células de telureto de cádmio (CdTe) e de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) são as que apresentam maior eficiência dentre as células de filmes finos, 21% para a célula e 17,5% para módulos de CdTe e 20,5% para célula e 17,5% para o módulo de CIGS (GREEN, EMERY, HISHIKAWA, WARTA, & DUNLOP, 2015). A produção destas células também é prejudicada devido ao fato do cádmio (Cd) ser um material tóxico, o telúrio (Te) ser raro e ao custo de produção para as células CIGS ser muito elevado (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPTEL - CRESESB, 2014).

2.3.3.2 Silício amorfo (a-Si)

A tecnologia de filmes finos de silício amorfo foi a primeira a ser desenvolvida (1974) com utilização desde 1980. Apresentava problemas de estabilidade no seu rendimento e geração de energia, o que foi corrigido com a adoção de células com múltiplas camadas.

Apresenta um coeficiente de temperatura menor que as células cristalinas e menores perdas de eficiência em baixas radiâncias (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPEL - CRESESB, 2014).

Possui uma capacidade de absorver a radiação solar quarenta (40) vezes maior que a do silício monocristalino, o que permite a fabricação de módulos com uma lâmina de apenas 1 μm de espessura. Porém, sua resposta espectral está localizada na região espectral da cor azul, o que o torna um bom absorvedor da radiação difusa (RAMPINELLI & BÜHLER, 2012).

O rendimento desta tecnologia é muito baixo em comparação aos cristalinos, com um recorde de 10,2% para células e de 8% para módulos, até o ano 2014 (GREEN, EMERY, HISHIKAWA, WARTA, & DUNLOP, 2015) e apresenta uma degradação muito acelerada entre os 6 e 12 primeiros meses sob o efeito da radiação solar (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPEL - CRESESB, 2014).

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

Essa tecnologia apresenta, simultaneamente, as características das células de silício cristalino com a versatilidade de fabricação dos filmes finos. Consiste na substituição da camada de silício amorfo, da tecnologia anterior, por uma camada microcristalina por processos de alta ou baixa temperatura.

No processo de alta temperatura, de 900 a 1000°C, a camada microcristalina é depositada sobre o substrato e possui estrutura semelhante à célula policristalina. Já no processo de baixa temperatura, entre 200 e 500°C, ocorre deposição de estruturas microcristalinas muito finas e a baixa temperatura permite a utilização de substratos como vidro, plástico, etc. Possui eficiência estável de aproximadamente 8,5% (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPEL - CRESESB, 2014).

2.3.4 Silício crescido em fitas (Si-fitas)

O processo de fabricação de silício crescido em fita apresenta a versatilidade da produção de filmes finos com poucos processos e de simples implementação e através dessa técnica, obtém-se o Silício Monocristalino (mc-Si) de forma direta.

Segundo GHENSEV (2006), o crescimento de fita à base de silício monocristalino tem sido alvo de diversos estudos e desenvolvimentos de processo, pois aproveita as características das células de silício cristalino e as facilidades de fabricação das tecnologias dos filmes finos, obtendo a confiabilidade, estabilidade, eficiência elevada, e aceitação de

mercado conquistado pelo silício cristalino (sem o custo e o desperdício inerentes dos processos convencionais).

2.3.5 Células orgânicas e à base de corantes

As células provenientes de corantes (DSSC – *Dye Sensitized Solar Cells*) foram inicialmente desenvolvidas na década de 80 por Michael Grätzel. Elas são compostas por um substrato de vidro, um filme condutor transparente, uma camada composta de dióxido de titânio poroso embebido em corante contendo rutênio, um eletrólito salino, outro filme condutor transparente e um contato metálico traseiro de platina. Essa tecnologia não é considerada uma conversão fotovoltaica, pois os fótons incidentes liberam elétrons do corante que migram para a camada de dióxido de titânio. Esse fluxo se mantém porque o eletrólito cede elétrons para o corante, de tal forma que a geração de eletricidade se dá por um processo fotoeletroquímico (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPEL - CRESESB, 20014).

Segundo o artigo intitulado “O sol é para todos” (BEER, 2015), as células solares orgânicas (OPV) surgiram no início dos anos 2000, passando a ser mais pesquisadas nos últimos cinco anos. São constituídas de materiais não tóxicos. Com 5% do peso de um módulo de silício cristalino, são menos dependentes da radiação direta do sol para gerarem energia (ótima absorção da radiação difusa) e o processo de fabricação apresenta baixo custo. Entretanto, sua produção em larga escala está condicionada ao aumento do rendimento a patamares estáveis superiores a 10% e ao desenvolvimento de eletrólitos sólidos.

A deposição desse material orgânico pode ser realizada por processos conhecidos como *spray*, *spin-on* ou *roll-to-roll*. Com uma eficiência superior a 10% para as células, ainda necessita de mais estudos, pois os módulos ainda apresentam uma eficiência de conversão muito baixa e uma degradação muito rápida.

2.4 ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

A energia proveniente do Sol é transmitida pelo espaço até o planeta Terra na forma de radiação eletromagnética composta por diversos comprimentos de ondas distintos. A quantidade de energia que uma onda eletromagnética pode transmitir é diretamente proporcional a sua frequência de propagação. De acordo com a equação de Planck-Einstein, equação (1.1), quanto maior a frequência da onda, mais energia esta transporta (CEPEL - CRESESB, 2014).

$$E = h \cdot f \quad (1.1)$$

A energia (E) é expressa em joules (J), a frequência (f) é expressa em hertz (Hz) e “ h ” é a constante de proporcionalidade de Planck que possui valor aproximado de $6,63 \cdot 10^{-34}$ joules-segundo (J.s).

Visto que a onda eletromagnética se desloca no vácuo com velocidade constante (c) de aproximadamente 299.792.458 metros por segundo (m/s), pode-se determinar o comprimento de onda através da equação (1.2) (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Lambda (λ) é o comprimento da onda expressa em submúltiplos de metros (m) e a frequência em hertz (Hz).

Já a irradiância (H), equação (1.3), que se refere à densidade de potência incidente, em watts, sobre uma área de um metro quadrado (W/m^2) em relação a um período de tempo que geralmente é expressa na média diária da irradiância obtida em período de medição de um ano ou mês, é obtida através da multiplicação do fluxo de fótons pela energia de cada fóton (HONSBURG & BOWDEN, 2014).

$$H = \phi \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.3)$$

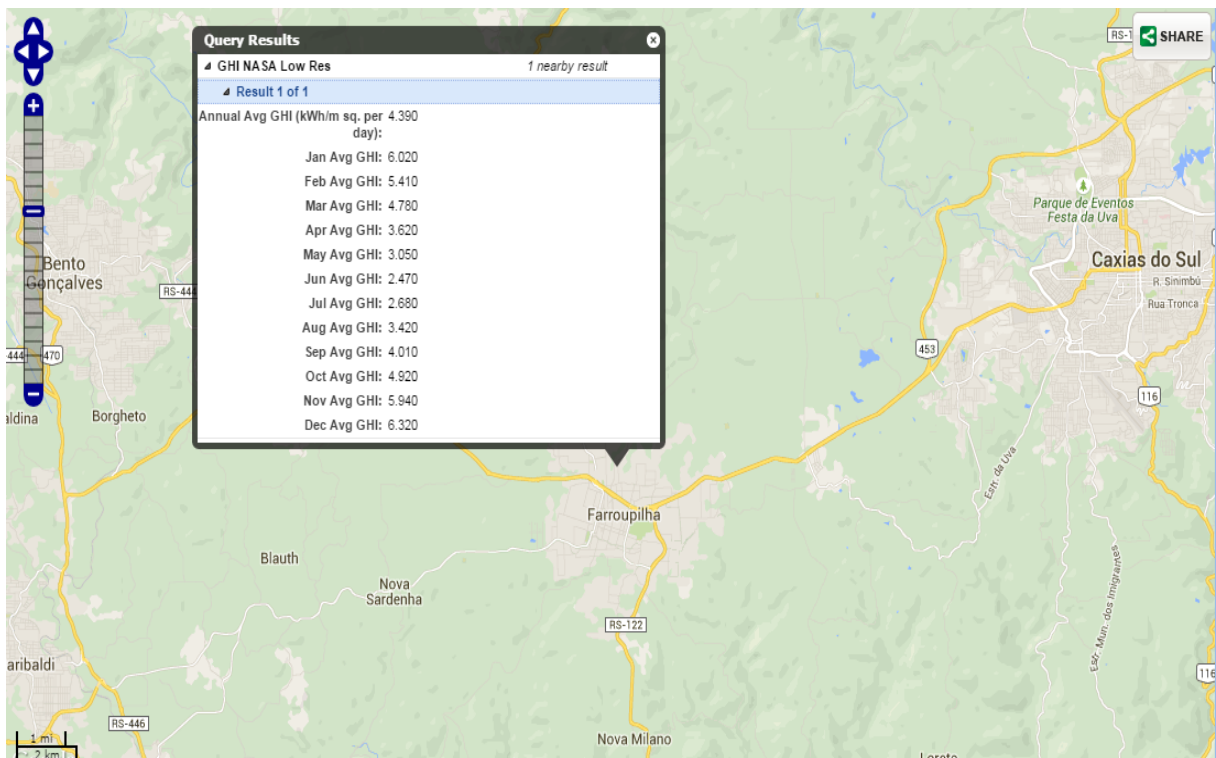
Sendo ϕ o fluxo de fótons, definido como o número de fótons (N) que atinge certa área (A) em um determinado período de tempo (t), conforme equação (1.4) (HONSBURG & BOWDEN, 2014).

$$\phi = \frac{N}{A \cdot t} \quad (1.4)$$

A figura 9 fornece um valor médio diário para a irradiância (H), extraído através de uma coleta de dados mensais da irradiância global (radiação direta mais difusa) incidente na posição horizontal ao solo. Os dados foram obtidos através dos mapas da *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), para a cidade de Farroupilha, RS.

Os dados para a confecção do mapa solar fornecido pela SWERA são obtidos através de diversas medições sob a superfície terrestre, e comparados com dados obtidos através de um modelo que utiliza imagens de satélite para estimar a irradiação solar no Brasil, obtendo um desvio médio de 5% à 7%, o que garante uma boa precisão para os valores de irradiação horizontal. Porém, para se obter o máximo rendimento nas instalações fixas, todos os módulos fotovoltaicos devem ser instalados com um ângulo de inclinação próximo à latitude local e direcionados para o norte geográfico. O fato de os módulos serem instalados na posição inclinada, em sua grande maioria, faz com que os mesmos absorvam três tipos de radiação: a direta, a difusa e a refletida devido ao albedo.

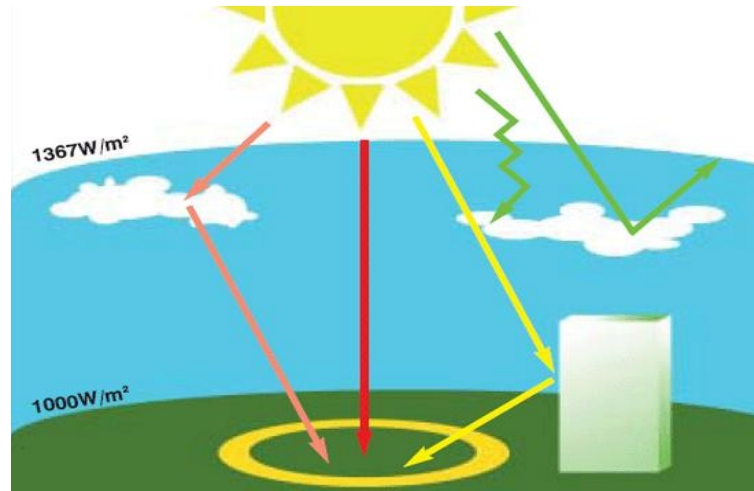
Figura 9: Média diária da irradiâncias para uma irradiação horizontal incidindo sobre a cidade de Farroupilha,RS.



Fonte: (National Renewable Energy Laboratory, 2015)

A figura 10 é uma representação gráfica para os diferentes tipos de radiação incidente: a radiação direta é aquela que atravessa a atmosfera e atinge diretamente o módulo fotovoltaico (linha vermelha); a radiação difusa é proveniente da difusão de determinados comprimentos de onda do espectro solar devido à presença de particulados em suspensão na atmosfera (linha rosa) e a radiação de albedo é proveniente da reflexão da radiação solar em superfícies naturais ou não (linha amarela). Os módulos fotovoltaicos absorvem o somatório de todas essas radiações que é conhecido como radiação global.

Figura 10: Representação gráfica dos tipos de influência que ocorrem na radiação solar ao ingressar na atmosfera.

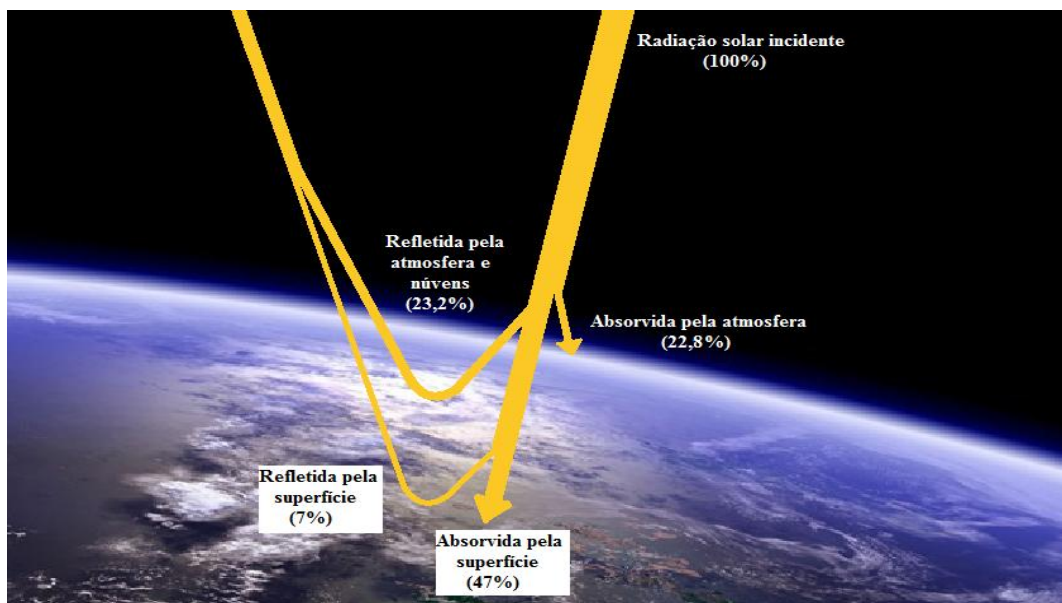


Fonte:(QUADRADO, 2008)

2.5 PARÂMETROS QUE ALTERAM A DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL SOLAR

De acordo com TRENBERTH, FASULLO e KIEHL (2009), do fluxo que o Sol irradia em direção à Terra na forma de ondas eletromagnéticas quarenta e seis por cento (46%) ou são absorvidos ou refletidos pela atmosfera terrestre, quarenta e sete por cento (47%) são absorvidos pela crosta terrestre e sete por cento (7%) são refletidos pela mesma, o que é retratado na figura 11. Resultando em aproximadamente noventa e quatro (94) mil Terawatts hora (TWh) de energia incidindo sobre meia calota da superfície terrestre.

Figura 11: Energia global incidente em 24 horas (w/m^2), média anual entre março de 2000 a maio de 2014.



Fonte: TRENBERTH, FASULLO, & KIEHL, 2009 (adaptado pelo autor)

Os dados apresentados por TRENBERTH, FASULLO e KIEHL (2009) representam uma média de quatorze anos de análise, o que torna esses dados confiáveis para representar o balanço energético ao longo de um ano.

O espectro da radiação eletromagnética proveniente do sol, denominado como espectro da radiação solar, é composto de ondas eletromagnéticas com comprimentos distintos e, de acordo com seu comprimento, cada onda transporta uma quantidade de energia. Uma distribuição de frequências semelhante ao espectro de um corpo negro aquecido a 5800 K o que representa aproximadamente a temperatura da superfície do sol. Porém, ao atravessar a atmosfera terrestre, o espectro da radiação solar sofre distorções devido à reflexão, à absorção e à difusão.

A energia eletromagnética solar, ao ingressar na atmosfera, sofre uma difração que se comporta de acordo com a teoria de espalhamento de Rayleigh, causada pelos gases puros e secos, onde as partículas são esféricas com dimensões menores que um décimo do comprimento de onda ($r < 0,1\lambda$), sendo o espalhamento função contínua da frequência e proporcional a sua quarta potência (Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPEL - CRESESB, 2014). As ondas eletromagnéticas com comprimento de onda superior a mil nanômetros ($\lambda > 1000 \text{ nm}$) não interagem com o ar seco, ao contrário do que ocorre nas regiões correspondentes aos comprimentos de ondas da cor azul e da violeta, onde o espalhamento é predominante, o que explica a famosa frase do astronauta Iuri Gagarin: “A Terra é azul”.

De acordo com HAAG (2012), além do espalhamento por Rayleigh, outros fatores contribuem na atenuação ou extinção de determinados comprimentos de ondas ao incidir no solo terrestre, tais como a absorção pelo ozônio, pelo dióxido de nitrogênio, pela mistura uniforme de gases, pelo vapor de água e aerossóis.

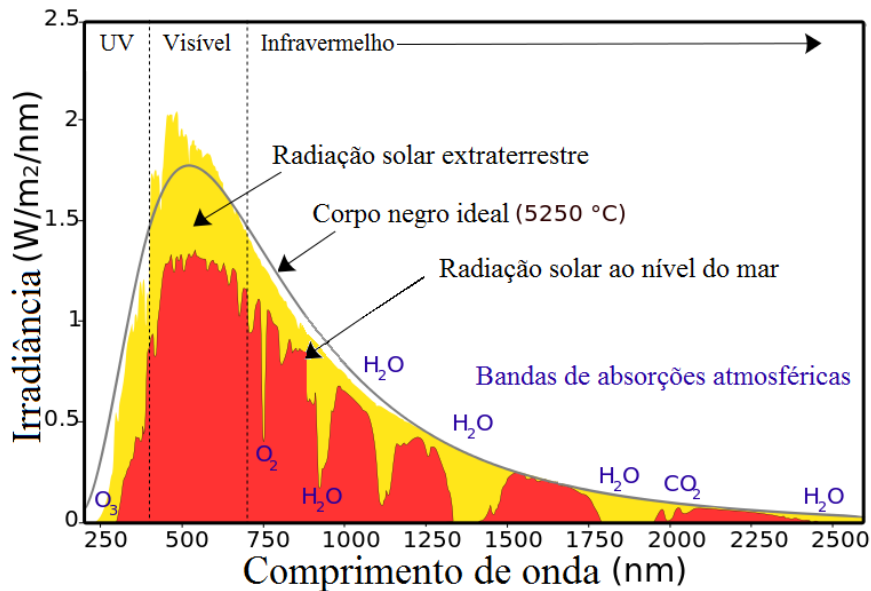
A camada de ozônio (O_3) absorve grande parte da radiação ultravioleta (UV) com comprimentos de ondas inferiores a 320 nm e em determinadas bandas do infravermelho (IR) de comprimentos de ondas acima dos 3120 nm. Porém, há ainda uma fraca absorção na faixa de luz visível.

A absorção pela mistura uniforme de gases, principalmente o oxigênio (O_2) e o dióxido de carbono (CO_2), absorvem significativamente os comprimentos de ondas superiores a 1000 nm, dentro da faixa de radiação infravermelho (IR).

Os aerossóis diminuem a parcela da radiação direta e aumentam a parcela da radiação difusa, principalmente nos comprimentos de ondas relativos ao espectro de luz visível e ultravioleta.

O vapor de água (H_2O) em suspensão na atmosfera é um forte absorvedor da radiação solar e pode ser percebida a sua interferência em vários comprimentos de ondas do espectro solar, como pode ser visto na figura 12.

Figura 12: Espectro da radiação solar.



Fonte: (BENDHOWARD, 2013)

Para padronizar os testes de dispositivos solares, foi criada a norma ASTM G173-03 (americana) e posteriormente a comunidade europeia adotou os mesmos parâmetros (IEC 60904-3) com o intuito de uma padronização mundial para a caracterização de células, módulos e sistemas fotovoltaicos para aplicação terrestre sem a utilização de concentradores.

2.6 CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

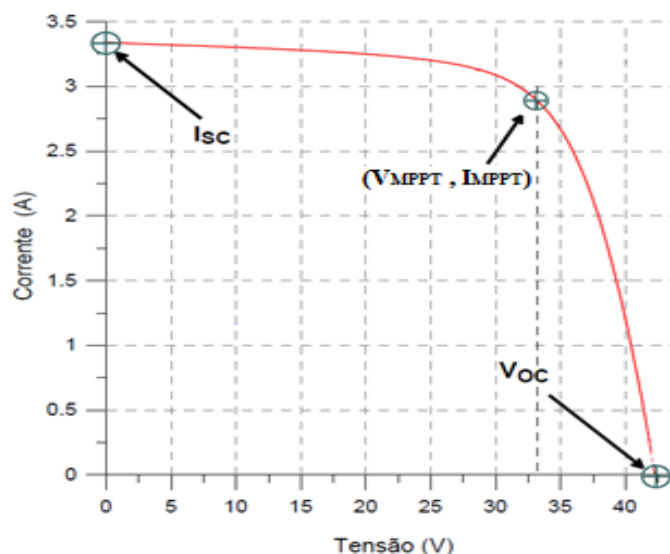
A caracterização de módulos fotovoltaicos consiste basicamente na determinação da curva $I \times V$ (corrente *versus* tensão) e seus parâmetros elétricos referentes ao circuito equivalente.

A geração de energia elétrica, a partir da tecnologia fotovoltaica, apresenta uma característica de variabilidade de seus valores de tensão e corrente que são dependentes de vários fatores tais como, a potência da carga instalada em seus terminais, temperatura da junção PN das células, da irradiância instantânea em relação à resposta espectral da tecnologia a ser utilizada e o espectro solar incidente sobre o sistema, sendo que esse último apresenta grandes variações para diferentes regiões.

Já a determinação da curva de corrente e tensão (IxV) do módulo é determinada no Brasil segundo a norma NBR-12136 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que determina que os testes devem ser executados em condições específicas de temperatura e irradiação, uma temperatura de 25 °C e uma irradiação de 1000 W/m², entre outras condições determinadas. Muitas vezes, os ensaios precisam ser realizados fora das condições padrão, e para tanto, os dados obtidos nesses testes precisam ser corrigidos para que seja possível expressar os resultados referentes à exposição desse módulo às condições preconizadas na norma. Dessa forma, far-se-á necessária a determinação dos coeficientes térmicos que representam a variação da corrente de curto-circuito (α) e a variação da tensão de circuito aberto (β) (BÜHLER, 2007). Os parâmetros elétricos do circuito equivalente do módulo fotovoltaico precisam ser determinados, uma vez que os mesmos fornecem informações importantes a respeito do desempenho elétrico e sobre a qualidade da geração.

Os módulos da tensão e da corrente dependem da carga ligada em seus terminais. Uma carga com resistência muito baixa demandará uma alta corrente do módulo fotovoltaico, tendendo a I_{SC} (corrente de curto-circuito) de tal forma que a tensão gerada diminuirá, tendendo a zero. Em contrapartida, uma carga com resistência muito elevada consumirá uma corrente insignificante do sistema fazendo a tensão tender a V_{OC} (tensão de circuito aberto). A figura 13 apresenta uma curva característica da corrente versus tensão de um módulo fotovoltaico, indiferente da tecnologia fotovoltaica utilizada para a conversão da energia solar em eletricidade. A curva IxV terá sempre o mesmo comportamento, porém com valores de corrente e tensão característicos para cada tecnologia.

Figura 13: Curva característica (IxV) de um módulo (mc-Si, 72 células) com 100 W.



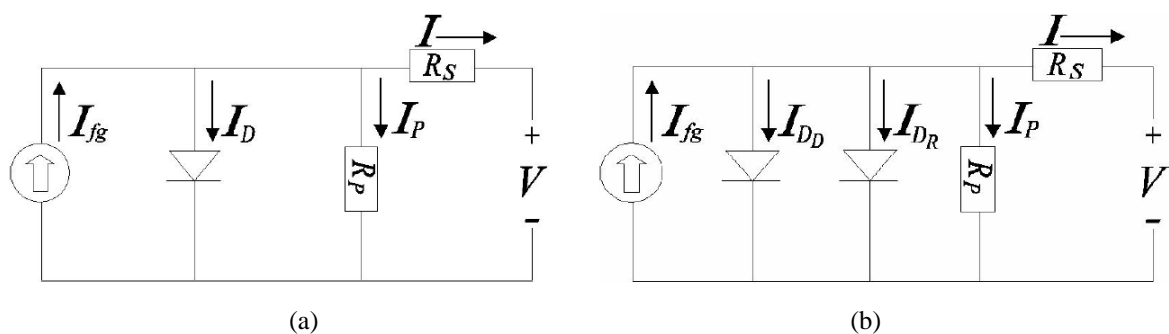
Fonte: (BÜHLER, 2007).

Sendo I_{SC} a corrente de curto-circuito, V_{OC} é a tensão de circuito aberto e V_{MPPT} e I_{MPPT} são a tensão e a corrente para o ponto de máxima potência (*maximum power point tracking*).

Outros parâmetros importantes para determinar o desempenho elétrico e a qualidade do gerador fotovoltaico são os parâmetros dos circuitos equivalentes do módulo fotovoltaico, conforme figura 14, tais como:

- Resistência em série (R_S): afeta diretamente o fator de forma da curva $I \times V$. Apresentando um valor elevado, diminui consideravelmente o ponto de máxima potência, pois causará uma queda de tensão nos terminais do módulo devido à passagem de corrente pelo mesmo;
- Resistência em paralelo (R_P): responsável pelas fugas de corrente no interior do módulo;
- Fator de idealidade do diodo (m): é um parâmetro diretamente associado com a curvatura da curva I - V na região do joelho da mesma, influenciando, dessa forma, a máxima potência do dispositivo fotovoltaico.
- Corrente de saturação reversa (I_0): representa os fenômenos de difusão e recombinação dos portadores minoritários na região de depleção, ocasionando a diminuição da tensão de circuito aberto com o aumento da temperatura.

Figura 14: Circuitos equivalentes de uma célula fotovoltaica com um diodo (a) e com dois diodos (b).



Fonte: (BÜHLER, 2007).

Para o modelo (a), de um diodo, o resistor em série (R_S) representa a queda de tensão devida às resistências do próprio material da célula e suas conexões. O resistor em paralelo (R_P) representa as fugas de correntes no material (I_P); a corrente fotogerada (I_{fg}) é representada por uma fonte de corrente e a corrente (I_D) representa os fenômenos de recombinação e de difusão, intrínseca do material, que ocorrem sobre a junção PN.

O modelo (b), de dois diodos, apresenta as mesmas características do modelo (a), contendo um diodo. Porém, o diodo (I_{DD}) representa o fenômeno de difusão, que é predominante em aplicações de baixas tensões, inferiores a 0,4 V, aos terminais da célula, e o diodo (I_{DR}) representa o fenômeno de recombinação, fenômeno este que é responsável pelo aumento da corrente quando a tensão aplicada aos terminais da célula ultrapassa 0,4 V. Cada diodo apresenta uma corrente de saturação reversa e fator de idealidade próprios, de acordo com a teoria de Shockley (BÜHLER, 2007).

Visto que a representação do modelo com dois diodos não apresenta resultados significativamente mais precisos que o modelo contendo apenas um diodo e que esse modelo é amplamente utilizado para a determinação das características elétricas de células e módulos fotovoltaicos, é apresentada a equação (1.5) (VIDAL, BARRA, & PINHÃO, 2013) que representa a aplicação da lei dos nós para o modelo a um diodo da figura 14.

$$I = I_{fg} - I_D - I_P \quad (1.5)$$

A corrente fotogerada I_{fg} é diretamente proporcional ao nível de radiação solar e a temperatura do módulo fotovoltaico, conforme equação (1.6) (VIDAL, BARRA, & PINHÃO, 2013). Além de a corrente fotogerada variar em função da radiação solar e da temperatura do módulo fotovoltaico, ainda depende da I_{SC} que é a corrente de curto-circuito do painel; de J_0 que é o coeficiente de temperatura que varia de acordo com a tecnologia empregada para a fabricação do módulo; de T que é a temperatura do módulo fotovoltaico (K); de T_{ref} que é a temperatura de referência (K); de S que é a radiação solar incidente e de S_{ref} que é a radiação solar de referência, ambas em W/m^2 .

$$I_{fg} = [I_{sc} + J_0 \cdot (T - T_{ref})] \cdot \frac{S}{S_{ref}} \quad (1.6)$$

Os fenômenos de recombinação e difusão sobre a junção PN são representados por uma corrente I_D sobre um diodo em paralelo com a fonte de corrente. Essa corrente apresenta um comportamento não linear, que é inversamente proporcional à temperatura do painel e dependente das condições de funcionamento em que esse se encontra. A equação (1.7) (VIDAL, BARRA, & PINHÃO, 2013) expressa essa não linearidade do diodo.

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (I \cdot R_s + V)}{m \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (1.7)$$

Onde I_0 é a corrente de saturação reversa da junção PN, q é a carga de um elétron ($1,6022 \times 10^{-19}$ C); $I \cdot R_s$ representa as perdas de condução; V é a tensão de saída; m é o fator de idealidade do diodo; K é a constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23}$ J/K) e T a temperatura do módulo (K).

A corrente de saturação reversa do diodo (I_0) é calculada através da aplicação da equação (1.8) (VIDAL, BARRA, & PINHÃO, 2013).

$$I_0 = I_{D0} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_g}{m \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (1.8)$$

Onde I_{D0} é uma constante do material e E_g é a tensão gerada sobre o resistor paralelo R_p .

Por fim, são apresentadas as equações associadas às variáveis I_{D0} (1.9) e E_g (1.10) (VIDAL, BARRA, & PINHÃO, 2013). A variável I_{D0} é dependente apenas das características fixas do painel, enquanto E_g é dependente da tensão gerada de referência (E_{gref}), da temperatura T e das constantes “ a ” e “ b ”, que se referem às constantes térmicas para os diferentes materiais utilizados para a fabricação das células, conforme figura 15.

$$I_{D0} = \frac{I_{sc}}{\exp\left[\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{m \cdot K \cdot T}\right) - 1\right]} \quad (1.9)$$

$$E_g = E_{gref} - \frac{a \cdot T^2}{T + b} \quad (1.10)$$

Figura 15: Energia de *gap* para o Si com os valores das constantes a e b da equação (1.10).

Material	$E_g(0)(\text{eV})$	$a (10^{-4} \text{eV K}^{-1})$	$b (\text{K})$
Si	1,16	7	1100

Fonte:(BÜHLER, 2011)

As fugas de corrente, apresentadas na figura 14 pela resistência em paralelo com a fonte de corrente, são incluídas no cálculo de corrente de saída pela expressão I_p , sendo apresentada na equação (1.11) (VIDAL, BARRA, & PINHÃO, 2013).

$$I_p = \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_p} \quad (1.11)$$

Para completar o conjunto de equações associadas a um painel fotovoltaico, é ainda necessário o cálculo das resistências R_s e R_p presentes nas equações (1.7) e (1.11).

As resistências tratam-se de constantes que podem ser calculadas recorrendo a características fixas do painel fotovoltaico, de acordo com as equações (1.12) e (1.13) (VIDAL, BARRA, & PINHÃO, 2013).

$$R_s = \frac{V_{OC} - V_{MPPT}}{I_{MPPT}} \quad (1.12)$$

$$R_p = \frac{V_{OC}}{I_{SC} - I_{MPPT}} \quad (1.13)$$

Através da modelagem matemática apresentada até o momento, fica claro que existem três fatores principais que influenciam na geração fotovoltaica de energia elétrica.

Primeiramente, o material cujas células fotovoltaicas foram produzidas determina os valores de J_0 (coeficiente de temperatura), I_0 (corrente de saturação reversa da junção PN), m (fator de idealidade do diodo), E_{gref} (tensão fotogerada na junção PN) e os coeficientes térmicos “ a ” e “ b ”.

Os outros dois fatores que influenciam na geração de energia fotovoltaica são a irradiação local e a temperatura dos módulos.

Visto que a irradiação solar incidente em cada localidade apresenta uma variação na distribuição do seu espectro, nas amplitudes em distintos comprimentos de ondas, devido às condições geográficas e climáticas específicas da região e que cada tecnologia de fabricação de células fotovoltaicas apresenta uma resposta espectral diferente, ou seja, absorvem diferentes faixas e amplitudes do espectro solar, fica evidente que o rendimento de uma célula, módulo e ou associação dos mesmos em instalações reais, requer um estudo da resposta espectral das tecnologias de fabricação e os componentes do espectro local.

Com esse intuito, no capítulo seguinte, “Materiais e Métodos”, serão apresentados o espectro padrão (ASTM G173), a resposta espectral das principais tecnologias de fabricação de módulos fotovoltaicos encontradas no mercado mundial e os espectros mensais da radiação solar na região da cidade de Farroupilha, RS.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as condições estabelecidas por normas específicas para a caracterização de módulos fotovoltaicos, ensaios realizados para a determinação das curvas IxV das principais tecnologias empregadas na fabricação de módulos, a determinação de pontos obtidos sobre as curvas de resposta espectral dessas diferentes tecnologias (fornecida por instituto de pesquisa) e determinação do espectro da radiação solar, mensal, para a cidade de Farroupilha, de acordo com os dados meteorológicos históricos desde o ano de 2000 até 2014, obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

3.1 CONDIÇÕES PARA CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS TERRESTRES

As normas da *American Society for Testing & Materials* (ASTM - G173-03), da *International Electrotechnical Commission* (IEC 60904-3) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT - NBR-12136) determinam as condições específicas em que um módulo fotovoltaico deve estar submetido para que possa ser ensaiado, sendo que os resultados obtidos expressam seus valores de forma padronizada.

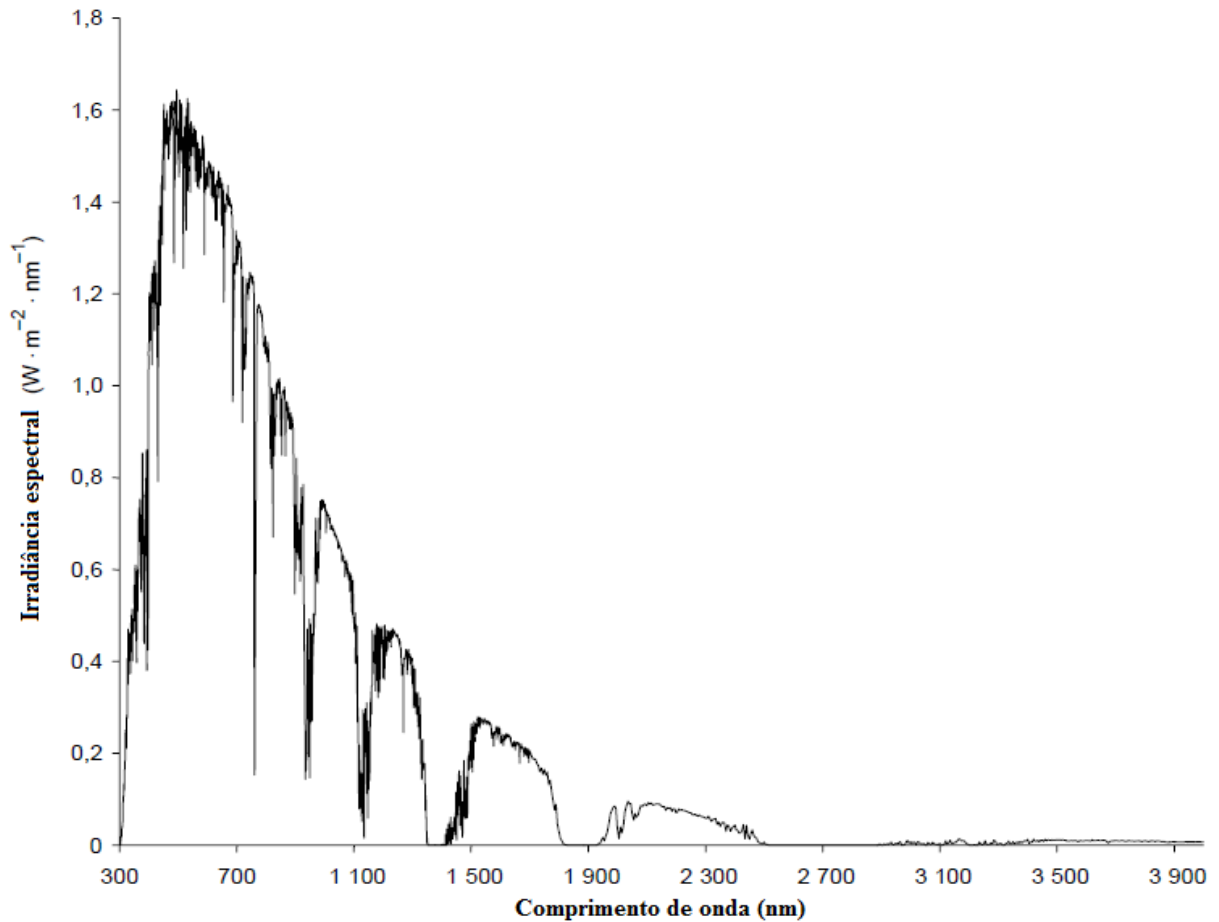
Essas condições são aplicadas para a caracterização de células, módulos ou sistemas que não façam uso de concentradores de irradiação, sob a influência da radiação solar incidente na crosta terrestre.

De acordo com a norma IEC 60904-3 (2008), a conversão fotovoltaica é espectralmente seletiva, dependendo das características naturais do material semicondutor utilizado para a fabricação das células e, por conseguinte, dos módulos fotovoltaicos. Para que seja possível uma eventual comparação de desempenho do processo de conversão de energia dessas diferentes tecnologias, faz-se necessária a utilização de uma distribuição espectral padrão de referência, figura 16, a fim de padronizar os simuladores solares de acordo com os requisitos de desempenho espectral contidos na norma IEC 60904-9.

A realização do ensaio para determinação das características da curva IxV de módulos fotovoltaicos, descritas na IEC 60904-1, requer uma temperatura estável de 25 °C e uma irradiância padronizada em 1000 Wm⁻².

A distribuição espectral solar de referência, contida na norma IEC 60904-3, foi obtida através da modelagem matemática dos dados geográficos e meteorológicos médios do território norte americano no *software* SMARTS versão 2.9.2, disponibilizado gratuitamente pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

Figura 16: Distribuição espectral da irradiância solar de referência



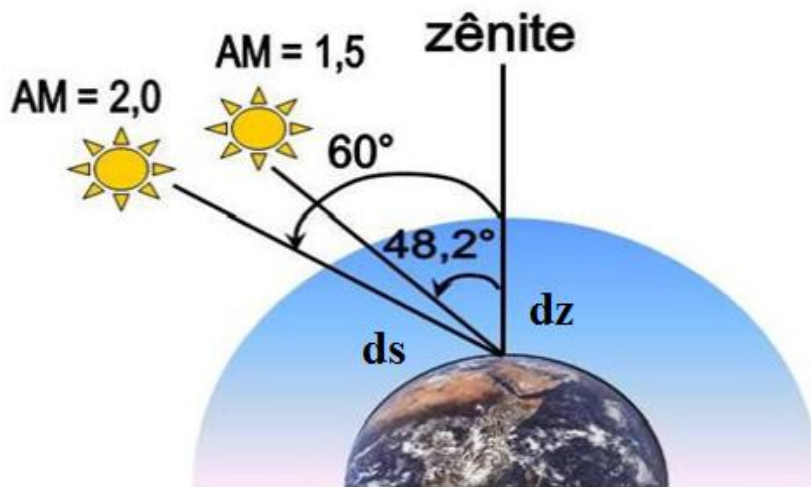
Fonte: (IEC 60904-3, 2008)

O espectro solar de referência foi obtido através da inferência da posição geográfica dessa irradiação incidente, determinada através da massa de ar, nesse caso AM 1.5. A massa de ar (AM do inglês *air mass*) representa o caminho efetivo que a radiação incidente precisa percorrer ao ingressar na atmosfera até atingir a superfície terrestre em uma determinada posição do planeta, figura 17. Para a determinação da massa de ar (1.14), o Sol deverá estar na posição de zênite, ponto (imaginário) interceptado por um eixo vertical (imaginário) traçado a partir da cabeça de um observador (localizado sobre a superfície terrestre) e que se prolonga até a esfera celeste.

$$AM = \frac{\int_0^{\infty} \rho ds}{\int_0^{\infty} \rho dz} \approx \sec\theta_z \quad (1.14)$$

A massa de ar relativa é calculada como a razão da integral da trajetória da irradiação do sol quando este encontra-se na posição zênite (dz) e a integral da trajetória para qualquer posição diferente de zênite (ds), sendo que ρ representa a densidade dos componentes atenuadores da atmosfera. Assumindo-se uma atmosfera não refrativa e completamente homogênea, a massa de ar pode ser aproximada através da secante do ângulo θ_z (EBERHARDT, 2005).

Figura 17: Ilustração da definição de massa de ar



Fonte: (BÜHLER, 2011)

Inferem-se ainda as condições atmosféricas através da determinação da concentração de CO_2 em patamares de 370 ppm (partes por milhão), o que representa um modelo de concentração desse aerossol para uma localidade rural sem a presença de poluição, teor de O_3 estipulado em 0,3438 atm-cm (343,8 Dobson Unity), turbidez de 0,084 a 500nm, pressão atmosférica ao nível do mar (1013,25 hPa) e uma quantidade de água precipitável de 1,4164 cm (Anexo A). O que não reproduz a realidade das condições da cidade de Farroupilha.

Através desta padronização do espectro da radiação solar, é possível ensaiar todas as diferentes tecnologias de fabricação de módulos fotovoltaicos e comparar seu rendimento sob esta condição específica, o que atualmente é utilizado.

Porém, como a própria normatização vigente retrata em suas entrelinhas, as diferentes tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas apresentam respostas espectrais em faixas distintas de comprimentos de ondas e apresentam ainda rendimentos diferenciados para cada comprimento de onda. Logo o seu rendimento é significativamente afetado pela distribuição espectral da radiação incidente que varia seu espectro de acordo com vários fatores tais como localização, condições climáticas, época do ano, hora do dia, etc.

Portanto, para definir o rendimento de um sistema de conversão fotovoltaica, necessita-se determinar o espectro da radiação solar médio incidente no local da instalação.

3.2 DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Cada tecnologia diferente de fabricação de células fotovoltaicas apresenta uma absorção limitada do espectro da radiação solar incidente no solo (IEC 60904-3, 2008). Com o intuito de mensurar a capacidade de conversão fotovoltaica para diversos comprimentos de ondas do espectro, as orientações para essa determinação foram padronizadas na norma IEC 60904-8 (*International Electrotechnical Commission*, 2014) sob o título “Medição da resposta espectral de dispositivos fotovoltaicos”.

A medição da resposta espectral para módulos fotovoltaicos, disposta na norma regulatória, é realizada através da irradiação de uma fonte de luz (ultravioleta, visível e infravermelho) em bandas estreitas de comprimento de onda sobre o dispositivo em teste, sendo que essa “varredura” deverá cobrir toda a faixa de resposta do mesmo. Para que se obtenha a resposta espectral, é necessária a medição da corrente de curto-circuito para cada comprimento de onda irradiada sobre o dispositivo em teste.

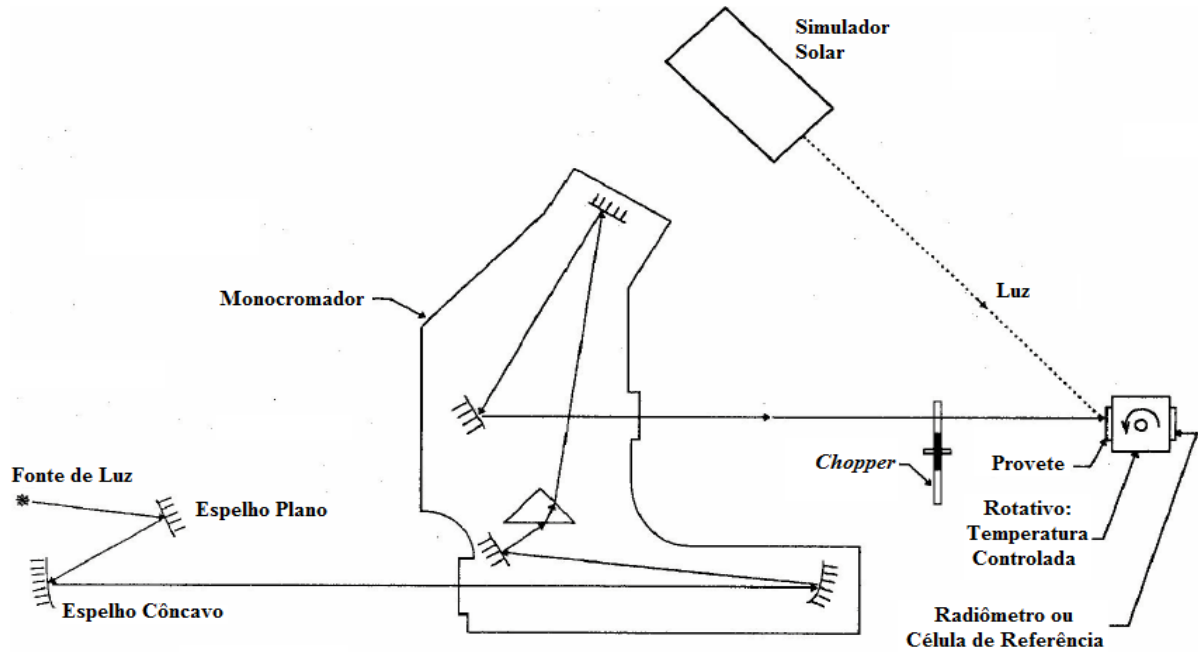
A fonte de luz utilizada para esse teste é uma lâmpada de tungstênio de 1000 W com temperatura de cor, estável, de 3200 K e a luz irradiada deve apresentar uma distribuição uniforme sob o dispositivo em teste, sendo que esse dispositivo deve estar em uma situação de temperatura controlada.

Para garantir o nível de irradiância, é utilizado um monitor de irradiância do tipo termopar em vácuo, um radiômetro piroelétrico, um dispositivo fotovoltaico de referência com resposta espectral mais larga ou igual à resposta espectral do dispositivo em teste ou outro detector apropriado.

A norma IEC 60904-8 apresenta três técnicas para determinação da resposta espectral de dispositivos fotovoltaicos que apresentam distribuições lineares ou não. A primeira técnica é o teste realizado sob a irradiância de um feixe de luz monocromática obtida através da decomposição da luz branca irradiada pela lâmpada descrita anteriormente (figura 18). Já na segunda técnica, a luz não é decomposta e sim delimitada através de filtros monocromáticos com passos de comprimento de onda não superiores a 50 nm com bandas laterais inferiores a 0,2% (figura 19). Por último, é apresentado um método de luz pulsada, onde se utiliza uma lâmpada mais potente a fim de obterem-se pulsos de luz de alta intensidade (figura 20). Porém, a norma alerta que o método de luz pulsada não pode ser

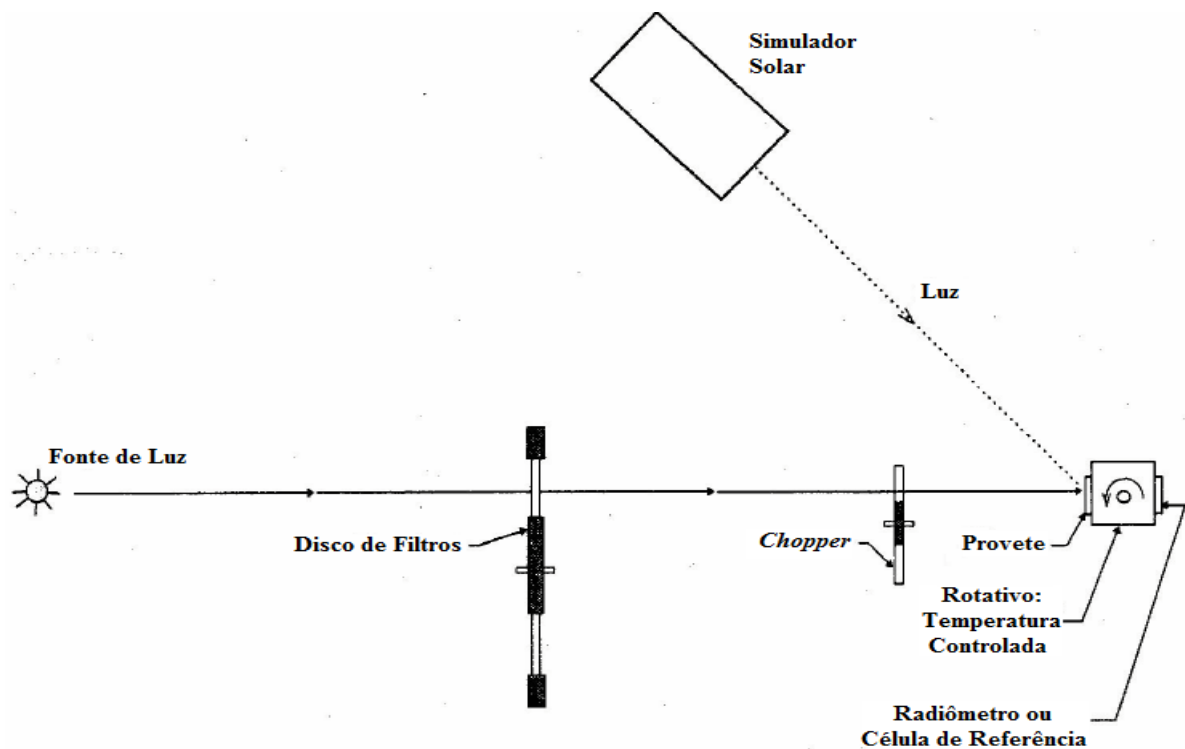
utilizado para dispositivos que apresentem um tempo de resposta muito lento e que os resultados obtidos nesse método obrigatoriamente devem ser corrigidos devido ao aumento da intensidade da luz emitida para o referido teste.

Figura 18: Ilustração do método de medição da resposta espectral através de feixe de luz monocromática.



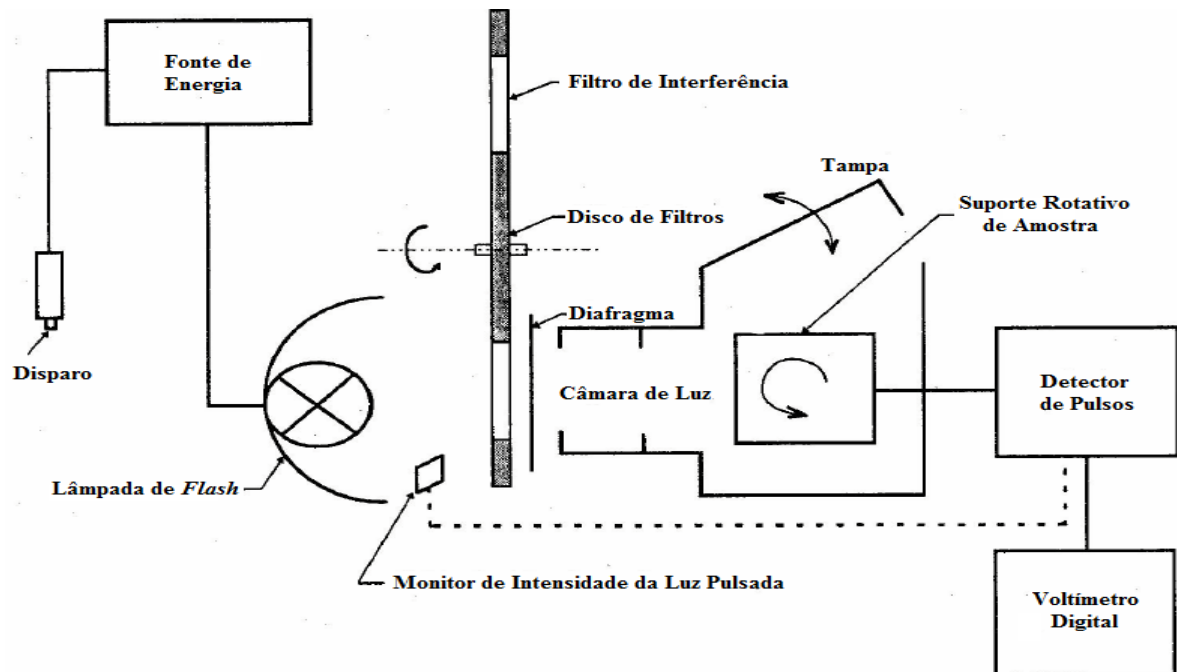
Fonte: (IEC 60904-8, 2014)

Figura 19: Ilustração do método de medição da resposta espectral através de filtros monocromáticos.



Fonte: (IEC 60904-8, 2014)

Figura 20: Ilustração do método de medição da resposta espectral através de filtros monocromáticos e luz pulsada.



Fonte: (IEC 60904-8, 2014)

Em SARA, BETTS, & GOTTSCHALG (2014), é apresentado um novo método de determinação da resposta espectral, através de filtros policromáticos, com a vantagem de possuir um maior nível de iluminação do dispositivo em teste. Para a determinação da resposta espectral através do método monocromático, é necessária uma grande quantidade de filtros devido à característica de possuir uma estreita faixa do espectro de luz, o que aumenta em muito o custo do sistema de medição.

Os filtros policromáticos (figura 21) apresentam uma largura de banda espectral muito mais ampla do que os monocromáticos considerados pela norma IEC 60904-8.

Figura 21: Filtros policromáticos utilizados para a determinação da resposta espectral proposta.



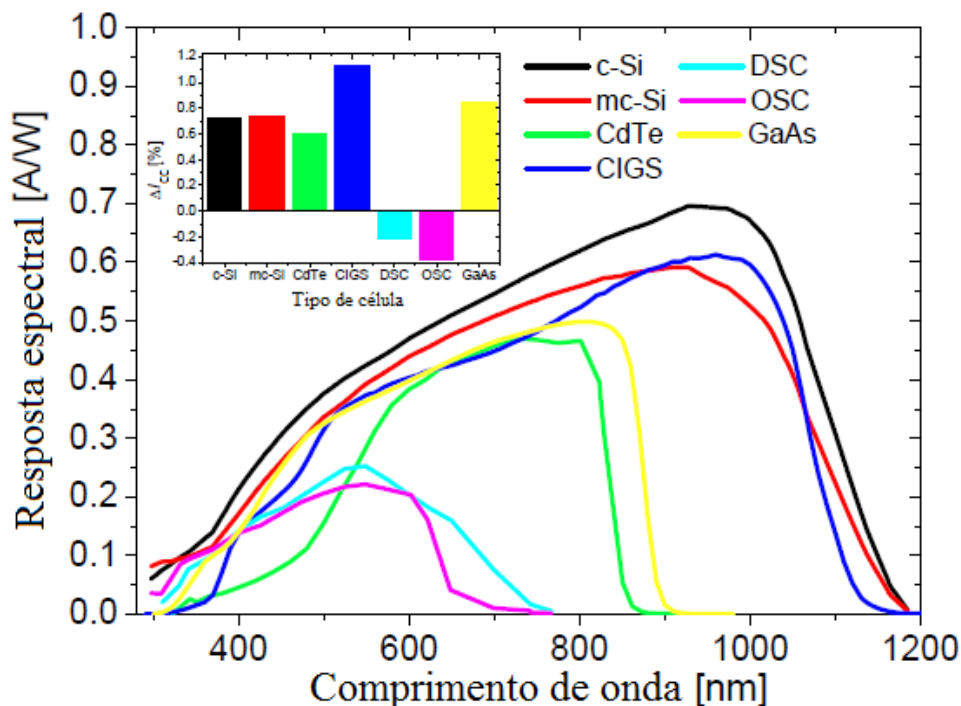
Fonte: (SARA, BETTS, & GOTTSCHALG, 2014)

Os resultados obtidos pelo método dos filtros policromáticos apresentaram um desvio espectral médio em relação ao método monocromático, da norma IEC, para os módulos de silício monocristalino em torno de mais ou menos 2%, o que representa uma variação ligeiramente menor do que a incerteza de medição da corrente, 5% para os módulos de silício policristalino (mais acentuada nas regiões da radiação ultravioleta e infravermelha), e mais ou menos 2% para o silício amorfo.

3.3 OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS ESPECTRAIS DAS DIFERENTES TECNOLOGIAS UTILIZADAS NA DISSERTAÇÃO

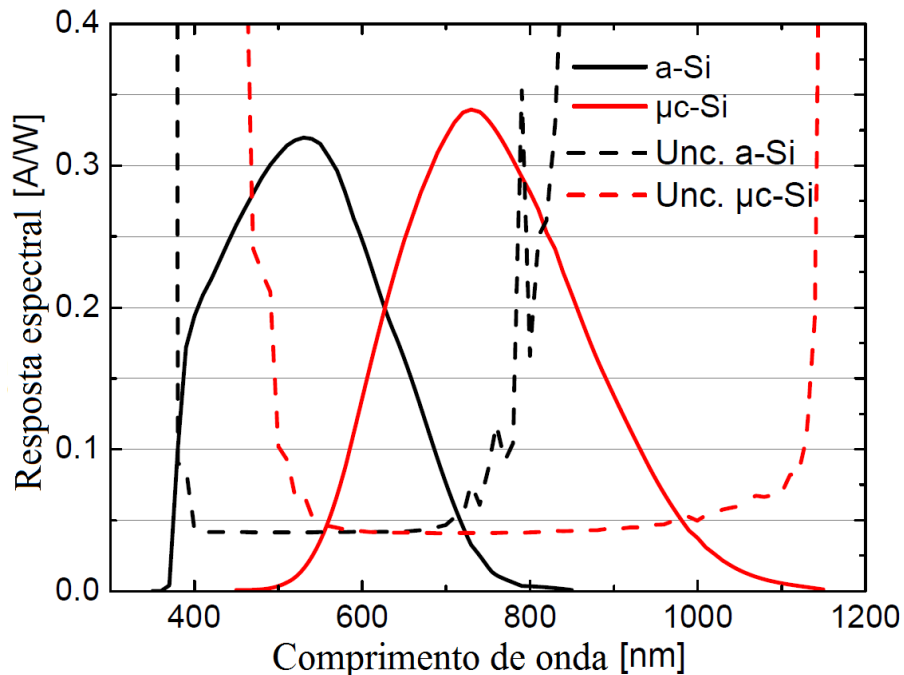
As respostas espectrais utilizadas neste trabalho são oriundas de ensaios realizados pelo maior instituto de pesquisa solar da Europa com sede em *Freiburg* – Alemanha (*Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*) de onde foi possível obter tanto os gráficos (figuras 22 e 23) quanto os valores da corrente de curto-circuito para a composição das respostas espectrais das diferentes tecnologias de fabricação de módulos fotovoltaicos. A unidade de media da resposta espectral é o ampére por watt incidente em um metro quadrado de célula, compreendendo toda a faixa de comprimento de onda que é absorvida pelo dispositivo gerador ($A/Wm^{-2}.nm^{-1}$).

Figura 22: Resposta espectral das principais tecnologias de fabricação de células solares fotovoltaicas.



Fonte: (*Fraunhofer ISE CalLab PV Cells, 2015*)

Figura 23: Resposta espectral das tecnologias de silício amorfo (a-Si) e silício microcristalino ($\mu\text{c-Si}$).



Fonte: (SEIFERT, EBINGER, & WARTA, 2011)

Os gráficos fornecidos pela *Fraunhofer ISE CalLab PV Cell* foram inseridos no *software Grapher* versão 4, fornecido pela *Golden Softwares inc.*, onde após os eixos serem referenciados, foram marcados diversos pontos sobre a curva, sendo que o software determina as coordenadas de cada um dos pontos, convertendo a imagem em um arquivo contendo todas as coordenadas digitalizadas. Dessa forma, obteve-se um conjunto de mais de seiscentos (600) pontos que representam de forma fidedigna a curva da resposta espectral da célula de silício monocristalino (c-Si) e para a célula de silício policristalino (mc-Si). Para a célula de silício amorfo (a-Si), foram gerados mais de quatrocentos (400) pontos para reproduzir a curva de resposta espectral.

Foi realizada uma tentativa de criação de equações que representassem as curvas das respostas espectrais para as três tecnologias, inserindo-se os dados obtidos pela digitalização no *software MathLab*. Foram realizadas várias iterações com polinômios até a vigésima ordem, porém as equações geradas não eram representativas quando comparadas aos gráficos fornecidos pela *Fraunhofer ISE*.

Devido aos fatores intrínsecos dos materiais de fabricação das células fotovoltaicas, fatores de recombinação e difusão da junção PN, as curvas apresentam várias mudanças de declividade em seu traçado, para tanto, optou-se por dividir as curvas de resposta espectral das células de silício mono e policristalino em quatro faixas, de acordo com a declividade de cada trecho, sendo que essas faixas compreendem:

- De 280 a 450 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(c-Si)_1 = A_{11}.\lambda^4 + B_{11}.\lambda^3 + C_{11}.\lambda^2 + D_{11}.\lambda + E_{11} \quad (1.15)$$

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(mc-Si)_1 = A_{21}.\lambda^4 + B_{21}.\lambda^3 + C_{21}.\lambda^2 + D_{21}.\lambda + E_{21} \quad (1.16)$$

- De 450 a 750 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(c-Si)_2 = A_{12}.\lambda^3 + B_{12}.\lambda^2 + C_{12}.\lambda + D_{12} \quad (1.17)$$

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(mc-Si)_2 = A_{22}.\lambda^3 + B_{22}.\lambda^2 + C_{22}.\lambda + D_{22} \quad (1.18)$$

- De 750 a 1050 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(c-Si)_3 = A_{13}.\lambda^4 + B_{13}.\lambda^3 + C_{13}.\lambda^2 + D_{13}.\lambda + E_{13} \quad (1.19)$$

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(mc-Si)_3 = A_{23}.\lambda^4 + B_{23}.\lambda^3 + C_{23}.\lambda^2 + D_{23}.\lambda + E_{23} \quad (1.20)$$

- De 1050 a 1200 nm.

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(c-Si)_4 = A_{14}.\lambda^3 + B_{14}.\lambda^2 + C_{14}.\lambda + D_{14} \quad (1.21)$$

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(mc-Si)_4 = A_{24}.\lambda^3 + B_{24}.\lambda^2 + C_{24}.\lambda + D_{24} \quad (1.22)$$

Para as células de silício amorfo, foi necessário gerar seis equações para que a curva obtida através das equações coincidissem com a curva experimental fornecida pela *Fraunhofer*.

- De 346,5 a 371 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(a-Si)_1 = A_{31}.\lambda^6 + B_{31}.\lambda^5 + C_{31}.\lambda^4 + D_{31}.\lambda^3 + E_{31}.\lambda^2 + F_{31}.\lambda + G_{31} \quad (1.23)$$

- De 371 a 394 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(a-Si)_2 = A_{32}.\lambda^5 + B_{32}.\lambda^4 + C_{32}.\lambda^3 + D_{32}.\lambda^2 + E_{32}.\lambda + F_{32} \quad (1.24)$$

- De 394 a 676 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(a-Si)_3 = A_{33}.\lambda^6 + B_{33}.\lambda^5 + C_{33}.\lambda^4 + D_{33}.\lambda^3 + E_{33}.\lambda^2 + F_{33}.\lambda + G_{33} \quad (1.25)$$

- De 676 a 742 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(a-Si)_4 = A_{34}.\lambda^5 + B_{34}.\lambda^4 + C_{34}.\lambda^3 + D_{34}.\lambda^2 + E_{34}.\lambda + F_{34} \quad (1.26)$$

- De 742 a 844 nm;

$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(a-Si)_5 = A_{35}.\lambda^6 + B_{35}.\lambda^5 + C_{35}.\lambda^4 + D_{35}.\lambda^3 + E_{35}.\lambda^2 + F_{35}.\lambda + G_{35} \quad (1.27)$$

- De 844 a 854 nm.

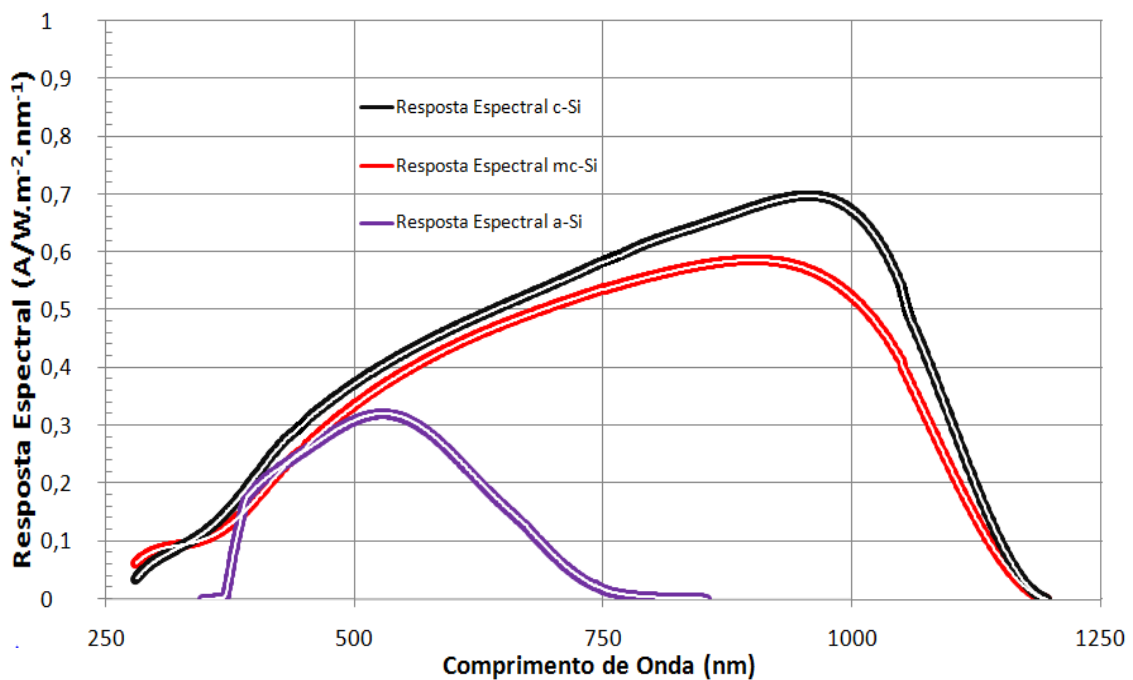
$$A/W.m^{-2}.nm^{-1}(a-Si)_6 = A_{36}.\lambda^3 + B_{36}.\lambda^2 + C_{36}.\lambda + D_{36} \quad (1.28)$$

As constantes das equações que representam o comportamento das respostas espectrais ((1.15) a (1.28)) encontram-se no ANEXO A.

O início da análise em 280 nm deve-se ao fato de que o espectro da radiação solar tem início a partir desse comprimento de onda, não sendo relevante qualquer absorção de radiação abaixo desse limite. O limite superior da análise representa o final da faixa de capacidade de absorção da melhor tecnologia monojunção dentre as três principais analisadas.

Ao dividir os dados das tecnologias de silício mono e policristalino em quatro faixas, foram obtidas quatro equações para cada um dos dois tipos de célula fotovoltaica, (1.15), (1.16), (1.17), (1.18), (1.19), (1.20), (1.21) e (1.22) que sobrepuseram-se perfeitamente aos gráficos recebidos pela *Fraunhofer*, figura 24. Já para as células de silício amorfo, foram geradas seis equações, (1.23), (1.24), (1.25), (1.26), (1.27) e (1.28).

Figura 24: Sobreposição dos gráficos fornecidos pela Fraunhofer e o traçado gerado a partir das equações.



Fonte: Próprio autor.

Após a determinação das equações das respostas espectrais das três principais tecnologias de conversão fotovoltaica, foram gerados valores para as respostas espectrais nos mesmos comprimentos de ondas do espectro padrão relacionados na norma IEC 60904-3. O intuito da criação para esses determinados comprimentos de onda é para que seja possível a comparação direta entre as respostas espectrais dos dispositivos em questão sob a incidência de radiação solar padrão e a média dos espectros solares mensais que foram criados através da utilização do *software* SMARTS 2.9.2 (*Simple Modelo of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*). Mesmo *software* utilizado pela IEC para criação do espectro padrão.

Através da multiplicação das respostas espectrais pela irradiância espectral, tanto para o espectro padrão como para os espectros gerados para a cidade de Farroupilha, é possível determinar as respostas, no que diz respeito à corrente de curto-circuito (I_{cc}), para cada uma das tecnologias nas diferentes condições de irradiância e irradiância. E através da multiplicação das respostas espectrais pelas irradiâncias espectrais normalizadas em 1000 W/m^2 , é possível determinar uma variação na eficiência de conversão dessas tecnologias sob as diferentes composições espectrais ao longo do ano (Farroupilha).

3.4 GERAÇÃO DOS ESPECTROS SOLARES MÉDIOS MENSAIS

A obtenção do espectro solar da irradiância global incidente sobre uma determinada região é possível através da utilização de um aparelho conhecido como espectrorradiômetro. Esse aparelho mede as variações diárias da irradiância, sendo possível determinar assim um comportamento médio diário, mensal e anual para os mesmos. Porém, esse equipamento é extremamente oneroso e encontrava-se indisponível para esta pesquisa. Para contornar essa dificuldade, foi utilizado o *software* SMARTS 2.9.2 (*Simple Modelo of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*), pois esse é o *software* utilizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para a criação do espectro solar padrão. Se inseridos os dados de qualidade do ar, meteorológicos e geográficos reais de uma determinada localidade, o mesmo criará o espectro incidente sobre qualquer localização territorial do globo terrestre.

Para a geração de um espectro, o *software* necessita de mais de quarenta dados de entrada, alguns meteorológicos tais como: pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa, espessura da camada de ozônio, etc., e dados geográficos tais como; latitude, longitude, altura ao nível do mar, etc. Fazia-se então necessário a obtenção de dados provenientes de medições realizadas por instituições reconhecidas por seus trabalhos de monitoramento atmosférico. Dessa forma, foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), aproximadamente todos os dados atmosféricos necessários para a

criação do espectro, sendo que alguns poucos dados faltantes foram obtidos através de contato com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram solicitados a esses institutos de pesquisas e monitoramentos as médias mensais dos dados necessários desde o ano de 2000 até 2014, compreendendo um período de quinze anos de dados (Anexos C e D).

Os arquivos foram enviados no formato de texto (.txt), os quais foram convertidos para uma planilha eletrônica (.xls) para que fosse possível uma análise estatística. Os dados foram divididos mensalmente, todos os dados de janeiro em uma planilha, fevereiro em outra e assim por diante. Sendo que, como resultado final, obteve-se todas as médias mensais (15 anos) de todos os dados necessários para a geração do espectro solar pelo *software* SMARTS.

Analisando cada um dos dados meteorológicos e atmosféricos separadamente, constatou-se diferenças percentuais muito baixas para o desvio padrão e variância em relação à média dos dados tabulados em planilha eletrônica, o que explica a utilização da média aritmética dos quinze valores em detrimento de uma análise Gaussiana.

Ao ingressar no *software* com todos os dados referentes a cada mês do ano (Anexo B), foram gerados doze espectros solares, um para cada mês, com suas referidas densidades de potência e nos mesmos comprimentos de ondas que o espectro padrão fornecido pela norma, o que facilita a comparação direta entre esses doze espectros e o de referência (G173). O *software* SMARTS disponibiliza o acesso aos dados dos espectros na forma de um arquivo de texto (.txt). Quando convertido em planilha eletrônica (.xls), torna-se fácil a manipulação de seus valores de irradiação global para cada comprimento de onda. Ao inserir os dados dos espectros médios de cada mês, foi possível determinar sua variação ao longo do ano e ao adicionar o espectro de referência nessas planilhas eletrônicas, foi possível comparar a irradiância de cada mês em relação ao espectro padrão.

Na comparação direta entre o espectro padrão definido na norma ASTM G173-03 e os espectros médios mensais, fica evidente uma maior disponibilidade de energia por metro quadrado para todos os meses do ano na cidade de Farroupilha, o que resulta em uma disponibilidade média anual de aproximadamente 3,86% superior à irradiância anual sob as condições do espectro padrão, como pode ser visto na tabela 1.

Foram realizadas várias iterações no *software* SMARTS variando-se um valor dentre seus dados de entrada por cada iteração, onde ficou evidente que o principal parâmetro que justifica esse aumento na irradiância é a diminuição da massa de ar calculada para a região, equação (1.29), que ficou próximo do valor de 1,2.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta) + 0,50572 \cdot (96,07995 - \theta)^{-1,6364}} \quad (1.29)$$

Onde θ representa o ângulo formado entre a inclinação dos raios solares em relação a uma linha perpendicular e imaginária denominada Zênite.

Porém, sabe-se que cada uma das tecnologias de conversão fotovoltaica apresenta uma absorção parcial para distintos comprimentos de ondas, e que possuem faixas de absorção diferentes. Logo, esse aumento na irradiância em relação aos espectros pode não influenciar significativamente uma ou outra tecnologia de fabricação de células fotovoltaicas. Para tanto, as respostas espectrais das células de silício monocristalino, policristalino e amorfo, foram multiplicadas pela média anual da irradiância do espectro padrão e por cada um dos espectros mensais de Farroupilha a fim de obterem-se as correntes de curto-circuito sob essas condições de irradiância.

Tabela1: Comparação da irradiância disponível mensalmente.

Densidade de Potência W/m ²			
Mês	ASTM	Farroupilha	Aumento em %
Janeiro	1002,877	1050,69	4,77%
Fevereiro	1002,877	1048,1	4,51%
Março	1002,877	1041,05	3,81%
Abril	1002,877	1037,14	3,42%
Mai	1002,877	1032,54	2,96%
Junho	1002,877	1029,5	2,65%
Julho	1002,877	1029,324	2,64%
Agosto	1002,877	1032,81	2,98%
Setembro	1002,877	1039,73	3,67%
Outubro	1002,877	1051,6354	4,86%
Novembro	1002,877	1051,89	4,89%
Dezembro	1002,877	1054,682	5,17%

Fonte: Próprio autor.

3.5 OBTENÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Após a criação dos espectros solares médios mensais incidentes na cidade de Farroupilha, realizou-se a multiplicação dos valores obtidos para as respostas espectrais de cada uma das tecnologias pela irradiância de cada comprimento de onda incidente, obtendo-se assim a resposta esperada das três principais tecnologias de conversão fotovoltaica sob as condições do espectro solar que atinge o solo da região. Desta forma, obtêm-se as correntes de curto-circuito dos três tipos de células, tanto nas condições do espectro padrão (Apêndice A) como para os espectros mensais. Comparando os valores das correntes de curto-circuito,

obtidas através da multiplicação das respostas espectrais das células, verifica-se um aumento da mesma sob as condições do espectro de Farroupilha para todos os meses do ano, conforme tabela 2. Verifica-se uma grande variação percentual entre as tecnologias. Enquanto a célula de silício monocristalino possui um aumento de somente 0,96% sob a irradiância de janeiro, em Farroupilha, a célula de silício amorfo apresenta um aumento de 8,02% no mesmo período. Ambas comparadas com suas próprias correntes de curto-circuito sob as condições do espectro padrão. Essa variação irregular do rendimento entre as três principais tecnologias do mercado demonstra que, além de um aumento na irradiância por metro quadrado, também apresenta um desvio de potência para determinados comprimentos de onda, o que influi diretamente no rendimento de conversão dos módulos fotovoltaicos.

Tabela2: Aumento percentual da corrente de curto-circuito sob a irradiação média mensal de Farroupilha em detrimento à utilização do espectro padrão.

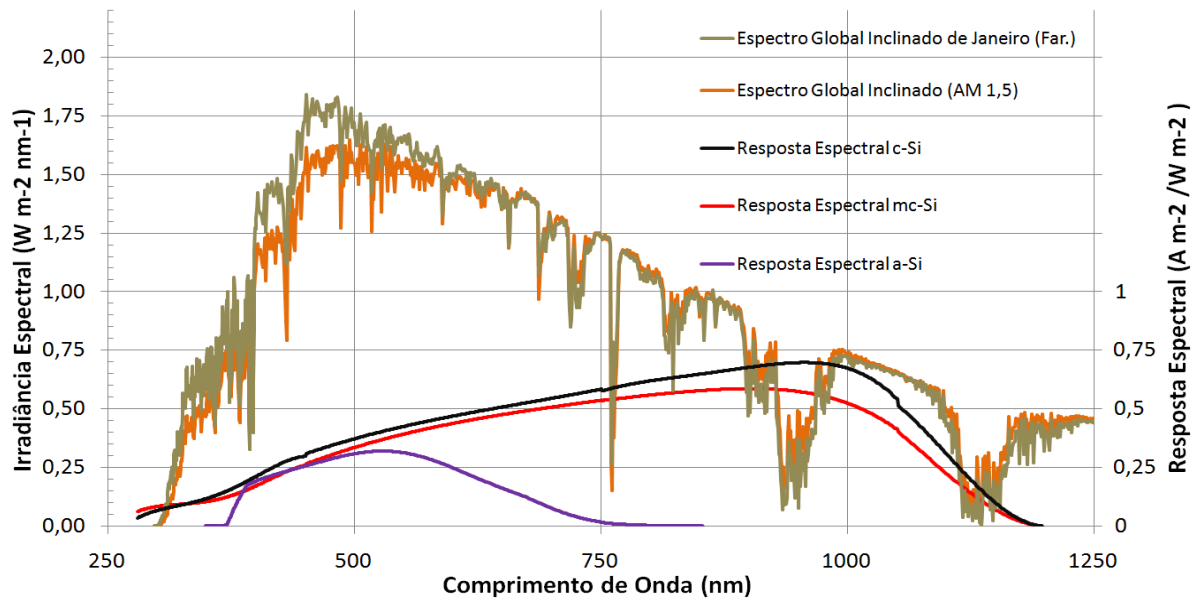
Porcentagem do aumento da I_{cc}			
	c-Si	mc-Si	a-Si
Janeiro	2,84%	2,89%	8,11%
Fevereiro	2,62%	2,69%	8,19%
Março	2,01%	2,10%	8,21%
Abril	1,64%	1,75%	7,98%
Mai	1,23%	1,35%	7,98%
Junho	0,96%	1,09%	8,02%
Julho	0,95%	1,09%	8,08%
Agosto	1,27%	1,40%	8,22%
Setembro	1,90%	2,00%	8,30%
Outubro	2,95%	3,02%	8,50%
Novembro	2,98%	3,04%	8,53%
Dezembro	3,20%	3,24%	8,30%

Fonte: Próprio autor.

A análise da variação do rendimento para um determinado tipo de célula é realizada através da multiplicação de sua resposta espectral, visto que esta não varia por se tratar de características intrínsecas dos materiais e tecnologias de fabricação, pelas irradiâncias do espectro padrão e pela irradiância do espectro local para determinar a variação em relação ao espectro padrão. Lembrando-se que, para a determinação da variação do rendimento, esses dois espectros obrigatoriamente devem estar normalizados para 1000 W/m^2 , conforme preconiza a norma IEC 60904-3, pois dessa forma, garante-se que não haverá variação da corrente de curto-circuito devido ao aumento da densidade de potência. Se houver variação, é porque houve uma “migração” de potência entre alguns comprimentos de ondas.

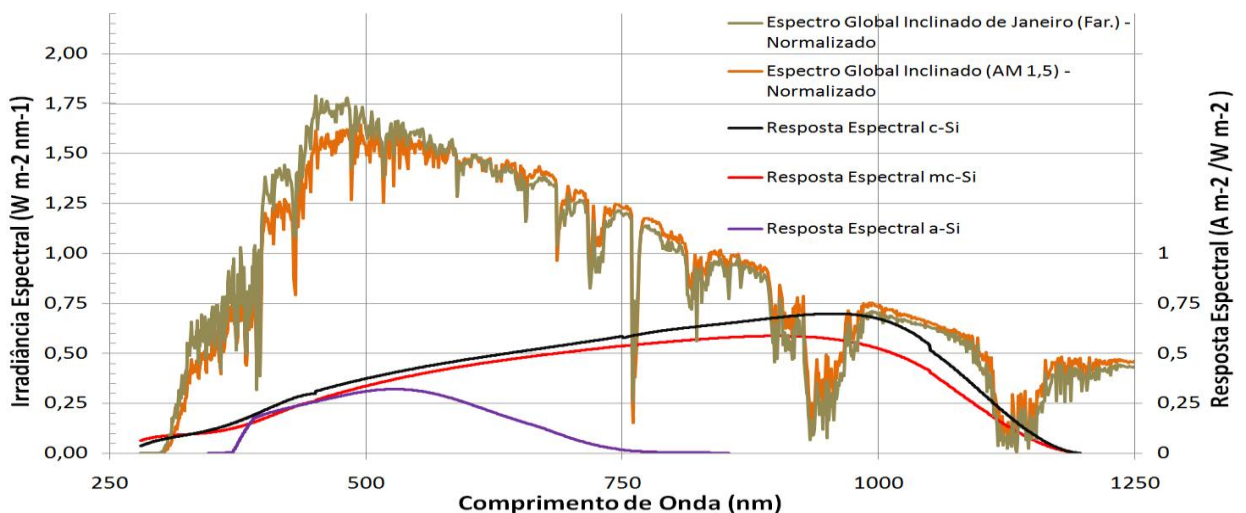
Para janeiro, a maior disponibilidade de densidade de potência do espectro de Farroupilha garante um aumento de 2,84% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,84% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 2,89% com uma diminuição no rendimento de 1,79% e para o a-Si um aumento de 8,11% na I_{cc} seguida de um aumento de 3,19% no seu rendimento (figuras 25 e 26).

Figura 25: Comparação da irradiância em janeiro e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

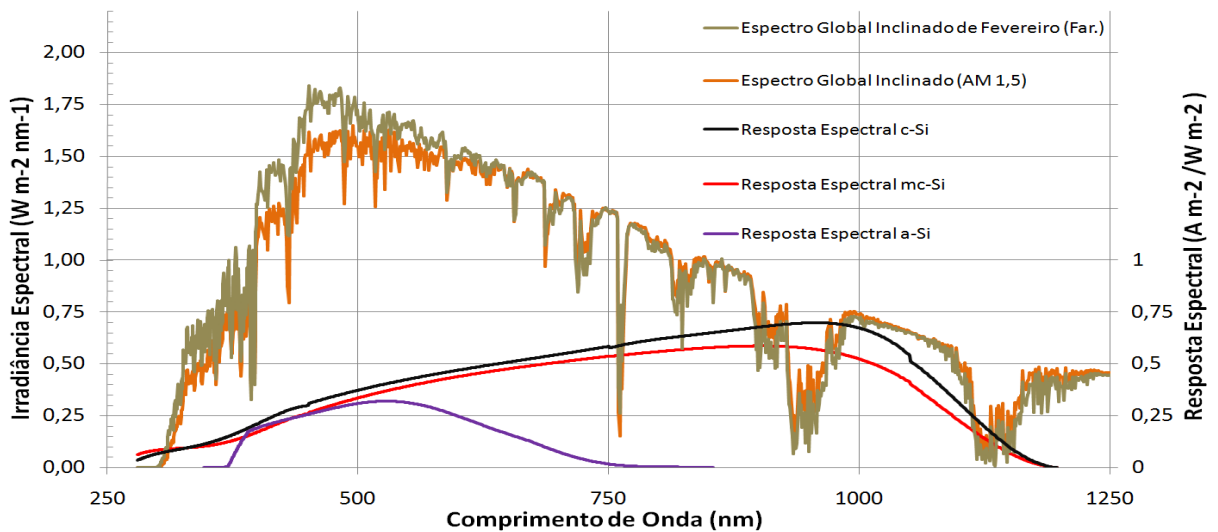
Figura 26: Constatação do desvio de potência no espectro de janeiro em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

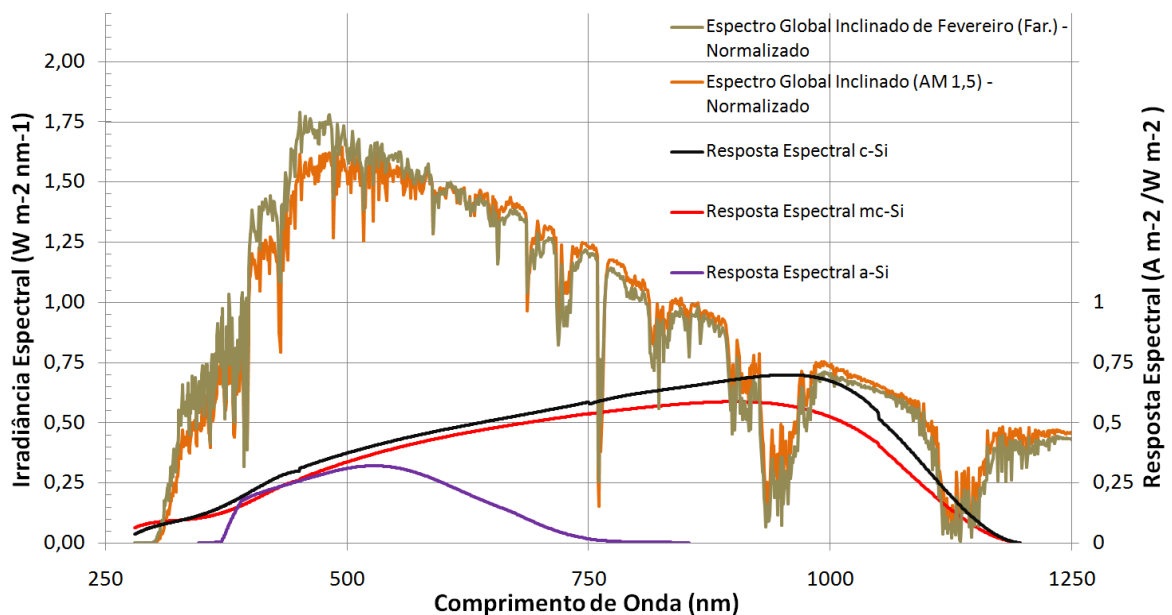
Para fevereiro, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 2,62% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,81% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 2,69% com uma diminuição no rendimento de 1,74% e para o a-Si, um aumento de 8,19% na I_{cc} seguida de um aumento de 3,52% no seu rendimento (figuras 27 e 28).

Figura 27: Comparação da irradiância em fevereiro e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

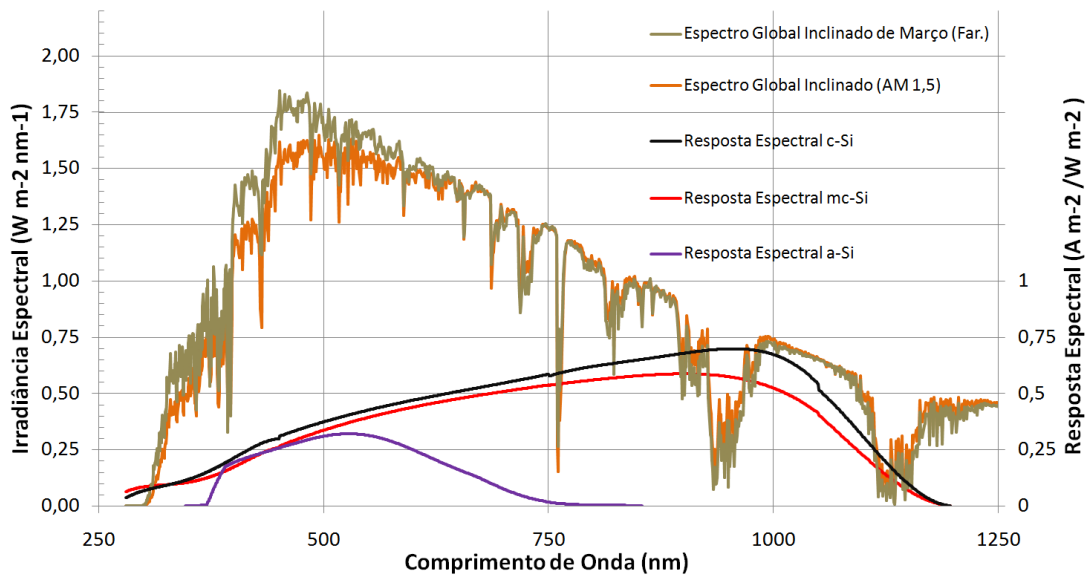
Figura 28: Constatação do desvio de potência no espectro de fevereiro em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

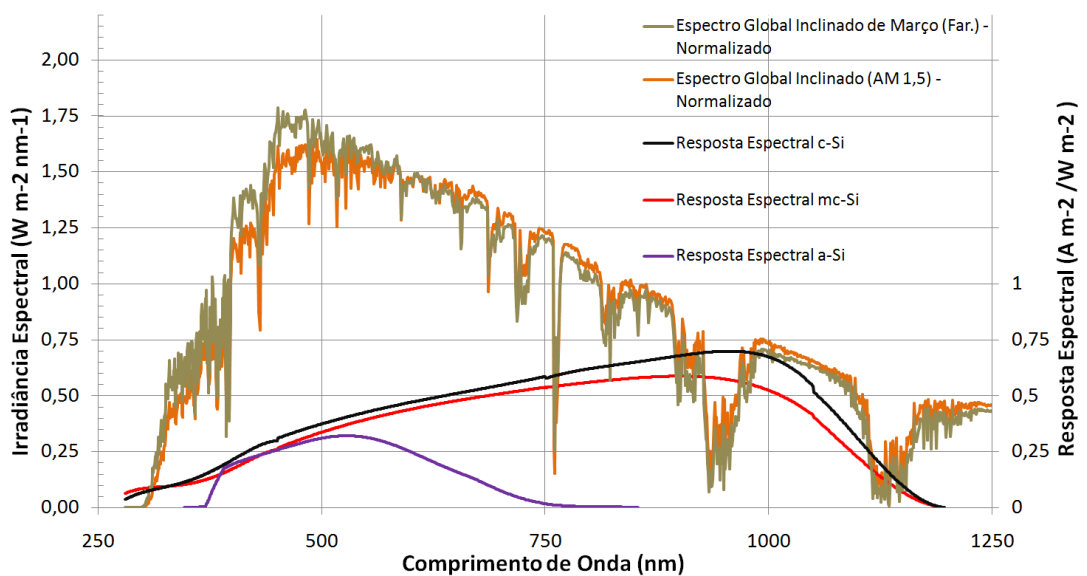
Para março, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 2,01% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,73% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 2,1% com uma diminuição no rendimento de 1,64% e para o a-Si um aumento de 8,21% na I_{cc} seguida de um aumento de 4,24% no seu rendimento (figuras 29 e 30).

Figura 29: Comparação da irradiância em março e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

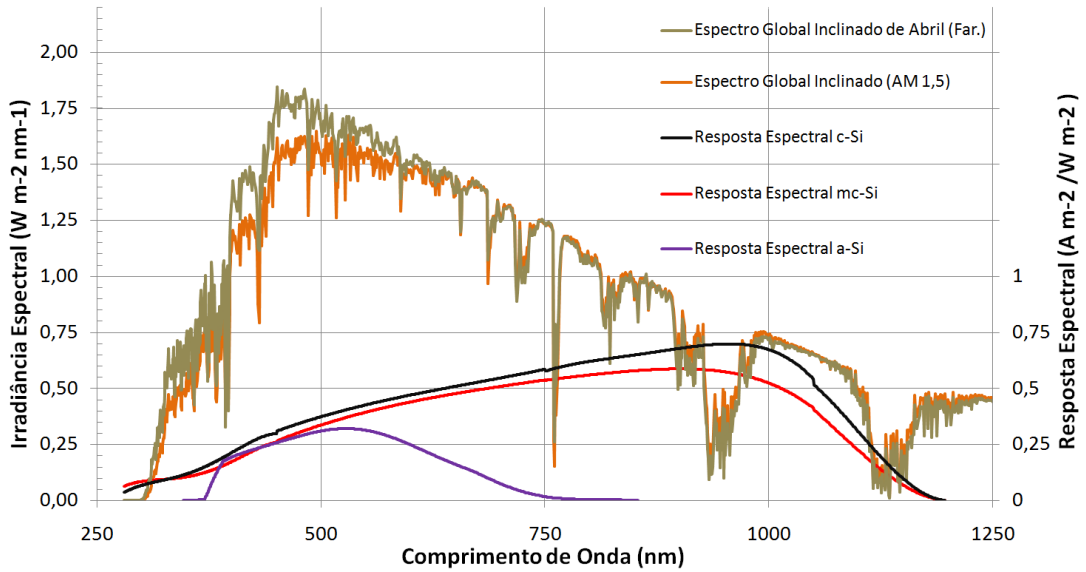
Figura 30: Constatação do desvio de potência no espectro de março em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

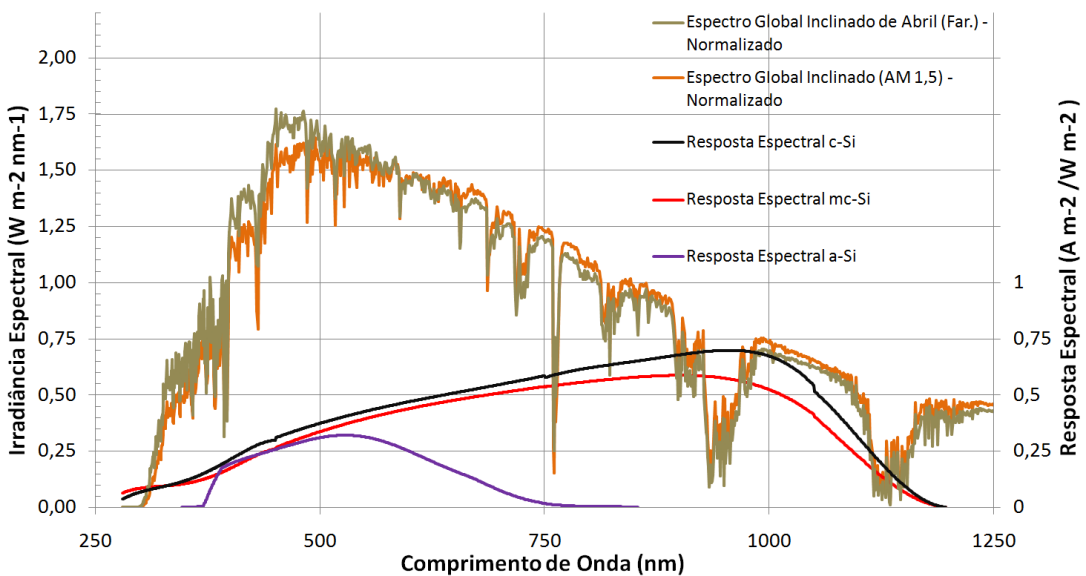
Para abril, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 1,64% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,72% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 1,75% com uma diminuição no rendimento de 1,62% e para o a-Si, um aumento de 7,98% na I_{cc} seguida de um aumento de 4,42% no seu rendimento (figuras 31 e 32).

Figura 31: Comparação da irradiância em abril e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

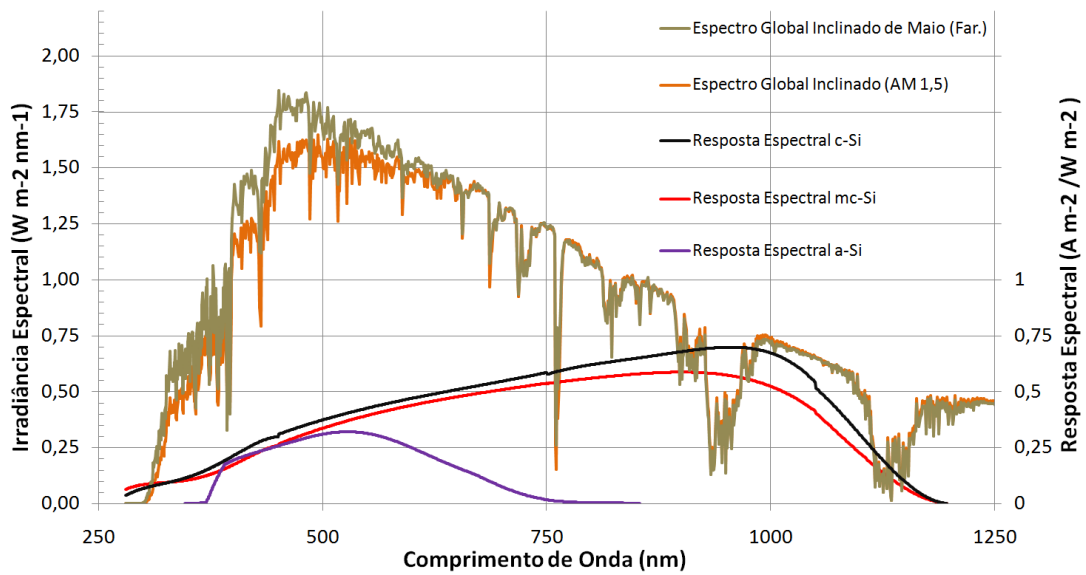
Figura 32: Constatação do desvio de potência no espectro de abril em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

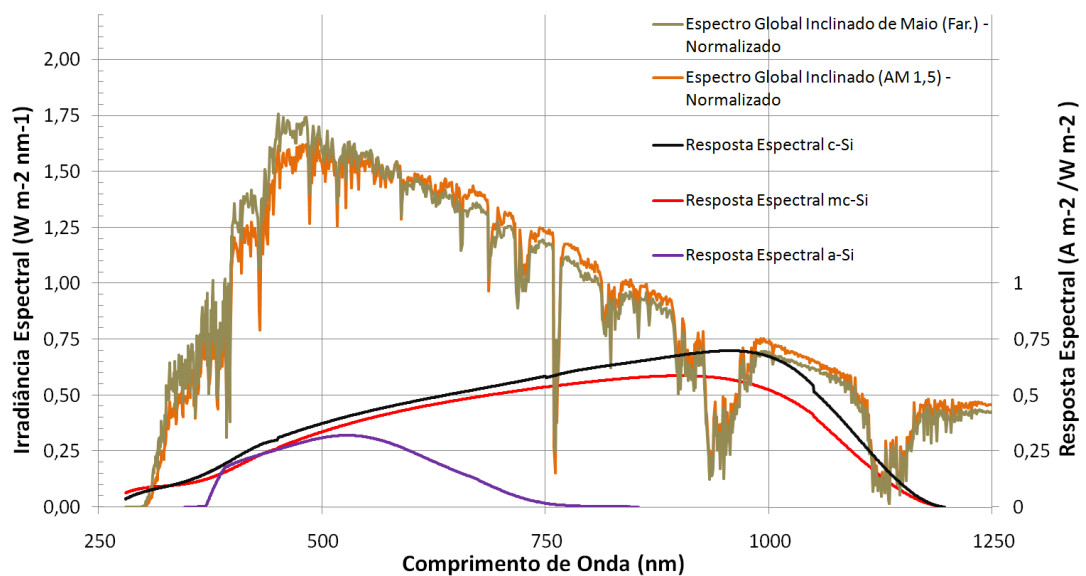
Para maio, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 1,23% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,68% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 1,35% com uma diminuição no rendimento de 1,56% e para o a-Si, um aumento de 7,98% na I_{cc} seguida de um aumento de 4,88% no seu rendimento (figuras 33 e 34).

Figura 33: Comparação da irradiância em maio e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

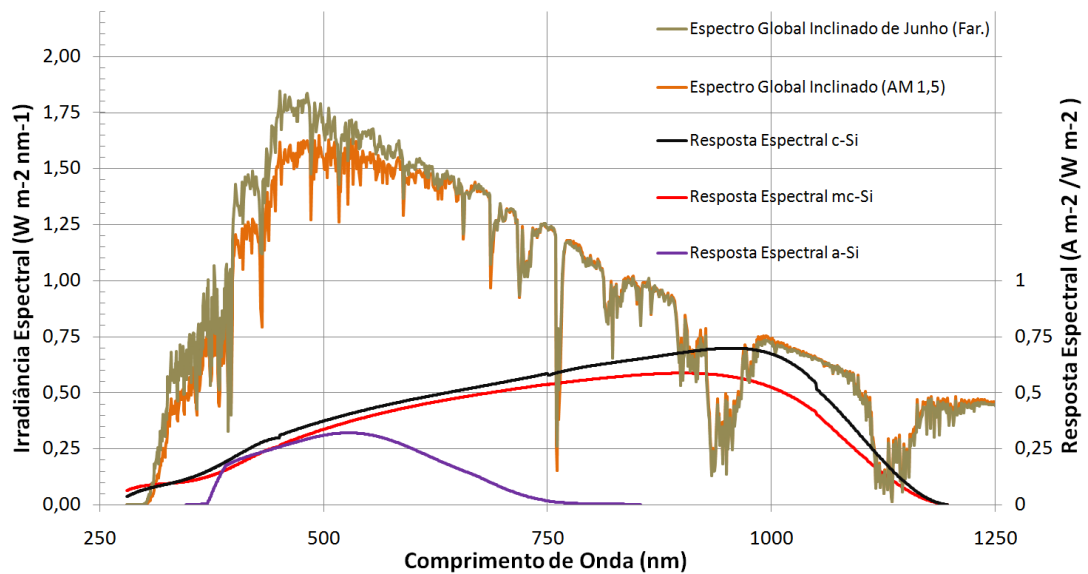
Figura 34: Constatação do desvio de potência no espectro de maio em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

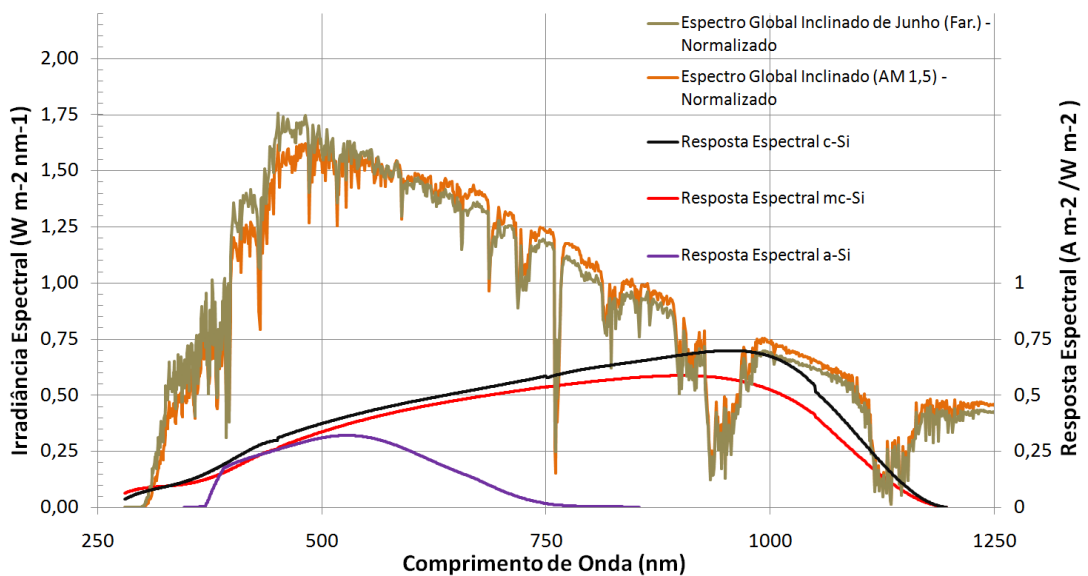
Para junho, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 0,96% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,65% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 1,09% com uma diminuição no rendimento de 1,52% e para o a-Si, um aumento de 8,02% na I_{cc} seguida de um aumento de 5,22% no seu rendimento (figuras 35 e 36).

Figura 35: Comparação da irradiância em junho e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

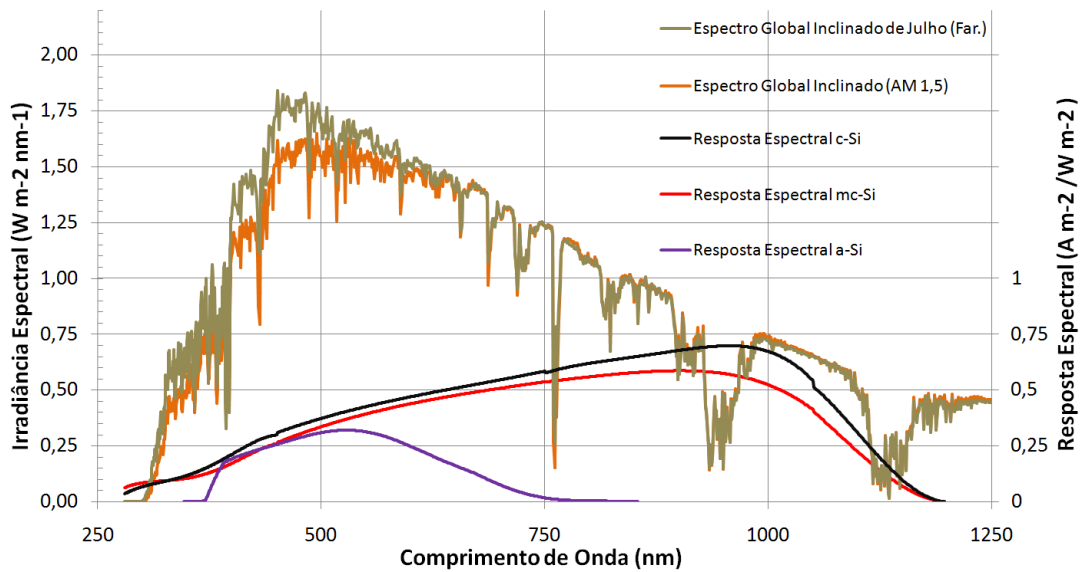
Figura 36: Constatação do desvio de potência no espectro de junho em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

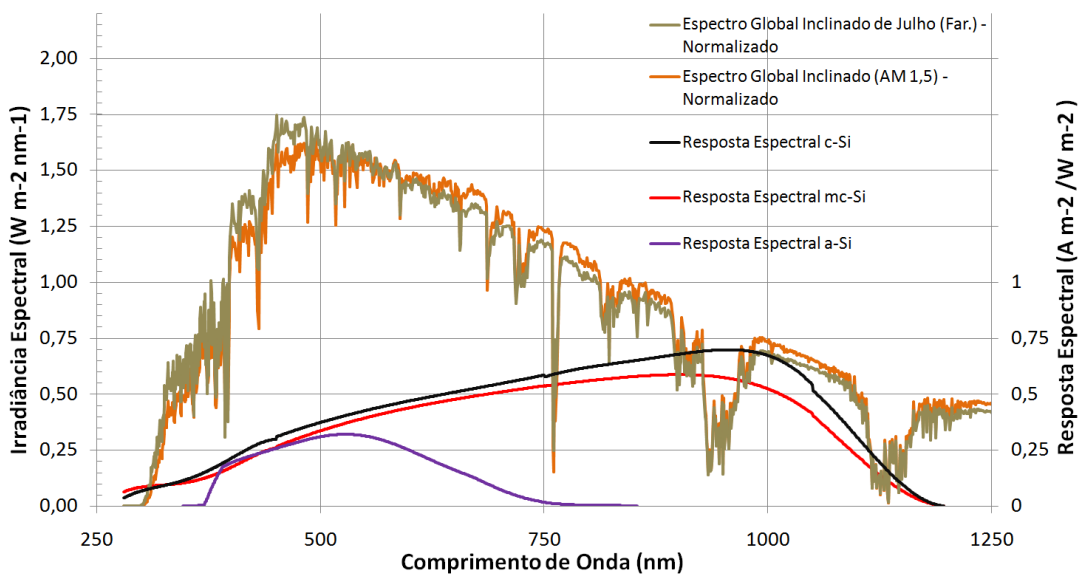
Para julho, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 0,95% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,65% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 1,09% com uma diminuição no rendimento de 1,51% e para o a-Si, um aumento de 8,08% na I_{cc} seguida de um aumento de 5,3% no seu rendimento (figuras 37 e 38).

Figura 37: Comparação da irradiância em julho e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

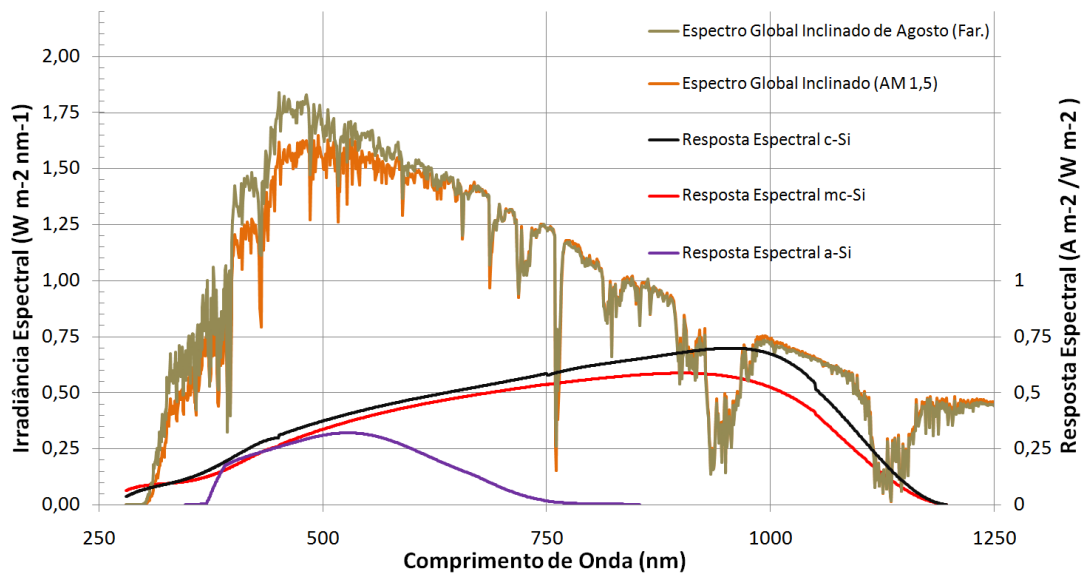
Figura 38: Constatação do desvio de potência no espectro de julho em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

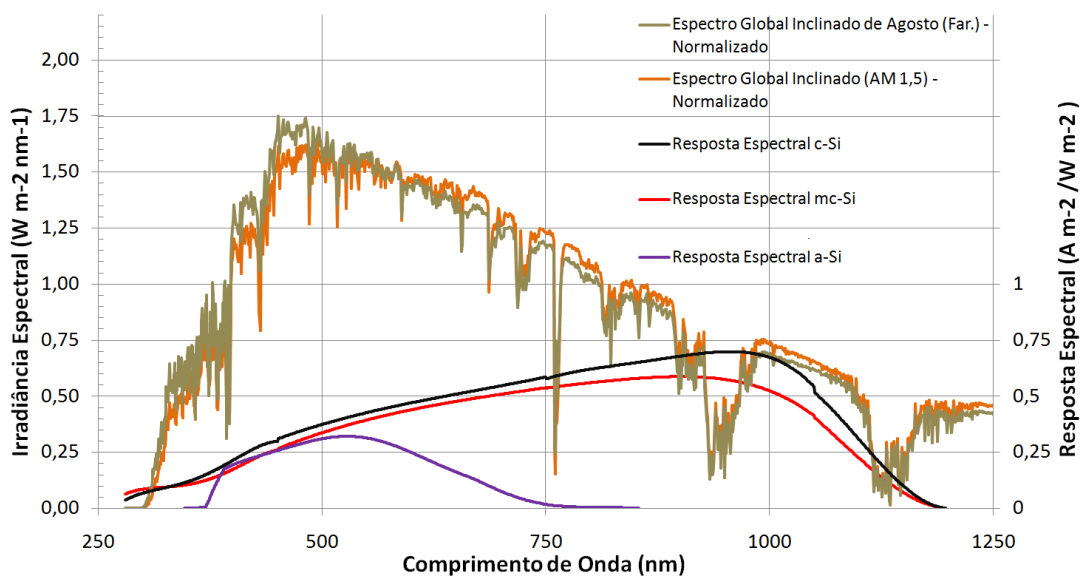
Para agosto, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 1,27% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,66% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 1,4% com uma diminuição no rendimento de 1,54% e para o a-Si um aumento de 8,22% na I_{cc} seguida de um aumento de 5,09% no seu rendimento (figuras 39 e 40).

Figura 39: Comparação da irradiância em agosto e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

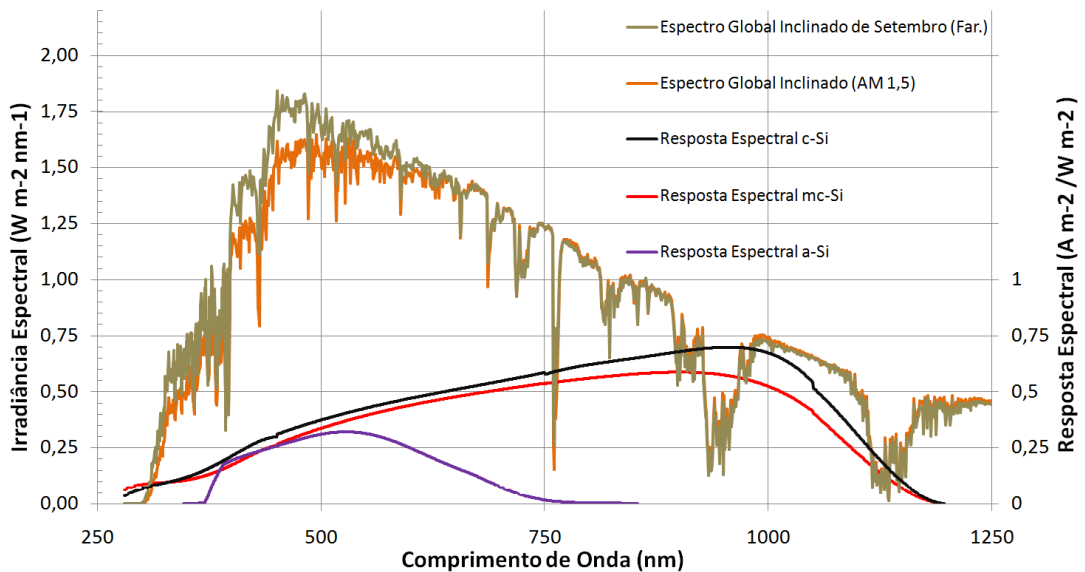
Figura 40: Constatação do desvio de potência no espectro de agosto em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

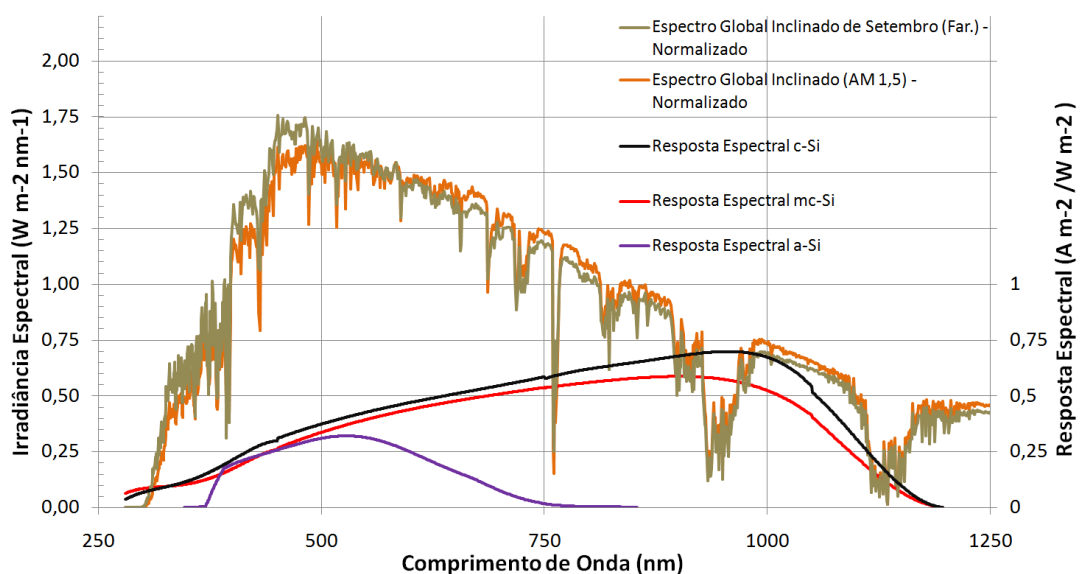
Para setembro, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 1,9% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,72% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 2% com uma diminuição no rendimento de 1,61% e para o a-Si, um aumento de 8,3% na I_{cc} seguida de um aumento de 4,46% no seu rendimento (figuras 41 e 42).

Figura 41: Comparação da irradiância em setembro e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

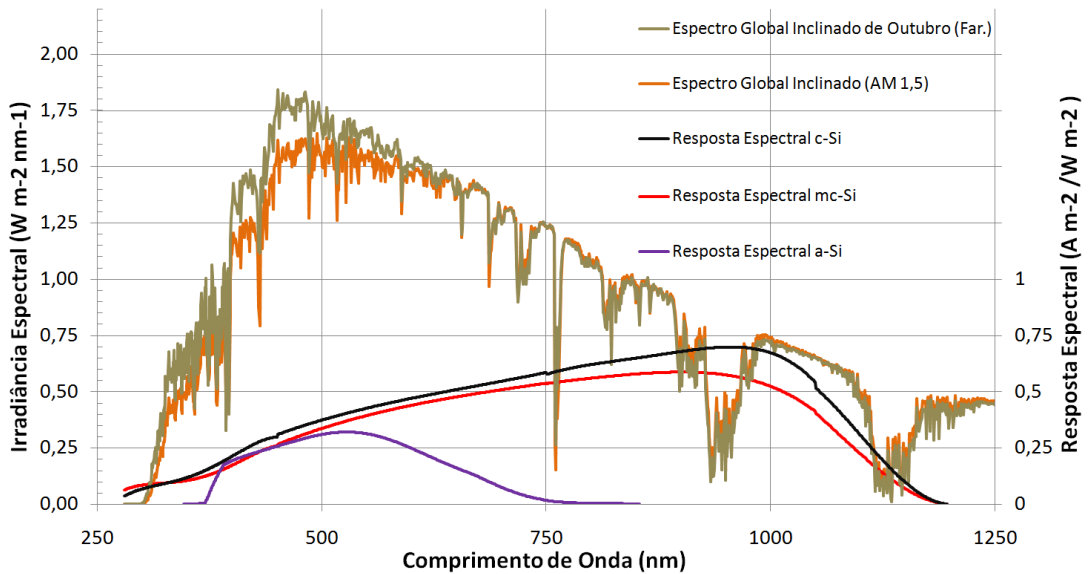
Figura 42: Constatação do desvio de potência no espectro de setembro em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

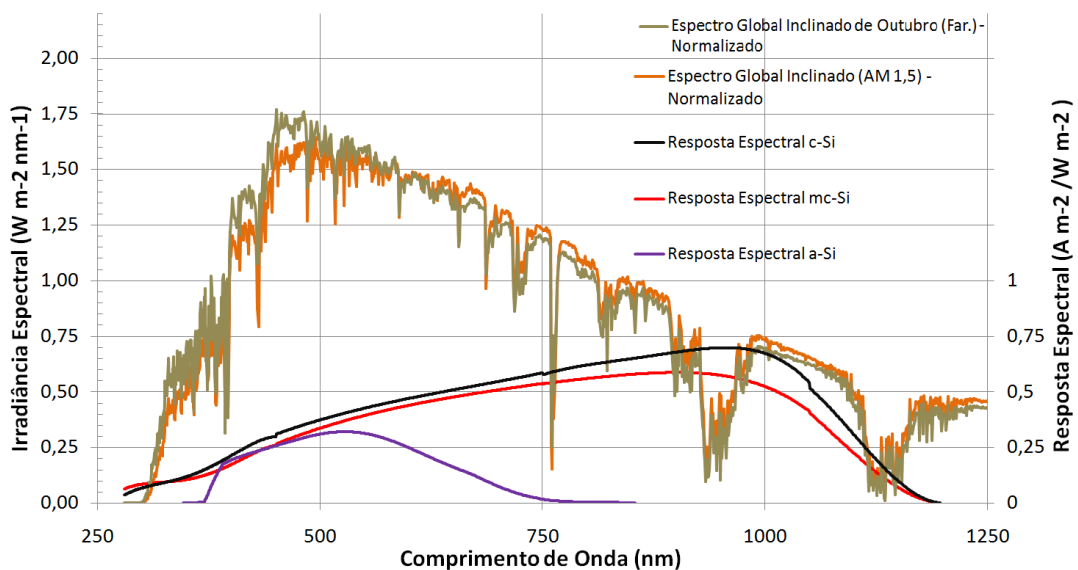
Para outubro, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 2,95% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,82% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 3,02% com uma diminuição no rendimento de 1,76% e para o a-Si, um aumento de 8,5% na I_{cc} seguida de um aumento de 3,47% no seu rendimento (figuras 43 e 44).

Figura 43: Comparação da irradiância em outubro e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

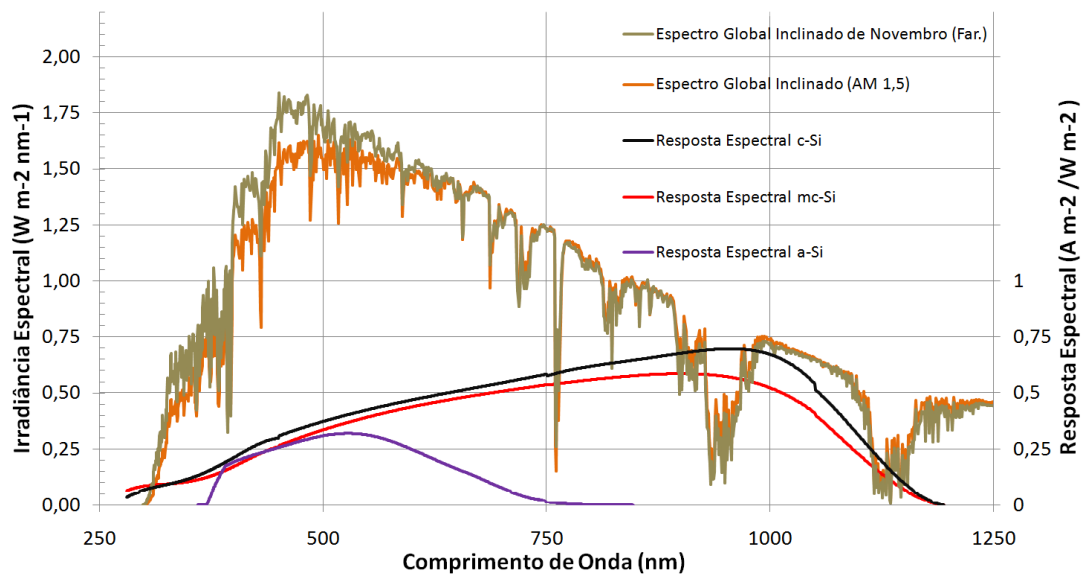
Figura 44: Constatação do desvio de potência no espectro de outubro em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

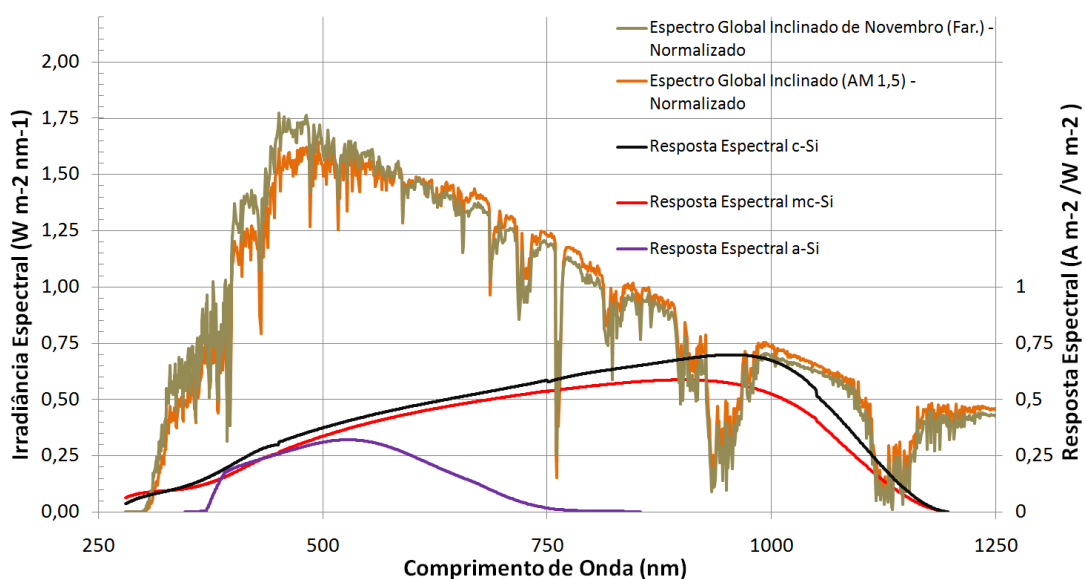
Para novembro, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 2,98% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,82% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 3,04% com uma diminuição no rendimento de 1,76% e para o a-Si, um aumento de 8,53% na I_{cc} seguida de um aumento de 3,47% no seu rendimento (figuras 45 e 46).

Figura 45: Comparação da irradiância em novembro e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

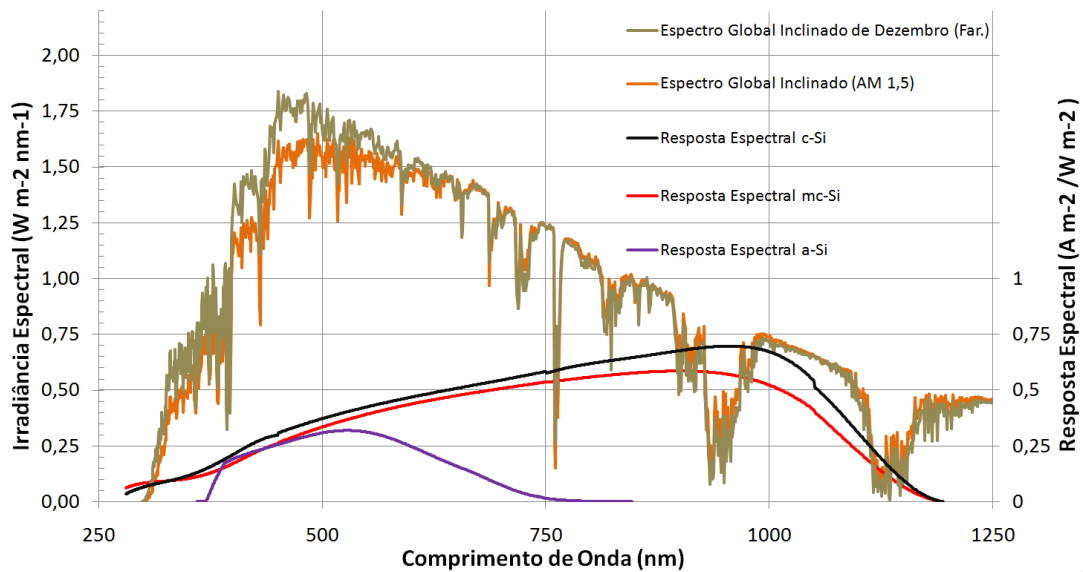
Figura 46: Constatação do desvio de potência no espectro de novembro em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

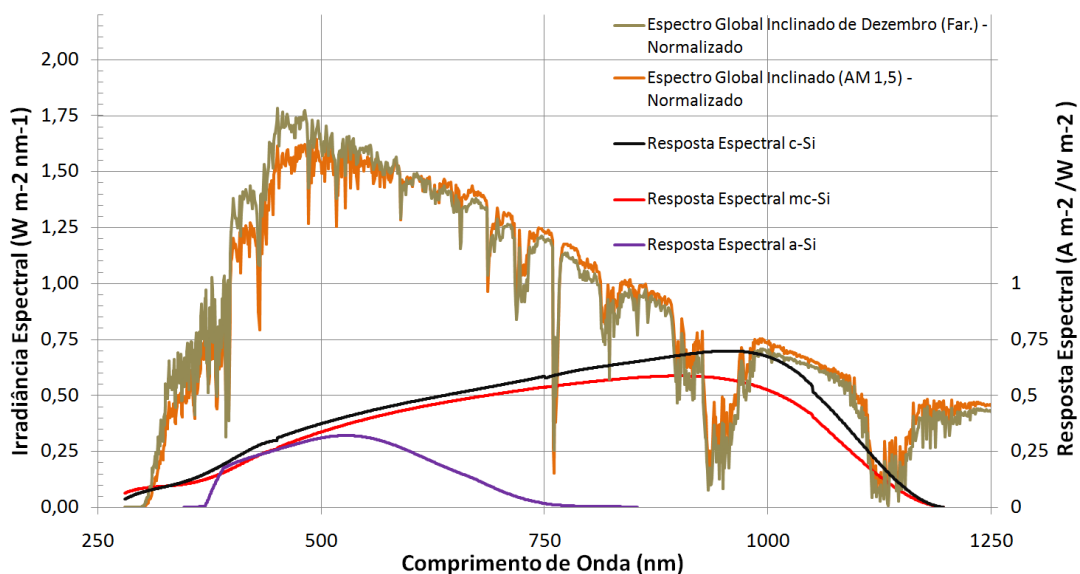
Para dezembro, a maior disponibilidade de densidade de potência no espectro de Farroupilha garante um aumento de 3,2% na I_{cc} para a célula de c-Si, mesmo seu rendimento diminuindo aproximadamente 1,87% em comparação com o espectro padrão. Para a tecnologia mc-Si, o aumento da I_{cc} é de 3,24% com uma diminuição no rendimento de 1,83% e para o a-Si, um aumento de 8,3% na I_{cc} seguida de um aumento de 2,98% no seu rendimento (figuras 47 e 48).

Figura 47: Comparação da irradiância em dezembro e ASTM G173 sobre as respostas espectrais das células de Si's.



Fonte: Próprio autor.

Figura 48: Constatação do desvio de potência no espectro de dezembro em relação ao ASTM G173 (espectros normalizados).



Fonte: Próprio autor.

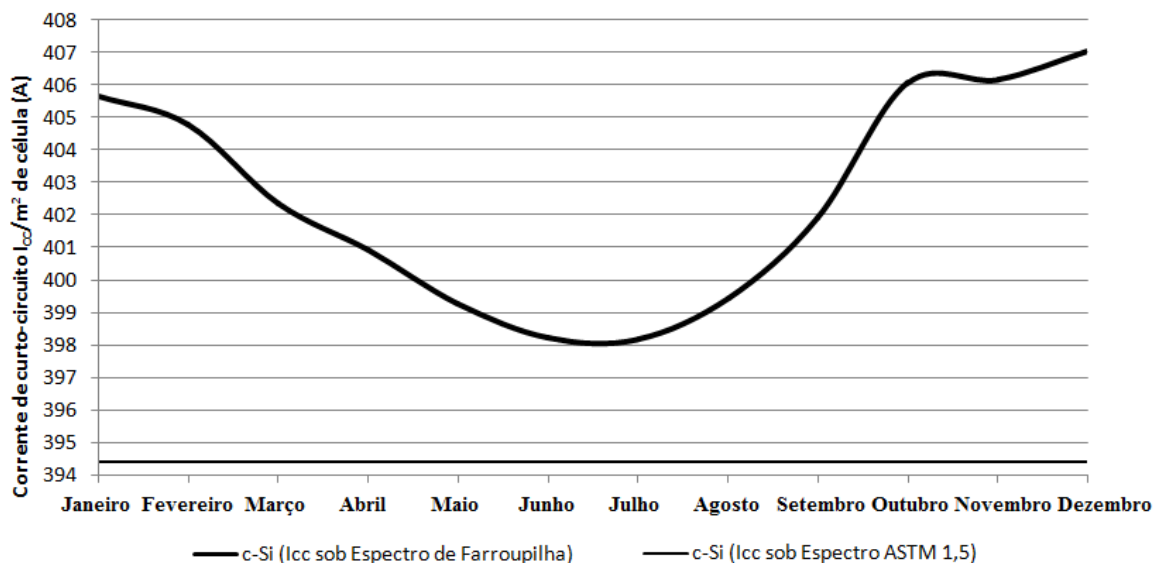
4. RESULTADOS

As correntes de curto-circuito para as três tecnologias de módulos fotovoltaicos (c-Si, mc-Si e a-Si) são obtidas através do somatório das correntes parciais calculadas através da multiplicação da resposta espectral de cada uma das tecnologias pela irradiância incidente. Essa multiplicação é realizada em intervalos de 0,5 nm de 280 à 400 nm e de 1 nm de 400 à 1200 nm, limite inferior determinado pelo início do espectro solar e superior determinado pela resposta espectral das tecnologias de silício mono e policristalino.

A determinação da corrente de curto-circuito mensal dos três módulos foi obtida pela multiplicação das respostas espectrais pelos espectros apresentados nas figuras 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45 e 47. Cada gráfico corresponde à irradiância média incidente em cada mês do ano. Os resultados evidenciam que as três tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas geram mais energia devido ao aumento da irradiância por metro quadrado.

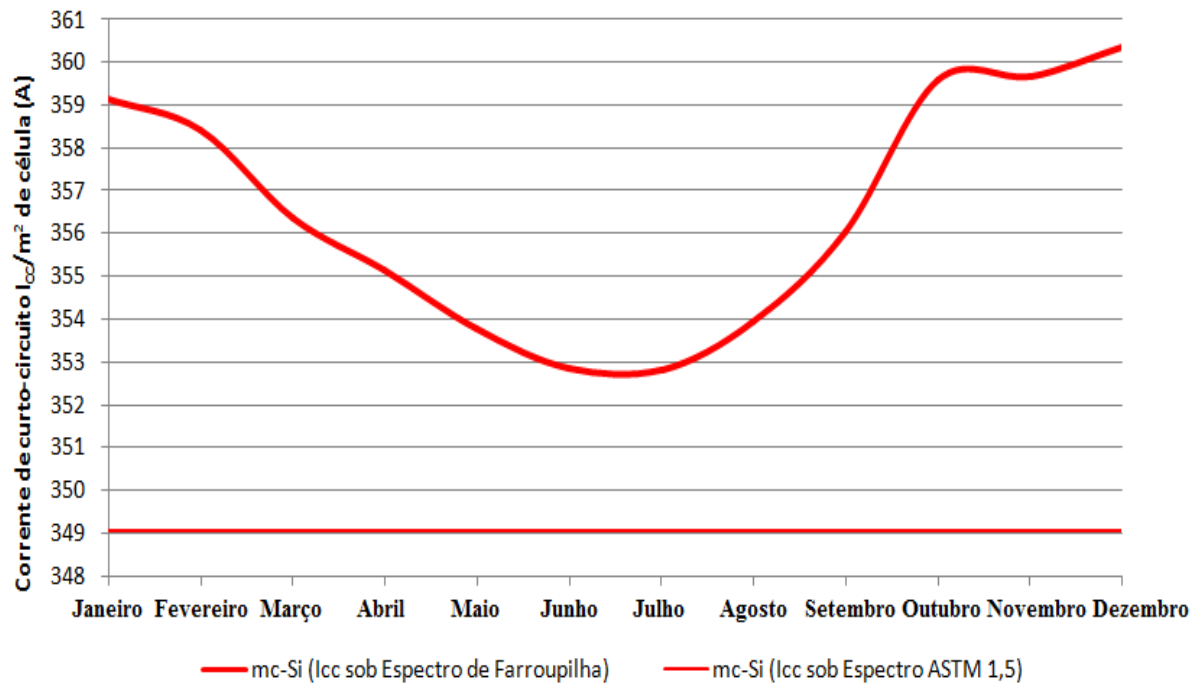
Através das representações gráficas (figuras 49, 50 e 51), pode-se verificar o aumento mensal da corrente de curto-circuito sob a irradiância média para a cidade de Farroupilha em comparação à corrente de curto-circuito sob influência do espectro padrão. Essa variação de corrente está associada, tanto ao aumento de disponibilidade de energia por metro quadrado quanto pela migração da densidade de potência que compreende os comprimentos de ondas superiores da faixa de luz visível e de toda a faixa de infravermelho para os comprimentos de ondas inferiores a 600 nm, o que causa uma distorção do espectro e consequentemente uma variação no rendimento dos módulos.

Figura 49: Representação gráfica do aumento da corrente de curto-circuito do módulo de silício monocristalino em função da maior irradiância do espectro de Farroupilha.



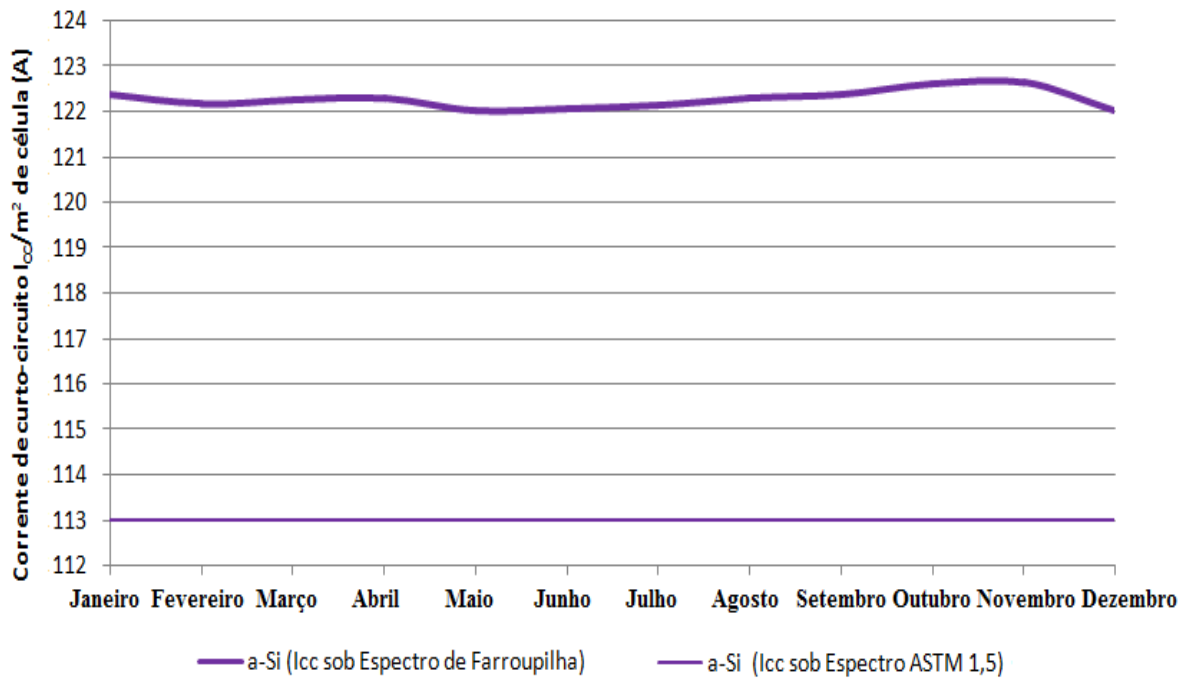
Fonte: Próprio autor.

Figura 50: Representação gráfica do aumento da corrente de curto-circuito do módulo de silício policristalino em função da maior irradiância do espectro de Farroupilha.



Fonte: Próprio autor.

Figura 51: Representação gráfica do aumento da corrente de curto-circuito do módulo de silício amorfo em função da maior irradiância do espectro de Farroupilha.



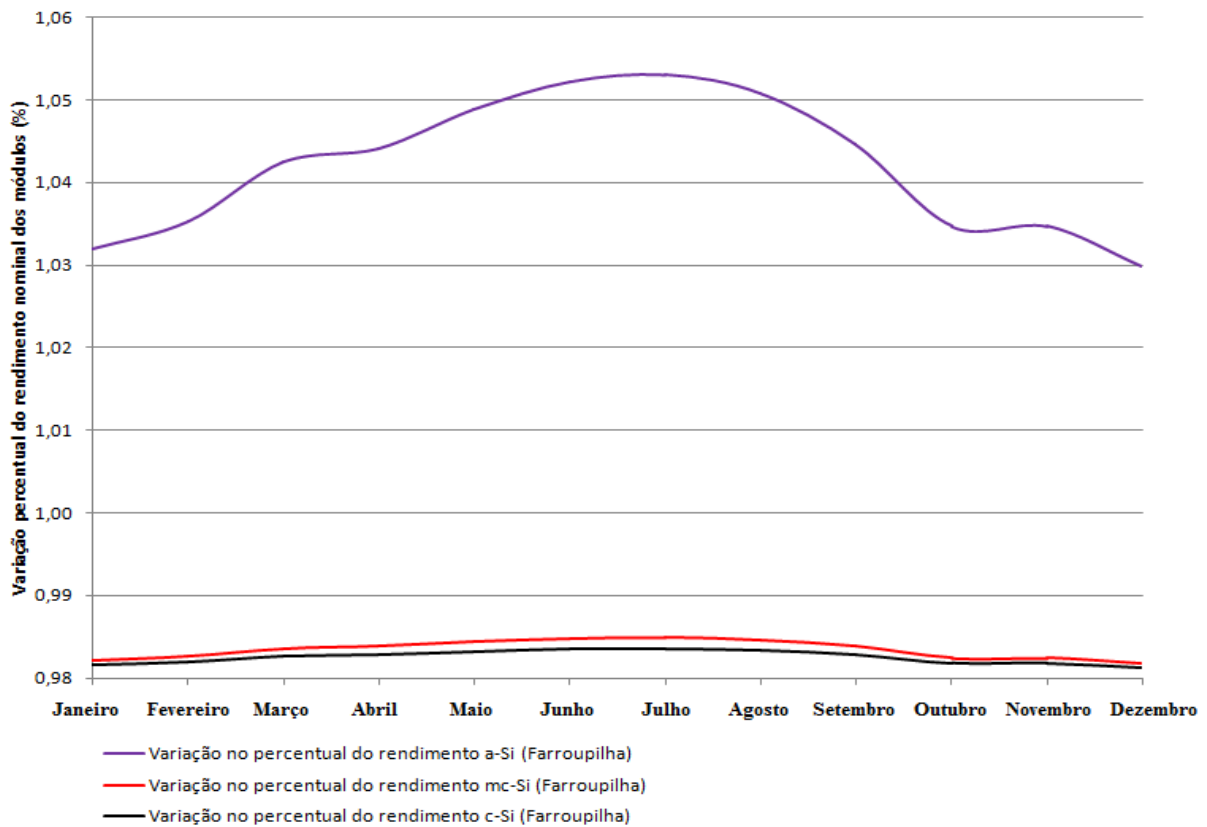
Fonte: Próprio autor.

Os valores elevados das correntes de curto-circuito nas figuras 49, 50 e 51, devem-se ao fato de ser considerado para o cálculo uma única célula de um metro quadrado de área.

A fim de determinar a variação do rendimento dos módulos, foi realizado o mesmo processo de determinação da corrente de curto-circuito, porém, desta vez, com ambos os espectros normalizados em 1000 W/m^2 . Desta forma, a diferença na disponibilidade de potência é eliminada permanecendo somente a influência da distorção do espectro solar.

Ao realizar-se a multiplicação das respostas espectrais pelos espectros normalizados (figuras 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46 e 48), foi possível determinar a variação do rendimento devido à mudança da distribuição espectral, figura 52.

Figura 52: Variação percentual do rendimento nominal dos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se, também, que as duas principais tecnologias do mercado atual (c-Si e mc-Si) apresentam curvas de respostas espectrais muito semelhantes, com banda de absorção e rendimento para cada comprimento de onda pouco distintas, o que pode ser comprovado pelas semelhanças nas variações percentuais das correntes de curto-circuito e de seus rendimentos, discriminados na tabela 3.

Observa-se, ainda, que a curva da célula de silício amorfo apresenta um aumento muito superior na sua corrente de curto-circuito e, dentre as três principais, é a única que apresenta um real aumento de rendimento nessas condições específicas. Isso se deve ao fato de que o espectro solar incidente na cidade de Farroupilha possui um forte desvio de potência para a faixa de comprimento de onda que compreende a radiação ultravioleta e a luz visível, região onde se encontra a maior parte da absorção de energia por essa tecnologia.

Tabela 3: Variações na corrente de curto-circuito em função da irradiância incidente em Farroupilha e variação do rendimento das três principais células de Si.

	<u>c-Si</u>		<u>mc-Si</u>		<u>a-Si</u>	
	$\Delta I_{cc \rightarrow \Delta H}$	$\Delta \eta$	$\Delta I_{cc \rightarrow \Delta H}$	$\Delta \eta$	$\Delta I_{cc \rightarrow \Delta H}$	$\Delta \eta$
Janeiro	2,84%	-1,84%	2,89%	-1,79%	8,11%	3,19%
Fevereiro	2,62%	-1,81%	2,69%	-1,74%	8,19%	3,52%
Março	2,01%	-1,73%	2,10%	-1,64%	8,21%	4,24%
Abril	1,64%	-1,72%	1,75%	-1,62%	7,98%	4,42%
Mai	1,23%	-1,68%	1,35%	-1,56%	7,98%	4,88%
Junho	0,96%	-1,65%	1,09%	-1,52%	8,02%	5,22%
Julho	0,95%	-1,65%	1,09%	-1,51%	8,08%	5,30%
Agosto	1,27%	-1,66%	1,40%	-1,54%	8,22%	5,09%
Setembro	1,90%	-1,72%	2,00%	-1,61%	8,30%	4,46%
Outubro	2,95%	-1,82%	3,02%	-1,76%	8,50%	3,47%
Novembro	2,98%	-1,82%	3,04%	-1,76%	8,53%	3,47%
Dezembro	3,20%	-1,87%	3,24%	-1,83%	8,30%	2,98%

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados da variação do rendimento das células de silício monocristalino, policristalino e amorfo, verificar-se-á o impacto que elas causarão no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica e no tempo de retorno do investimento para sua implementação em uma residência que apresenta um consumo típico para o estado do Rio Grande do Sul.

5. APLICAÇÕES DOS RESULTADOS EM UM DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDÊNCIAL

5.1 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ENERGIA A SER GERADA

O primeiro passo para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado com a rede elétrica local é a determinação da quantidade de energia que se deseja produzir. Essa determinação pode ser realizada com base no consumo médio mensal de uma residência, na limitação física da área disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos ou pelo limite econômico que o consumidor pode investir.

Visto que o intuito desse estudo é verificar a viabilidade da microgeração para consumidores residenciais, utilizar-se-á o dimensionamento baseado no consumo médio mensal. De acordo com a norma técnica vigente para acesso à micro e à minigeração distribuída (Companhia Paulistana de Força e Luz, 2013), a potência instalada para esse tipo de cogeração é limitada à carga instalada nessa unidade consumidora.

O dimensionamento será realizado sobre os dados de uma unidade consumidora real, conforme figura 53, sendo que esta apresentou um consumo médio mensal para o ano de 2015, de 374 kWh mês, o que de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), equivale ao consumo médio de energia elétrica de uma residência gaúcha habitada por dois adultos (Empresa de Pesquisa Energética, 2014).

Figura 53: Detalhes da conta de energia elétrica utilizada para o dimensionamento.

ATENDIMENTO		PN		SEU CÓDIGO			
0800 970 0900 www.rge-rs.com.br		800830238		3082865286			
HISTÓRICO DE CONSUMO		kWh	Dias	DATAS DAS LEITURAS			
2015 DEZ		300	31	Atual	28/12/2015		
NOV		330	29	Anterior	27/11/2015		
OUT		400	31	Nro de Dias	31		
SET		326	32	Leitura Prevista	28/01/2016		
AGO		384	29	COMPOSIÇÃO FORNECIMENTO (R\$)			
JUL		506	30				
JUN		503	32	Energia	62,76		
MAI		397	29	Transmissão	7,29		
ABR		350	30	Distribuição	38,81		
MAR		392	31	Perdas	10,43		
FEV		350	30	Encargos	28,26		
JAN		250	32	Tributos	65,39		
2014 DEZ		356	30				
EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO							
Nº	Energia	Leitura Atual	Leitura Anterior	Fator Multiplicação	Consumo [KWh]	Taxa Perdas[%]	Tensão Nominal[V]
6675438	Ativa	20600	20300	1,00	300		220 V

Fonte: Próprio autor.

5.2 DIMENSIONAMENTO DO NÚMERO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A quantidade de módulos fotovoltaicos a ser instalada em um sistema de geração está diretamente ligada ao consumo médio mensal dessa unidade consumidora e inversamente proporcional à quantidade de energia que determinado módulo é capaz de produzir sob as condições da irradiação local.

Existem dois métodos para o dimensionamento da energia produzida por um módulo fotovoltaico: o método da insolação que é utilizado quando o dispositivo de conversão (controladores de carga ou inversores) é dotado com o recurso de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum power point tracking*) e o método da corrente máxima do módulo para dispositivos que não possuem esse recurso. Visto que os inversores para conexão com a rede elétrica sempre dispõem desse recurso, será utilizado o método baseado na insolação diária.

O método de insolação utiliza dados da média diária da irradiância ao longo de um ano e pode ser obtido através de mapas solarimétricos ou através de ferramentas computacionais. Esse método de cálculo (1.30) pode levar à falha do sistema por falta de energia nos meses de inverno ou excesso da mesma nos meses de verão. Para garantir que os módulos sejam capazes de fornecer energia, mesmo nos períodos de baixa irradiação solar, é comum em um dimensionamento a utilização do valor da insolação referente aos piores meses do ano. Porém, isso levará a um superdimensionamento do sistema gerando energia, desnecessariamente.

$$E_P = E_S \cdot A_M \cdot \eta_M \quad (1.30)$$

Onde E_P é a energia produzida por um módulo fotovoltaico (Wh), E_S é a insolação média diária (Wh/m²/dia), A_M a área total do módulo (m²) e η_M é o rendimento do módulo.

Os módulos de sistemas fotovoltaicos, geralmente são instalados em um ângulo inclinado com a horizontal igual à latitude local, porém, essa técnica não garante a maior média diária anual, o que representaria uma menor absorção da energia solar ao longo de um ano, assim para garantir que o sistema não falhe no mês de menor irradiação é possível a utilização de um terceiro ângulo que garante a maior “mínima densidade de potência mensal” possível.

No caso específico da cidade de Farroupilha, a estação solarimétrica mais próxima, cujos dados serão utilizados para o desenvolvimento dos cálculos, está localizada na cidade de Caxias do Sul, figura 54.

Figura 54: Irradiância para diferentes ângulos de inclinação para a cidade de Caxias do Sul.

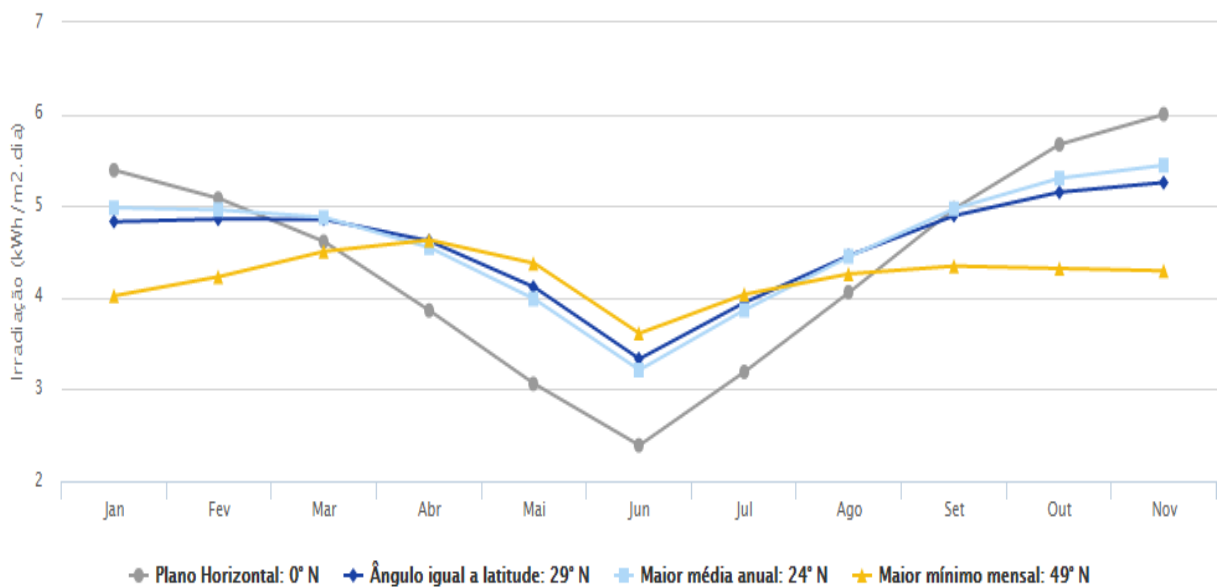
Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Caxias do Sul
Município: Caxias do Sul, RS - BRA
Latitude: 29,1° S
Longitude: 51,179444° O
Distância do ponto de ref. (29,20198° S; 51,348413° O): 20,0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez			
☑	Plano Horizontal	0° N	5,39	5,08	4,61	3,86	3,06	2,39	2,92	3,19	4,06	4,97	5,67	6,00	4,27	3,61	
☑	Ângulo igual a latitude	29° N	4,83	4,86	4,85	4,62	4,11	3,33	4,08	3,95	4,46	4,89	5,15	5,26	4,53	1,92	
☑	Maior média anual	24° N	4,98	4,96	4,88	4,55	3,98	3,21	3,94	3,87	4,45	4,97	5,30	5,44	4,54	2,23	
☑	Maior mínimo mensal	49° N	4,02	4,23	4,50	4,63	4,37	3,61	4,42	4,04	4,26	4,34	4,32	4,29	4,25	1,02	

Irradiação Solar no Plano Inclinado -Caxias do Sul-Caxias do Sul, RS-BRA

29,1° S; 51,179444° O



(Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, 2015)

Para a determinação dos espectros médios mensais de Farroupilha, foi utilizado o ângulo de inclinação igual à latitude local com o intuito de manter a mesma relação com o espectro ASTM G173 preconizado na norma, porém, para o dimensionamento do sistema, utiliza-se a inclinação que fornece a maior média anual.

O próximo passo para o dimensionamento do sistema é calcular a energia média que poderá ser produzida por um único módulo durante um dia.

A fim de verificar a influência da variação do espectro solar no dimensionamento de um sistema de geração fotovoltaica, será utilizado o rendimento nominal de cada uma das tecnologias em análise seguida do cálculo com os rendimentos corrigidos devido à alteração do espectro de Farroupilha em relação ao espectro padrão, verificando se haverá alguma diferença no “tamanho” do sistema a ser instalado para suprir a totalidade de consumo da residência em questão.

Para a tecnologia de silício monocristalino, serão utilizados os dados técnicos do módulo Panda de 260 W, figura 55, 60 células (série 2) da fabricante *Yingli Green Energy Company Holding Limited* (Yingli Solar, 2015).

Figura 55: Dados técnicos utilizados para o cálculo da energia produzida por um módulo de c-Si.

CARATERÍSTICAS ELÉTRICAS

Parâmetros elétricos para STC							
Tipo de módulo			YLxxxC-30b (xxx=P _{max})				
Potência de saída	P _{max}	W	280	275	270	265	260
Tolerância	ΔP _{max}	W	0 / + 5				
Eficiência do módulo	η _m	%	17,2	16,9	16,6	16,3	16,0
Tensão em P _{max}	V _{mpp}	V	31,3	30,9	30,5	30,1	29,7
Corrente em P _{max}	I _{mpp}	A	8,96	8,91	8,85	8,79	8,74
Tensão em circuito aberto	V _{oc}	V	39,1	38,8	38,6	38,3	38,1
Corrente de curto-circuito	I _{sc}	A	9,50	9,47	9,43	9,37	9,35

STC: 1000 W/m² irradiância, temperatura do módulo de 25° C, distribuição espectral AM1.5gr de acordo com a norma EN 60904-3. Redução média de eficiência de 1,9% em irradiância de 200 W/m² de acordo com EN 60904-1.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

Dimensões (C / L / A)	1640mm / 990mm / 40mm
Peso	18.5kg

(Yingli Solar, 2015)

$$E_{P(c-Si) \text{ nominal}} = E_s \cdot A_M \cdot \eta_{M \text{ nominal}} = 4540.1,6236.16\% = 1179,383 \text{Wh} / \text{dia} \quad (1.31)$$

$$E_{P(c-Si) \text{ corrigida}} = E_s \cdot A_M \cdot \eta_{M \text{ corrigida}} = 4540.1,6236.15,72\% = 1158,7 \text{Wh} / \text{dia} \quad (1.32)$$

Para a tecnologia de silício policristalino, serão utilizados os dados técnicos do módulo YGE de 260 W, figura 56, 60 células (série 2) da fabricante Yingli *Green Energy Company Holding Limited* (Yingli Solar, 2015).

Figura 56: Dados técnicos utilizados para o cálculo da energia produzida por um módulo de mc-Si.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Parâmetros Elétricos para STC							
Tipo de módulo	YLxxxP-29b (xxx=P _{max})						
Potência de saída	P _{max}	W	260	255	250	245	240
Tolerância	ΔP _{max}	W	0 / +5				
Eficiência do módulo	η _m	%	16,0	15,7	15,4	15,1	14,8
Tensão em P _{max}	V _{mp}	V	30,3	30,0	29,8	29,6	29,3
Intensidade em P _{max}	I _{mp}	A	8,59	8,49	8,39	8,28	8,18
Tensão em circuito aberto	V _{oc}	V	37,7	37,7	37,6	37,5	37,5
Corrente de curto-circuito	I _{sc}	A	9,09	9,01	8,92	8,83	8,75

STC: 1000 W/m² irradiância, temperatura do módulo de 25 ° C, AM1.5 distribuição espectral de acordo com a norma EN 60904-3. Redução média de 3,3% de eficiência relativa de 200 W/m² de acordo com EN 60904-1.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

Dimensões (C / L / A)	1640mm / 990mm / 35mm
Peso	18.5kg

(Yingli Solar, 2015)

$$E_{P(mc-Si) \text{ nominal}} = E_S \cdot A_M \cdot \eta_{M \text{ nominal}} = 4540.1,6236.16\% = 1179,383Wh / dia \quad (1.33)$$


$$E_{P(mc-Si) \text{ corrigida}} = E_S \cdot A_M \cdot \eta_{M \text{ corrigida}} = 4540.1,6236.15,73\% = 1159,8Wh / dia \quad (1.34)$$

Para a tecnologia de silício amorfo, serão utilizados os dados técnicos do módulo ASF de 110 W, figura 57, 119 células e rendimento nominal de 7%, fabricado por *Hangzhou Tian Yu Solar Technology Co. Ltd.* (AmpleSun Solar, 2014).

$$E_{P(a-Si) \text{ nominal}} = E_S \cdot A_M \cdot \eta_{M \text{ nominal}} = 4540.1,575196.7\% = 500,6Wh / dia \quad (1.35)$$

$$E_{P(a-Si) \text{ corrigida}} = E_S \cdot A_M \cdot \eta_{M \text{ corrigida}} = 4540.1,575196.7,29\% = 521,6Wh / dia \quad (1.36)$$

Figura 57: Detalhe dos dados técnicos utilizados para o cálculo da energia produzida por um módulo de silício amorfo.

ASF110		AmpleSun 	
Mechanical Specifications			
Size(L×W×T)	1,414×1,114×35 mm		
Weight	20.3 Kg		
IP Rating	IP67		
Connector	MC4		
Cable Length	1000 mm		
Cable Size	2.5 mm ²		
Number of diodes	1		
Electrical Specifications			
Maximum power (Pmax at STC)	110 W		
Maximum power voltage (Vpm at STC)	77 V		
Maximum power current (Ipm at STC)	1.42 A		
Open circuit voltage (Voc at STC)	99 V		
Short circuit current (Isc at STC)	1.65 A		
Diode average rectified output current (Io)	10 A *		

(AmpleSun Solar, 2014)

Após a determinação das energias produzidas por um único painel sob as condições de irradiação da cidade de Farroupilha, é possível determinar agora o número de módulos necessários para o sistema de cogeração, utilizando a equação (1.37).

$$N_P = \frac{E_{MMC}}{E_P} \quad (1.37)$$

Onde N_P é o número de módulos fotovoltaicos a ser instalado, E_{MMC} é a energia média mensal consumida pela residência em questão e E_P é a energia produzida por um único módulo diariamente.

Lembrando que, tanto a E_{MMC} e a E_P devem estar expressas no mesmo intervalo temporal, para tanto, multiplicar-se-á a energia diária produzida por um módulo por trinta (30) para que corresponda ao mesmo período de tempo da energia média mensal. Logo, tem-se:

$$N_{P(c - Si) \text{ nominal}} = \frac{E_{MMC}}{30 \times E_{P(c - Si) \text{ nominal}}} = \frac{374}{35,4} = 10,57 \text{ módulos} \quad (1.38)$$

$$N_{P(c-Si) \text{ corrigida}} = \frac{E_{MMC}}{30 \times E_{P(c-Si) \text{ corrigida}}} = \frac{374}{34,76} = 10,76 \text{módulos} \quad (1.39)$$

$$N_{P(mc-Si) \text{ nominal}} = \frac{E_{MMC}}{30 \times E_{P(mc-Si) \text{ nominal}}} = \frac{374}{35,38} = 10,57 \text{módulos} \quad (1.40)$$

$$N_{P(mc-Si) \text{ corrigida}} = \frac{E_{MMC}}{30 \times E_{P(mc-Si) \text{ corrigida}}} = \frac{374}{34,79} = 10,75 \text{módulos} \quad (1.41)$$

$$N_{P(a-Si) \text{ nominal}} = \frac{E_{MMC}}{30 \times E_{P(a-Si) \text{ nominal}}} = \frac{374}{15,02} = 24,90 \text{módulos} \quad (1.42)$$

$$N_{P(a-Si) \text{ corrigida}} = \frac{E_{MMC}}{30 \times E_{P(a-Si) \text{ corrigida}}} = \frac{374}{15,65} = 23,90 \text{módulos} \quad (1.43)$$

5.3 DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

O dispositivo que realiza a conversão da corrente contínua gerada pelos módulos para a corrente alternada, referente ao tipo de energia da rede elétrica local, é chamado de inversor. O mesmo deve respeitar os requisitos de qualidade de energia e segurança explícitos em regulamento próprio da concessionária local de distribuição de energia (Companhia Paulista de Força e Luz, 2013), tais como o nível de tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio ou flutuação de tensão, variação de frequência, proteção contra ilhamento, etc..

O inversor deve estar especificado para uma potência de pico (W_P) igual ao somatório das potências individuais dos módulos, conforme equação (1.44).

$$P_{inv} = N_P \cdot P_{max(módulo)} \quad (1.44)$$

Onde P_{inv} é a potência do inversor, N_P o número de módulos no sistema de geração e $P_{max(módulo)}$ é a potência máxima fornecida pela referida tecnologia (potência de saída).

Contudo, os módulos fotovoltaicos nunca produzem sua potência de pico, pois a mesma é estipulada sobre as condições padrões de ensaios, preconizadas na IEC 60904-3 para irradiância e temperatura, que não ocorrem simultaneamente. Se a irradiância se encontra próxima de 1000 W/m^2 , a temperatura do módulo estará muito superior aos 25°C estipulados

como o padrão para teste. Logo, é comum subdimensionar levemente o inversor, visto que os painéis em situação real de trabalho geram, no máximo, em torno de 85% da potência de pico.

Supondo que, por alguma condição incomum, irrelevante, os módulos passassem a gerar toda a sua potência de pico, e mesmo que essa venha a superar a potência do inversor, não acarretaria em nenhum dano tanto para o sistema gerador (módulos) quanto para o inversor, apenas seria desperdiçada parte da potência gerada em forma de elevação da tensão no barramento C.C. (circuito entre os módulos e o inversor), desde que a tensão de circuito aberto (V_{OC}) do conjunto de módulos fotovoltaicos agrupados em série seja inferior à tensão máxima admitida na entrada do inversor.

O primeiro passo para o dimensionamento do inversor é definir a sua potência, de acordo com o número e a tecnologia de módulos fotovoltaicos que serão conectados ao mesmo. Logo:

$$P_{inv(100\%)} = N_{P(c-Si) \text{ nominal}} \cdot P_{max(c-Si)} = 11.260 = 2860W_P \quad (1.45)$$

$$P_{inv(100\%)} = N_{P(c-Si) \text{ corrigido}} \cdot P_{max(c-Si)} = 11.260 = 2860W_P \quad (1.46)$$

$$P_{inv(100\%)} = N_{P(mc-Si) \text{ nominal}} \cdot P_{max(mc-Si)} = 11.260 = 2860W_P \quad (1.47)$$

$$P_{inv(100\%)} = N_{P(mc-Si) \text{ corrigido}} \cdot P_{max(mc-Si)} = 11.260 = 2860W_P \quad (1.48)$$

$$P_{inv(100\%)} = N_{P(a-Si) \text{ nominal}} \cdot P_{max(a-Si)} = 25.110 = 2750W_P \quad (1.49)$$

$$P_{inv(100\%)} = N_{P(a-Si) \text{ corrigido}} \cdot P_{max(a-Si)} = 24.110 = 2640W_P \quad (1.50)$$

Pode-se verificar que a potência do inversor para os módulos de silício mono e policristalino não apresenta diferença, devido ao fato de os dois tipos de módulos serem muito similares em questão de potência e rendimento, mesmo após a correção para o espectro da cidade de Farroupilha. Essa situação pode vir a não ocorrer no caso da utilização de módulos fotovoltaicos diferentes aos utilizados neste trabalho ou para instalações de grande porte, em que o número de módulos pode variar consideravelmente após a correção do rendimento.

De acordo com o dado de que a geração dos módulos fotovoltaicos submetidos às condições reais de insolação e temperatura não ultrapassam 85% de sua potência de pico nominal, pode-se dimensionar o inversor para uma potência de 2500 W, conforme tabela 4.

Tabela 4: Definição da efetiva potência gerada.

	WP calculado	WP à 85%
$W_{P(c-Si \text{ e } mc-Si)}$	2860	2431
$W_{P(a-Si) \text{ nominal}}$	2750	2337,5
$W_{P(a-Si) \text{ corrigida}}$	2640	2244

Fonte: Próprio autor.

Para esse projeto, será utilizado o inversor SF2200TL, figura 58, por se tratar de um inversor monofásico e etiquetado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), cujo dado necessário para a definição do “arranjo” dos módulos fotovoltaicos, máxima tensão de entrada é de 550V.

Figura 58: Dados técnicos do inversor.

Inverter Model	SF1600TL	SF2200TL	SF3000TL
Input (DC)			
Max DC power	1850 W	2500 W	3500 W
Max DC voltage	550 V	550 V	550 V
Full load MPPT Voltage Range /Rated Voltage	120-500V/360V	170-500V/360V	210-500V/360V
Max input current per string	13A	15A	15A
Start Voltage / On-grid Voltage	100/120V	100/120V	100/120V
Number of MPP trackers /Strings per tracker	1/1	1/1	1/1

(B&B Power, 2014)

O módulo de silício monocristalino utilizado para esse projeto, apresenta uma tensão de circuito aberto (V_{OC}) de 38,1 V. Foram dimensionados 11 módulos, tanto para as condições nominais de rendimento, quanto para as condições de rendimento corrigido, logo a melhor topologia de arranjo para os módulos é colocá-los todos em série, totalizando uma tensão de 419,1 V na situação em que o inversor não esteja injetando energia à rede elétrica local.

O módulo de silício policristalino apresenta uma V_{OC} de 37,7 V. Foram dimensionadas 11 unidades para a geração da potência necessária. Dessa forma, a melhor topologia de arranjo dos mesmos também será em série, totalizando uma tensão máxima no barramento C.C. de 414,7 V.

Já os módulos de silício amorfo, apresentam uma tensão de circuito aberto de 99 V, possibilitando a ligação em série de no máximo 5 unidades que gerariam uma máxima tensão no barramento C.C. de 495 V, porém, para as condições nominais de rendimento, foram dimensionados 25 módulos e para o rendimento corrigido, 24 módulos. Para a primeira situação, os módulos seriam arranjados em um circuito misto, contendo 5 grupos em paralelo (*strings*) de 5 módulos ligados em série. Para o dimensionamento com o rendimento corrigido, o arranjo também seria misto, porém, de 6 grupos em paralelo de 4 módulos em série, apresentando uma tensão máxima na entrada do inversor de 495 V e 396 V respectivamente.

O inversor escolhido atende as necessidades de qualquer uma das tecnologias de módulos utilizada neste trabalho, porém, como a tensão gerada pelo módulo depende basicamente da temperatura da junção PN, equação (1.10), e essa temperatura está diretamente associada à quantidade de irradiância recebida pelo módulo, em condições de altas irradiâncias a temperatura do módulo tende a aumentar, baixando a tensão na entrada do inversor, portanto, outro ponto importante da definição do arranjo dos módulos fotovoltaicos é a tensão mínima para que o mesmo consiga injetar potência na rede elétrica de corrente alternada, que para esse inversor é de 120 V (*On-grid Voltage*).

5.4 DEMAIS COMPONENTES DO CIRCUITO

A norma técnica para efetuar a conexão de micro e minigeração distribuída sob sistema de compensação de energia elétrica (Companhia Paulistana de Força e Luz, 2013) prevê várias funcionalidades para o dispositivo inversor, responsável por injetar potência na rede elétrica local, de modo que este não venha a energizar a rede externa da residência em caso de manutenção ou falha no sistema da distribuidora local.

Para tanto, preconiza nos itens 5.7 e 5.8 da Norma Técnica GED nº15303, como equipamentos de proteção do sistema elétrico somente o dispositivo de seccionamento visível (DSV), onde usualmente é utilizada uma chave seccionadora blindada em caixa própria (IEC 60947-1(2011) e IEC 60947-3(2012)), e um elemento de interrupção automática da corrente gerada em caso de ocorrência de alguma das falhas expostas na figura 59. Porém, a obrigatoriedade da utilização do DSV foi revogada, para todas as categorias de acesso à rede,

na segunda revisão da Norma Técnica GED nº15578 (Companhia Paulistana de Força e Luz, 2015).

Para acesso de micro ou minigeração à rede de baixa tensão (BT), esse dispositivo de seccionamento automático pode ser o próprio inversor caso cumpra com os requisitos solicitados.

Figura 59: Mínimas funcionalidades de proteção requeridas de conexões de centrais de micro e minigeração.

PROTEÇÃO	Potência Instalada (P), kW		
	P ≤ 100	100 < P ≤ 500	500 < P ≤ 1000
Sub e Sobretensão	x	x	x
Sub e Sobrefrequência	x	x	x
Desequilíbrio de corrente	-	-	x
Desbalanço de tensão	-	-	x
Sobrecorrente direcional	-	-	x
Sobrecorrente c/ restrição de tensão	-	-	x
Sincronismo	x	x	x
Anti-ilhamento	x	x	x

Fonte: (Companhia Paulistana de Força e Luz, 2013)

Entretanto, além dos aspectos de proteção da rede elétrica da distribuidora de energia, é de extrema importância o dimensionamento tanto do circuito C.C. como do circuito C.A., de acordo com a norma pertinente (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) e as proteções necessárias para este tipo específico de instalação. A NBR 16149 (2013) no item 5.6 alerta para a proteção contra curto-circuito, porém é muito vaga e remete à IEC 60364-7-712(2002).

De acordo com a norma europeia, o sistema fotovoltaico conectado com a rede elétrica de baixa tensão é composto dos seguintes itens:

- Módulos fotovoltaicos;
- Cabos para o barramento C.C.;
- Caixa de strings (com fusíveis) ou quadro de proteção C.C.;
- Inversor para conexão com a rede elétrica;
- Quadro de proteção C.A..

Os cabos de ligação dos módulos à caixa de strings ou quadro de proteção C.C. e deste até o inversor são dimensionados pelos métodos de instalação, queda de tensão e critérios de capacidade de condução, porém, a corrente utilizada para o projeto é a corrente de curto-circuito (I_{SC}) de um dos módulos agrupados em série com um acréscimo de 25%,

equação (1.51). Caso a disposição dos módulos corresponda a um circuito misto, deverá ser somada à I_{SC} , tantas vezes quanto existirem circuitos em paralelo.

$$I_{cabos} \geq N_{CKT's(paralelos)} \cdot I_{SC} \cdot 1,25 \quad (1.51)$$

Onde I_{cabos} é a corrente utilizada para o cálculo do dimensionamento da fiação elétrica e $N_{CKT's(paralelos)}$ é o número de circuitos de módulos fotovoltaicos ligados em paralelo.

A caixa de strings é uma caixa com grau de proteção IP54 contendo fusíveis do tipo gPV para cada string de módulos e dois barramentos separados e identificados como positivo (+) e negativo (-). Já o quadro de proteção apresenta ainda uma chave de desconexão do barramento C.C. que vai para o inversor e incorpora também dispositivos de proteção de surtos (DPS), sendo assim, dispõem de aterramento para conexões das estruturas metálicas dos módulos fotovoltaicos.

A norma IEC 60364-7-712 não obriga o uso de fusível para proteção dos módulos para um sistema de até dois strings em paralelo. Para sistemas de maior potência, os fusíveis são dimensionados em 10% acima da corrente de curto-circuito e abaixo da corrente reversa suportada por um módulo, equação (1.52).

$$1,1 \cdot I_{SC} \leq I_F \leq I_R \quad (1.52)$$

Onde I_F é a corrente nominal do fusível e I_R a corrente reversa suportada pelo módulo fotovoltaico.

A chave de desconexão C.C. utilizada no quadro de proteção deve suportar os níveis de tensão presentes no barramento C.C. e ser capaz de realizar a abertura do circuito com capacidade de interrupção de arco elétrico. Os DPS a serem utilizados em sistemas fotovoltaicos são de classe II, segundo a IEC 60364-7-712. E o dimensionamento dos cabos do barramento C.A. é executado de acordo com a norma NBR 5410.

O medidor de energia bidirecional é determinado pela distribuidora de energia elétrica local, conforme norma técnica vigente.

Esses dispositivos do circuito não apresentam impacto significativo na correção do rendimento dos módulos fotovoltaicos pela distribuição espectral, porém já que esse trabalho se refere ao impacto da variação do espectro solar no dimensionamento para diferentes tecnologias, julga-se importante explicitar todos os componentes necessários.

5.5 ESTUDO DO RETORNO DO INVESTIMENTO

O estudo de retorno financeiro de um investimento em um sistema de geração fotovoltaica é realizado sobre o valor de mercado para implementação de cada uma das tecnologias de conversão estudadas e os dados do custo energético da unidade consumidora são obtidos na fatura mensal de energia.

O grande impacto da implementação está na aquisição dos módulos fotovoltaicos e no inversor para conexão com a rede, visto que esse último não apresenta variação em sua potência nominal para as três tecnologias de conversão. O custo do inversor é fixo em R\$ 4.950,00 (Energia Própria, 2016) para qualquer uma das três opções de sistema de geração.

Os módulos de silício monocristalinos de 260 W apresentam um preço de aquisição de R\$ 1.375,00 (Energia Própria, 2016), sendo que para o dimensionamento, tanto com o rendimento nominal como para o dimensionamento com rendimento corrigido pelo espectro da radiação local, serão necessários 11 módulos já descritos no item 4.2, totalizando um investimento necessário de R\$ 15.125,00.

Os módulos de silício policristalinos de 260 W apresentam um preço de aquisição de R\$ 1.100,00 (Energia Própria, 2016), sendo que para o dimensionamento tanto com o rendimento nominal como para o dimensionamento com rendimento corrigido também serão necessários 11 módulos já descritos no item 4.2, totalizando um investimento necessário de R\$ 12.100,00.

Já para os módulos de silício amorfo de 110 W, o preço de aquisição é de R\$991,00 (Alibaba, 2016), sendo necessários 25 módulos para o dimensionamento com o rendimento nominal e 24 para o dimensionamento com rendimento corrigido pelo espectro da radiação local, totalizando um investimento necessário de R\$24.775,00 e R\$23.784,00 respectivamente. Esse tipo de módulo apresenta um valor elevado em relação aos módulos de silício mono e policristalino, devido ao baixo volume de produção, mesmo apresentando um processo de fabricação mais simples.

Os demais equipamentos do sistema (string Box, os DPS's para o barramento C.C. e para o barramento C.A, medidor bidirecional, etc.) não ultrapassam a quantia de R\$ 1.500,00.

Logo, para a tecnologia de silício policristalino, tem-se um custo de investimento de R\$ 18.550,00, seguido da tecnologia de silício monocristalinos com custo de investimento de R\$ 21.575,00 e para o silício amorfo, o custo é de R\$ 31.225,00 para o dimensionamento com o rendimento nominal e R\$ 30.234,00 para o dimensionamento com o rendimento corrigido.

Comercialmente, é uma prática comum na tentativa de comparação entre diferentes tecnologias a determinação do custo de implementação para cada watt pico (W_p) instalado,

dado pela equação (1.53), essa relação tem o intuito de estabelecer quanto estamos pagando para gerar 1 W de energia fotovoltaica, sendo que aquele que apresentar o menor valor seria o mais vantajoso. Porém, essa relação não retrata o real custo por watt gerado visto que esse custo inicial é “diluído” durante um determinado tempo de utilização.

$$R\$/W = \frac{Custo_{(instalação)}}{WP_{(instalado)}} \quad (1.53)$$

A melhor forma de analisar economicamente esse tipo de instalação é através do retorno do investimento inicial (*payback*), como o sistema foi dimensionado para a geração de toda a energia média consumida no interstício de cada mês do ano, 374 kWh/mês. Definindo o custo dessa energia proveniente da rede de distribuição local consumida, é possível determinar em quantos anos o investimento começará a dar lucro ao investidor.

De acordo com os dados econômicos da conta de energia elétrica, figura 60, atualmente, o valor para 1 kWh/mês é de 0,7098 reais para o consumidor classe B1 (residencial – monofásico).

Figura 60: Dados econômicos da fatura de energia.

QUANTIDADE	PREÇO MÉDIO	VALOR (R\$)	
300	0,70980000	212,94	
CONTA MÊS	VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR	
DEZ/2015	11/01/2016	217,49	
DESCRIÇÃO DA CONTA			
Nº 904501136476	Quantidade	Tarifa/Preço	Valor (R\$)
Consumo Uso Sistema [kWh]-TUSD	300	0,23210000	69,63
Consumo Bandeira Verde - TE	300	0,21470000	64,41
Adicional de Bandeira Vermelha			13,51
PIS/PASEP 1,02%			2,17
COFINS 4,69%			9,98
ICMS			53,24
Total Distribuidora			212,94
DÉBITOS DE OUTROS SERVIÇOS			
Contribuição Custeio IP-CIP			4,55

Fonte: Próprio autor.

Porém, conforme a normativa de faturamento da concessionária local, mesmo gerando toda a energia consumida, será faturada a quantia de 30 kWh/mês para a unidade consumidora como custo de disponibilidade da conexão com a rede elétrica, figura 61. Esse custo mensal na fatura de energia faz com que o retorno do investimento, para os módulos de silício policristalino, aumente em aproximadamente 6 meses, o monocristalino em 7 meses e o amorfo em 10 meses.

Figura 61:Faturamento mínimo mensal.

QUANTIDADE	PREÇO MÉDIO	VALOR (R\$)	
30	0,70980000	21,29	
CONTA MÊS	VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR	
DEZ/2015	11/01/2016	25,84	
DESCRIÇÃO DA CONTA			
Nº 904501136476	Quantidade	Tarifa/Preço	Valor (R\$)
Consumo Uso Sistema [KWh]-TUSD	30	0,23210000	6,96
Consumo Bandeira Verde - TE	30	0,21470000	6,44
Adicional de Bandeira Vermelha			1,35
PIS/PASEP 1,02%			0,22
COFINS 4,69%			1,00
ICMS			5,32
Total Distribuidora			21,29
DÉBITOS DE OUTROS SERVIÇOS			
Contribuição Custeio IP-CIP			4,55

Fonte: Próprio autor.

A diferença financeira entre a média do consumo mensal e o pagamento da fatura contendo os custos de disponibilidade da conexão é de aproximadamente R\$ 2.930,07 por ano, tabela 5, o que garante o retorno do investimento inicial para implementação do sistema, utilizando a tecnologia de silício policristalino em 6 anos e 4 meses; para a tecnologia de silício monocristalino em 7 anos e 4 meses; para o silício amorfo com rendimento nominal em 10 anos e 8 meses e com o rendimento corrigido em 10 anos e 4 meses (desconsiderando a depreciação dos módulos).

Tabela 5: Impacto financeiro e tempo de retorno do investimento.

Economia Anual				
	Custo anual da energia fornecida pela concessionária			R\$ 3.185,45
	Custo anual da tarifa de disponibilidade de conexão			R\$ 255,52
	Economia financeira anual média			R\$ 2.929,93
Tempo de amortização (sem depreciação do módulo)				
	c-Si	mc-Si	a-Si (nominal)	a-Si (corrigido)
Investimento inicial	R\$ 21.575,00	R\$ 18.550,00	R\$ 31.225,00	R\$ 30.234,00
Payback	7 anos e 4 meses	6 anos e 4 meses	10 anos e 8 meses	10 anos e 4 meses

(a)

Economia Anual				
	Custo anual da energia fornecida pela concessionária			R\$ 3.185,45
	Custo anual da tarifa de disponibilidade de conexão			R\$ 255,52
	Economia financeira anual média			R\$ 2.511,79
Tempo de amortização (com depreciação do módulo)				
	c-Si	mc-Si	a-Si (nominal)	a-Si (corrigido)
Investimento inicial	R\$ 21.575,00	R\$ 18.550,00	R\$ 31.225,00	R\$ 30.234,00
Payback	8 anos e 3 meses	7 anos e 1 meses	11 anos e 11 meses	11 anos e 7 meses

(b)

Fonte: Próprio autor.

Já diferença financeira entre o pagamento da fatura contendo os custos de disponibilidade da conexão e a média do consumo mensal, considerando que o fabricante garante uma perda linear de 1% ao ano para os módulos de silício, é de aproximadamente R\$ 2.603,87 por ano, tabela 5 (b), o que garante o retorno do investimento inicial para implementação do sistema, utilizando a tecnologia de silício policristalino em 7 anos e 1 meses; para a tecnologia de silício monocristalino em 8 anos e 3 meses; para o silício amorfo com rendimento nominal em 11 anos e 11 meses e com o rendimento corrigido em 11 anos e 7 meses.

Lembrando que a depreciação linear ou perda no rendimento da energia produzida garantida pelo fabricante, é devido à deterioração do polímero utilizado na cobertura dos módulos (geralmente EVA) e não perda de rendimento das células.

Dessa forma, pode-se verificar que mesmo ocorrendo um desvio de irradiância para a região de maior absorção dos módulos fabricados através da tecnologia de silício amorfo, devido ao baixíssimo rendimento dessa tecnologia associado ao alto custo da fabricação em pequena escala, o mesmo não foi capaz de superar as tecnologias de módulos de silício mono e policristalino que apresentaram uma diminuição no rendimento para a região de Farroupilha.

Através da análise dos dados, é evidente que os módulos fotovoltaicos fabricados com a tecnologia de silício policristalino apresentam um menor custo de implementação, por conseguinte, um menor *payback* para instalações residenciais situadas na região da serra gaúcha.

Sabe-se que outros fatores influenciam diretamente na geração de energia através de módulos fotovoltaicos, porém, esse trabalho demonstrou que variações meteorológicas e principalmente geográficas impactam tanto na distorção da forma do espectro solar como na irradiância em determinados comprimentos de ondas, modificando a densidade de potência por metro quadrado e alterando o rendimento dos módulos geradores fotovoltaicos. Para um dimensionamento residencial que apresente uma média de consumo elétrico típico do Rio Grande do Sul, esse impacto mostrou-se não significativo devido ao fato dessas variações serem percentualmente pequenas em relação a um sistema de cogeração também considerado de pequeno porte pelas normas regulamentadoras.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado a respeito da variação da distribuição no espectro solar local em relação ao espectro normatizado para caracterização de equipamentos fotovoltaicos, preconizado pela norma IEC 60904-3, demonstrou que características meteorológicas e principalmente as características geográficas exercem forte influência sobre a densidade de potência disponível por metro quadrado que incide sobre um módulo fotovoltaico instalado em diferentes regiões, o que pode ser confirmado através da geração da distribuição espectral local e comparado diretamente com a distribuição espectral normatizada. Fica evidenciado tanto graficamente como matematicamente um aumento significativo na irradiância disponível, porém através de cálculos estatísticos, obteve-se um aumento de aproximadamente 3,86% na integralização da irradiância para o espectro referente à cidade de Farroupilha em comparação à irradiância do espectro padrão.

Outra informação importante obtida através dos espectros normalizados em 1000 W/m², G173 e Farroupilha, é que as condições climáticas e geográficas do local alteram a distribuição dessa irradiância, sendo que ocorre uma maior atenuação nos comprimentos de ondas referentes à região da radiação infravermelha e um aumento da irradiância para a região da luz visível e ultravioleta. Essa “migração” de potência entre os determinados comprimentos de ondas do espectro incidente em diferentes regiões geográficas causa uma variação no rendimento dos geradores fotovoltaicos de tal forma que módulos que apresentam uma maior absorção na região compreendida entre os comprimentos de ondas de 280 nm até aproximadamente 600 nm, apresentam um aumento significativo no seu rendimento de conversão, já para módulos que possuem a maior parte de sua absorção acima de 600 nm, o rendimento é inferior ao auferido através da utilização do espectro G173.

Comparando as correntes geradas sob as condições do espectro padrão e do espectro específico da cidade de Farroupilha, verifica-se que as três tecnologias estudadas obtiveram um aumento médio anual significativo em suas correntes de curto-circuito para a região da serra gaúcha. Para o módulo de silício monocristalino, esse aumento foi de 2,04% em relação à corrente de curto-circuito gerada sob condições do espectro padrão e 2,14% para o módulo de silício policristalino, mesmo que seus rendimentos tenham diminuído (média anual) em 1,75% para os módulos monocristalinos e em 1,66% para os módulos policristalinos.

Já os módulos de filme fino de silício amorfo apresentaram um aumento de rendimento de 4,19%, dados referentes a uma média anual e um aumento da corrente gerada de 8,2%.

O aumento da corrente de curto-circuito das duas primeiras tecnologias deve-se unicamente ao fato de haver uma maior disponibilidade de potência por metro quadrado nas condições geográficas da cidade de Farroupilha. Para o módulo de silício amorfo, além do aumento da irradiância, há o fator do aumento do rendimento que faz com que sua corrente de curto-circuito apresente o maior incremento percentual.

Devido ao fato do dimensionamento estar estritamente ligado ao rendimento das tecnologias de conversão, essa variação do rendimento sofrida pela alteração do espectro local faz com que o dimensionamento de um sistema de geração, utilizando módulos monocristalinos, seja incrementado em 1,75% na quantidade de módulos para a geração da energia necessária e 1,66% para os módulos policristalinos. Caso a opção seja de implementar um sistema contendo geradores fotovoltaicos de filmes finos de silício amorfo, o sistema gerador terá uma diminuição de 4,19% no número de módulos. Essa variação não se mostrou significativa para uma aplicação residencial ou comercial com um consumo médio mensal de até aproximadamente 300 kWh/mês (a-Si), porém, para grandes instalações, essa porcentagem de diminuição no número de módulos começa a receber uma maior significância.

Analisando somente a variação da densidade de potência e o seu desvio sobre o espectro solar de Farroupilha, o montante dos módulos para a tecnologia de silício monocristalino começa a se tornar relevante quando o consumo médio mensal da unidade estiver em torno de 1009 kWh/mês e para policristalino, em torno de 1010 kWh/mês. Porém, sabe-se que as variações térmicas sobre o material da junção PN dos módulos afetam inversamente a potência de saída dos mesmos, o que não ocorre para a tecnologia de filmes finos de silício amorfo onde a potência gerada é diretamente proporcional à temperatura dos módulos. Logo, para locais onde a temperatura média seja alta, os módulos de silício amorfo tendem a melhorar ainda mais o seu desempenho tanto devido ao aumento da irradiância na região visível do espectro solar quanto pelo aumento da temperatura da junção PN. Entretanto, mesmo que a tecnologia de filme fino de silício amorfo apresente uma resposta mais favorável a essas condições, os mesmos apresentam um rendimento muito baixo quando comparados com as outras duas tecnologias exploradas nesta dissertação.

Outro ponto importante na análise do tempo de retorno é o valor de mercado dos três tipos de módulos estudados e, embora o módulo de filme utilize uma camada de silício extremamente fina e um processo de fabricação mais rápido e economicamente viável, seu custo de aquisição é elevado devido à baixa procura por esse tipo de equipamento de conversão de energia, e, por conseguinte, baixa produção, o que inviabiliza sua utilização para micro e minigeração de energia elétrica. As duas principais tecnologias difundidas no

mercado mundial possuem qualidades praticamente iguais, devido à grande evolução no processo de fabricação de módulos de silício policristalino, portanto, o custo do processo de fabricação do módulo monocristalino vem a ser seu grande inimigo no que se refere a sua viabilidade.

Através da análise do dimensionamento, pode-se garantir que os módulos de silício policristalinos são as melhores opções de escolha para que um consumidor residencial possa ingressar na microgeração de energia elétrica conectada à rede local de baixa tensão, com um tempo de retorno de aproximadamente seis anos e meio e, sabendo-se que esses equipamentos possuem uma queda linear de seu rendimento de 1% ao ano (Yingli Solar, 2015), seu rendimento chegará a patamares de 80% de sua potência inicial em vinte e cinco anos, o que, na pior das hipóteses, garantiria ainda um lucro de R\$ 46.546,85 no interstício dos dezoito anos e meio restantes.

Lembrando que esses equipamentos não deixam de funcionar ao final de sua vida útil, só não serão mais capazes de fornecer a quantidade necessária para suprir a demanda da residência, mas continuarão a gerar economia e, para o retorno das condições iniciais, basta inserir *strings* em paralelo, pois não é aconselhável a colocação de módulos novos em série com os antigos, já que a corrente do circuito do *string* será limitada pelo módulo que gerará a menor corrente.

Portanto, esse trabalho demonstrou que as peculiaridades geográficas das diferentes regiões afetam fortemente a irradiância do espectro solar incidente e as condições meteorológicas distintas (qualidade do ar) causam um desvio na distribuição do espectro local. Os módulos respondem a essas variações positivamente ou negativamente, dependendo de sua curva de resposta espectral, o que poderá vir a afetar projetos de grande porte, pois de acordo com o dimensionamento para consumidores residenciais, essa influência torna-se insignificante.

E por último, fica evidente a viabilidade da utilização da energia solar fotovoltaica conectada com a rede local de distribuição de energia para consumidores residenciais, gerando certa independência energética desses consumidores e uma queda no trânsito de energia pelos cabos de transmissão da ordem de 704,26 GWh/ano, caso apenas 10% da população venha a fazer uso dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informação de Geração. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 482. Brasília, DF: ANEEL, 2012.

ALIBABA.com. China painel solar fabricantes de abastecimento de preço de fábrica sunpower painel solar, Flexível filme fino de silício amorfo painel solar. 2016. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-gs/china-solar-panel-manufacturers-supply-factory-price-sunpower-solar-panel-solar-flexible-thin-film-amorphous-silicon-solar-panel-60160231779.html>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

AMPLESUN Solar. Standard solar modules. 2014. Disponível em: <<http://www.amplesun.com/en/index.php/products/info/2>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

ASÍ funciona. Qué son los semiconductores. 2012. Disponível em: <http://www.asifunciona.com/fisica/ke_semiconductor/ke_semiconductor_7.htm>. Acesso em: 2 abr. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sistemas fotovoltaicos (FV): Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

B&B Power. SF1600TL/2200TL/3000TL. 2014. Disponível em: <<http://www.bbpower.cn/Uploads/201504/553e08f395c98.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2016.

BEER, R. O sol é para todos. Veja, v. 10, n. 2416, 2015, p. 102.

BÜHLER, A. J. Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

BÜHLER, A. J. Estudos de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. Potencial solar - SunData. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 03 fev. 2016.

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. Patent US2780765. Nova York: [s.n.], 1954.

COMPANHIA PAULISTANA DE FORÇA E LUZ. Conexão de micro e minigeração distribuída sob sistema de compensação de energia elétrica. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-15303.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2016.

COMPANHIA PAULISTANA DE FORÇA E LUZ. Padrão de Entrada para Micro e Minigeração Distribuída. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-15578.pdf>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

EBERHARDT, D. Desenvolvimento de um sistema completo para caracterização de células solares. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Faculdade de Engenharia. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (Regiões e Subistemas) 2004 - 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

ENERGIA própria. Disponível em: <<http://www.energiapropria.com.br/>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018. Onehemisphere: EPIA, 2014.

FRAUNHOFER ISE CALLAB PV CELLS. Changes to new spectral distribution in IEC 60904-3 standard. Disponível em: <<http://www.ise.fraunhofer.de/en/service-units/callab-pv-cells-callab-pv-modules/callab-pv-cells/iec-60904-3>>. Acesso em: 17 ago. 2015.,

GALDINO, M. A; PINHO, J. T. (Coord.) Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar - CEPTEL – CRESESB. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.

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

GHENSEV, A. Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas. Monografia (Pós-graduação). Universidade Federal de Lavras - UFLA. Lavras, 2006.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 45). Progress in Photovoltaics, n. 23, jan. 2015, p. 1-9.

GUEYMARD, C. A. Simple model of atmospheric radiative transfer of Sunshine: SMARTS 2.9.2 . Bailey: National Renewable Energy Laboratory – NREL, 2003.

HAAG, R. Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

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

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. Photon flux. 2014. Disponível em:
<<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/photon-flux>>. Acesso em: 26 nov. 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Electrical installations of buildings: - Part 7-712. Requirements for special installations or locations - Solar photovoltaic (PV) power supply systems. Geneva: IEC, 2002.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Low-voltage switchgear and controlgear - Part 1: General rules. Geneva: IEC, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Low-voltage switchgear and controlgear - Part 3: Switches, disconnectors, switch-disconnectors and fuse-combination units. Geneva: IEC, 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Measurement of spectral responsivity of photovoltaic (PV) device. Geneva: IEC, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. Geneva: IEC 2008.

KING, R. R. et al. Lattice-matched and metamorphic GaInP/GaInAs/Ge concentrator solar cells. In: World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 3. 2003. Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, n. 1, p. 622-625.

QUADRADO, J. C. Dossier: Medição da radiação solar. 2008. Disponível em:

<http://www.energiasrenovaveis.com/DetailNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15>. Acesso em: 17 jun. 2015.

RAMPINELLI, G. A.; BÜHLER, A. J. Análise de diferentes tecnologias fotovoltaicas para instalações residenciais no sul do Brasil. *Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente*, n. 16, 2012.

SARA, I. D.; BETTS, T. R.; GOTTSCHALG, R. Determining spectral response of a photovoltaic device using polychromatic filters. *Power Gener*, v. 8, n. 947, 2014.

SEIFERT, H.; HOHL-EBINGER, J.; WARTA, W. Spectral influences on measurement uncertainty of a-Si/ μ c-Si multi-junction solar devices. In: 26th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 2011, Hamburg. Germany: [s.n.], 2011.

SCHULTZ, O.; GLUNZ, S. W.; WILEKE, G. P. Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, v. 12, n. 553, 2004.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, p. 311-323.

WIKIMEDIA Commons. Solar spectrum. Disponível em:

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_ita.svg>. Acesso em: 17 jun. 2015.

WIKIPEDIA. p-n junction. Disponível em:

<http://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n_junction>. Acesso em: 2 abr. 2015.

VIDAL, L.; BARRA, E.; PINHÃO, J. C. Modelagem e simulação de um gerador fotovoltaico em MATLAB para estudo do uso de cargas intermitentes. In: Simpósio de excelência em gestão e tecnologia – SEGeT. [S.l: s.n], 2013.

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

YINGLI Solar. Série de células PANDA 60. 2015. Disponível em:

<<http://www.yinglisolar.com/br/products/monocrystalline/panda-60-cell-series/>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

YINGLI Solar. Série de células YGE 60. 2015. Disponível em:

<<http://www.yinglisolar.com/br/products/multicrystalline/yge-60-cell-series/>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

ZILLES, R. et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

APÊNDICE A – EXEMPLO DE TABELA DE OBTENÇÃO DA I_{CC} .

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência.

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{CC}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{CC}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{CC}
280,0	4,7309E-23	0,035678125	1,6879E-24	0,062847476	2,9733E-24		
280,5	1,2307E-21	0,036746901	4,5224E-23	0,063687976	7,8381E-23		
281,0	5,6895E-21	0,037798008	2,1505E-22	0,064509805	3,6703E-22		
281,5	1,5662E-19	0,038831745	6,0818E-21	0,065313259	1,0229E-20		
282,0	1,1946E-18	0,039848407	4,7603E-20	0,066098632	7,8961E-20		
282,5	4,5436E-18	0,040848288	1,8560E-19	0,066866217	3,0381E-19		
283,0	1,8452E-17	0,041831679	7,7188E-19	0,067616305	1,2477E-18		
283,5	3,5360E-17	0,04279887	1,5134E-18	0,068349186	2,4168E-18		
284,0	7,2670E-16	0,04375015	3,1793E-17	0,069065148	5,0190E-17		
284,5	2,4856E-15	0,044685804	1,1107E-16	0,069764475	1,7341E-16		
285,0	8,0142E-15	0,045606118	3,6550E-16	0,070447453	5,6458E-16		
285,5	4,2613E-14	0,046511374	1,9820E-15	0,071114364	3,0304E-15		
286,0	1,3684E-13	0,047401853	6,4865E-15	0,071765488	9,8204E-15		
286,5	8,3823E-13	0,048277833	4,0468E-14	0,072401106	6,0689E-14		
287,0	2,7367E-12	0,049139592	1,3448E-13	0,073021493	1,9984E-13		
287,5	1,0903E-11	0,049987405	5,4501E-13	0,073626927	8,0275E-13		
288,0	6,2337E-11	0,050821545	3,1681E-12	0,07421768	4,6265E-12		
288,5	1,7162E-10	0,051642283	8,8628E-12	0,074794026	1,2836E-11		
289,0	5,6265E-10	0,05244989	2,9511E-11	0,075356234	4,2399E-11		
289,5	2,0749E-09	0,053244632	1,1048E-10	0,075904574	1,5749E-10		
290,0	6,0168E-09	0,054026777	3,2507E-10	0,076439312	4,5992E-10		
290,5	1,3783E-08	0,054796588	7,5526E-10	0,076960715	1,0607E-09		
291,0	3,5052E-08	0,055554327	1,9473E-09	0,077469045	2,7154E-09		
291,5	1,0913E-07	0,056300255	6,1440E-09	0,077964565	8,5083E-09		
292,0	2,6830E-07	0,05703463	1,5302E-08	0,078447536	2,1047E-08		
292,5	4,2685E-07	0,057757709	2,4654E-08	0,078918214	3,3686E-08		
293,0	8,6466E-07	0,058469746	5,0556E-08	0,079376859	6,8634E-08		
293,5	2,2707E-06	0,059170995	1,3436E-07	0,079823724	1,8126E-07		
294,0	4,1744E-06	0,059861707	2,4989E-07	0,080259063	3,3503E-07		
294,5	6,5911E-06	0,060542131	3,9904E-07	0,080683128	5,3179E-07		
295,0	1,2290E-05	0,061212515	7,5230E-07	0,081096169	9,9667E-07		
295,5	2,7826E-05	0,061873103	1,7217E-06	0,081498434	2,2678E-06		
296,0	4,7904E-05	0,06252414	2,9952E-06	0,08189017	3,9229E-06		
296,5	7,1345E-05	0,063165868	4,5066E-06	0,082271622	5,8697E-06		
297,0	9,6800E-05	0,063798526	6,1757E-06	0,082643032	7,9998E-06		
297,5	1,8608E-04	0,064422353	1,1988E-05	0,083004643	1,5446E-05		
298,0	2,8988E-04	0,065037585	1,8853E-05	0,083356694	2,4163E-05		
298,5	3,5789E-04	0,065644457	2,3493E-05	0,083699423	2,9955E-05		
299,0	4,9211E-04	0,0662432	3,2599E-05	0,084033067	4,1354E-05		
299,5	8,6068E-04	0,066834047	5,7523E-05	0,08435786	7,2605E-05		
300,0	1,0205E-03	0,067417225	6,8799E-05	0,084674035	8,6410E-05		
300,5	1,2450E-03	0,067992962	8,4651E-05	0,084981824	1,0580E-04		
301,0	1,9300E-03	0,068561482	1,3232E-04	0,085281455	1,6459E-04		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
301,5	2,6914E-03	0,06912301	1,8604E-04	0,085573156	2,3031E-04		
302,0	2,9209E-03	0,069677767	2,0352E-04	0,085857155	2,5078E-04		
302,5	4,2840E-03	0,070225972	3,0085E-04	0,086133674	3,6900E-04		
303,0	7,0945E-03	0,070767844	5,0206E-04	0,086402938	6,1299E-04		
303,5	8,9795E-03	0,071303597	6,4027E-04	0,086665166	7,7821E-04		
304,0	9,4701E-03	0,071833447	6,8027E-04	0,086920577	8,2315E-04		
304,5	1,1953E-02	0,072357604	8,6489E-04	0,087169391	1,0419E-03		
305,0	1,6463E-02	0,072876281	1,1998E-03	0,087411821	1,4391E-03		
305,5	1,8719E-02	0,073389685	1,3738E-03	0,087648083	1,6407E-03		
306,0	1,8577E-02	0,073898023	1,3728E-03	0,087878389	1,6325E-03		
306,5	2,1108E-02	0,0744015	1,5705E-03	0,088102949	1,8597E-03		
307,0	2,7849E-02	0,074900318	2,0859E-03	0,088321973	2,4597E-03		
307,5	3,5635E-02	0,07539468	2,6867E-03	0,088535667	3,1550E-03		
308,0	3,7837E-02	0,075884783	2,8713E-03	0,088744238	3,3578E-03		
308,5	4,1430E-02	0,076370826	3,1640E-03	0,088947889	3,6851E-03		
309,0	4,0534E-02	0,076853004	3,1152E-03	0,089146822	3,6135E-03		
309,5	4,3306E-02	0,07733151	3,3489E-03	0,089341238	3,8690E-03		
310,0	5,0939E-02	0,077806538	3,9634E-03	0,089531335	4,5606E-03		
310,5	6,5540E-02	0,078278276	5,1304E-03	0,089717311	5,8801E-03		
311,0	8,2922E-02	0,078746912	6,5299E-03	0,08989936	7,4546E-03		
311,5	8,4080E-02	0,079212634	6,6602E-03	0,090077677	7,5737E-03		
312,0	9,3376E-02	0,079675626	7,4398E-03	0,090252453	8,4274E-03		
312,5	9,8984E-02	0,080136069	7,9322E-03	0,090423878	8,9505E-03		
313,0	1,0733E-01	0,080594145	8,6502E-03	0,090592141	9,7233E-03		
313,5	1,0757E-01	0,081050033	8,7186E-03	0,090757429	9,7628E-03		
314,0	1,1969E-01	0,08150391	9,7552E-03	0,090919927	1,0882E-02		
314,5	1,3060E-01	0,081955951	1,0703E-02	0,091079817	1,1895E-02		
315,0	1,3625E-01	0,082406328	1,1228E-02	0,091237282	1,2431E-02		
315,5	1,1838E-01	0,082855215	9,8084E-03	0,091392502	1,0819E-02		
316,0	1,2348E-01	0,08330278	1,0286E-02	0,091545654	1,1304E-02		
316,5	1,5036E-01	0,083749192	1,2593E-02	0,091696915	1,3788E-02		
317,0	1,7158E-01	0,084194615	1,4446E-02	0,09184646	1,5759E-02		
317,5	1,8245E-01	0,084639214	1,5442E-02	0,091994462	1,6784E-02		
318,0	1,7594E-01	0,085083152	1,4970E-02	0,092141093	1,6211E-02		
318,5	1,8591E-01	0,085526589	1,5900E-02	0,092286522	1,7157E-02		
319,0	2,0470E-01	0,085969683	1,7598E-02	0,092430916	1,8921E-02		
319,5	1,9589E-01	0,086412591	1,6927E-02	0,092574443	1,8134E-02		
320,0	2,0527E-01	0,086855467	1,7829E-02	0,092717266	1,9032E-02		
320,5	2,4525E-01	0,087298465	2,1410E-02	0,092859549	2,2774E-02		
321,0	2,5024E-01	0,087741737	2,1956E-02	0,093001453	2,3273E-02		
321,5	2,3843E-01	0,08818543	2,1026E-02	0,093143136	2,2208E-02		
322,0	2,2203E-01	0,088629692	1,9678E-02	0,093284758	2,0712E-02		
322,5	2,1709E-01	0,08907467	1,9337E-02	0,093426472	2,0282E-02		
323,0	2,1226E-01	0,089520506	1,9002E-02	0,093568435	1,9861E-02		
323,5	2,4861E-01	0,089967343	2,2367E-02	0,093710798	2,3297E-02		
324,0	2,7537E-01	0,090415321	2,4898E-02	0,093853712	2,5844E-02		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
324,5	2,8321E-01	0,090864577	2,5734E-02	0,093997327	2,6621E-02		
325,0	2,7894E-01	0,091315248	2,5471E-02	0,094141789	2,6260E-02		
325,5	3,2436E-01	0,091767469	2,9766E-02	0,094287245	3,0583E-02		
326,0	3,8120E-01	0,092221371	3,5155E-02	0,094433839	3,5998E-02		
326,5	4,0722E-01	0,092677087	3,7740E-02	0,094581712	3,8516E-02		
327,0	3,9806E-01	0,093134744	3,7073E-02	0,094731005	3,7709E-02		
327,5	3,8465E-01	0,09359447	3,6001E-02	0,094881858	3,6496E-02		
328,0	3,5116E-01	0,094056389	3,3029E-02	0,095034407	3,3372E-02		
328,5	3,7164E-01	0,094520626	3,5128E-02	0,095188788	3,5376E-02		
329,0	4,2235E-01	0,094987302	4,0118E-02	0,095345134	4,0269E-02		
329,5	4,6878E-01	0,095456535	4,4748E-02	0,095503578	4,4770E-02		
330,0	4,7139E-01	0,095928445	4,5220E-02	0,09566425	4,5095E-02		
330,5	4,2800E-01	0,096403147	4,1261E-02	0,095827278	4,1014E-02		
331,0	4,0262E-01	0,096880755	3,9006E-02	0,09599279	3,8649E-02		
331,5	4,1806E-01	0,097361381	4,0703E-02	0,09616091	4,0201E-02		
332,0	4,3623E-01	0,097845136	4,2683E-02	0,096331762	4,2023E-02		
332,5	4,3919E-01	0,098332128	4,3186E-02	0,096505468	4,2384E-02		
333,0	4,2944E-01	0,098822463	4,2438E-02	0,096682148	4,1519E-02		
333,5	4,0724E-01	0,099316248	4,0446E-02	0,09686192	3,9446E-02		
334,0	4,1497E-01	0,099813584	4,1420E-02	0,0970449	4,0271E-02		
334,5	4,4509E-01	0,100314572	4,4649E-02	0,097231205	4,3277E-02		
335,0	4,6388E-01	0,100819313	4,6768E-02	0,097420946	4,5192E-02		
335,5	4,5313E-01	0,101327903	4,5915E-02	0,097614236	4,4232E-02		
336,0	4,1519E-01	0,101840437	4,2283E-02	0,097811183	4,0610E-02		
336,5	3,8214E-01	0,102357011	3,9115E-02	0,098011897	3,7454E-02		
337,0	3,7380E-01	0,102877714	3,8456E-02	0,098216484	3,6713E-02		
337,5	4,0051E-01	0,103402638	4,1414E-02	0,098425048	3,9420E-02		
338,0	4,3411E-01	0,103931871	4,5118E-02	0,098637693	4,2820E-02		
338,5	4,5527E-01	0,104465498	4,7560E-02	0,098854518	4,5005E-02		
339,0	4,6355E-01	0,105003605	4,8674E-02	0,099075625	4,5927E-02		
339,5	4,7446E-01	0,105546274	5,0077E-02	0,099301111	4,7114E-02		
340,0	5,0180E-01	0,106093585	5,3238E-02	0,099531071	4,9945E-02		
340,5	5,0071E-01	0,106645617	5,3399E-02	0,099765601	4,9954E-02		
341,0	4,7139E-01	0,107202449	5,0534E-02	0,100004793	4,7141E-02		
341,5	4,6935E-01	0,107764153	5,0579E-02	0,100248738	4,7052E-02		
342,0	4,8934E-01	0,108330805	5,3011E-02	0,100497525	4,9177E-02		
342,5	5,0767E-01	0,108902476	5,5287E-02	0,100751242	5,1148E-02		
343,0	5,1489E-01	0,109479234	5,6370E-02	0,101009975	5,2009E-02		
343,5	4,8609E-01	0,110061148	5,3500E-02	0,101273808	4,9228E-02		
344,0	4,1843E-01	0,110648284	4,6299E-02	0,101542822	4,2489E-02		
344,5	4,0307E-01	0,111240706	4,4838E-02	0,1018171	4,1039E-02		
345,0	4,5898E-01	0,111838476	5,1332E-02	0,102096719	4,6860E-02		
345,5	4,8932E-01	0,112441654	5,5020E-02	0,102381758	5,0097E-02		
346,0	4,7778E-01	0,113050299	5,4013E-02	0,102672292	4,9055E-02		
346,5	4,8657E-01	0,113664468	5,5306E-02	0,102968394	5,0101E-02		
347,0	4,9404E-01	0,114284215	5,6461E-02	0,103270138	5,1020E-02		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
347,5	4,7674E-01	0,114909594	5,4782E-02	0,103577592	4,9380E-02	0,0000354713	1,69E-05
348,0	4,7511E-01	0,115540655	5,4895E-02	0,103890827	4,9360E-02	0,0001474759	7,01E-05
348,5	4,8336E-01	0,116177447	5,6156E-02	0,104209908	5,0371E-02	0,0003023213	1,46E-04
349,0	4,6564E-01	0,116820019	5,4396E-02	0,104534902	4,8676E-02	0,0004745862	2,21E-04
349,5	4,7805E-01	0,117468415	5,6156E-02	0,104865873	5,0131E-02	0,0006449735	3,08E-04
350,0	5,2798E-01	0,11812268	6,2366E-02	0,105202881	5,5545E-02	0,0007994687	4,22E-04
350,5	5,6741E-01	0,118782855	6,7399E-02	0,105545987	5,9888E-02	0,0009287288	5,27E-04
351,0	5,5172E-01	0,11944898	6,5902E-02	0,10589525	5,8425E-02	0,0010271734	5,67E-04
351,5	5,3022E-01	0,120121093	6,3691E-02	0,106250726	5,6336E-02	0,0010927161	5,79E-04
352,0	5,1791E-01	0,120799231	6,2563E-02	0,10661247	5,5216E-02	0,0011258265	5,83E-04
352,5	4,8962E-01	0,121483427	5,9481E-02	0,106980537	5,2380E-02	0,0011292165	5,53E-04
353,0	5,2040E-01	0,122173716	6,3579E-02	0,107354977	5,5868E-02	0,0011070659	5,76E-04
353,5	5,7228E-01	0,122870127	7,0316E-02	0,10773584	6,1655E-02	0,0010649031	6,09E-04
354,0	6,0498E-01	0,123572688	7,4759E-02	0,108123175	6,5412E-02	0,0010088747	6,10E-04
354,5	6,1156E-01	0,124281428	7,6006E-02	0,108517028	6,6365E-02	0,0009456119	5,78E-04
355,0	6,1140E-01	0,124996372	7,6423E-02	0,108917443	6,6592E-02	0,0008815443	5,39E-04
355,5	5,9028E-01	0,125717542	7,4209E-02	0,109324465	6,4532E-02	0,0008230796	4,86E-04
356,0	5,5387E-01	0,12644496	7,0034E-02	0,109738134	6,0781E-02	0,0007758802	4,30E-04
356,5	5,1942E-01	0,127178646	6,6059E-02	0,11015849	5,7219E-02	0,0007449752	3,87E-04
357,0	4,5673E-01	0,127918618	5,8424E-02	0,110585571	5,0508E-02	0,0007344326	3,35E-04
357,5	4,6215E-01	0,128664891	5,9462E-02	0,111019414	5,1308E-02	0,0007472700	3,45E-04
358,0	4,3006E-01	0,12941748	5,5657E-02	0,111460052	4,7935E-02	0,0007853648	3,38E-04
358,5	3,9926E-01	0,130176396	5,1974E-02	0,111907519	4,4680E-02	0,0008493206	3,39E-04
359,0	4,6953E-01	0,13094165	6,1481E-02	0,112361845	5,2757E-02	0,0009387350	4,41E-04
359,5	5,6549E-01	0,131713251	7,4483E-02	0,112823061	6,3800E-02	0,0010519018	5,95E-04
360,0	5,9817E-01	0,132491206	7,9252E-02	0,113291194	6,7767E-02	0,0011860793	7,09E-04
360,5	5,6531E-01	0,133275518	7,5342E-02	0,113766269	6,4313E-02	0,0013375795	7,56E-04
361,0	5,2024E-01	0,134066191	6,9747E-02	0,114248311	5,9437E-02	0,0015019467	7,81E-04
361,5	5,0956E-01	0,134863227	6,8721E-02	0,114737343	5,8466E-02	0,0016741073	8,53E-04
362,0	5,3420E-01	0,135666623	7,2473E-02	0,115233386	6,1558E-02	0,0018487414	9,88E-04
362,5	5,8510E-01	0,136476379	7,9852E-02	0,115736458	6,7717E-02	0,0020203432	1,18E-03
363,0	6,0191E-01	0,137292489	8,2638E-02	0,116246578	6,9970E-02	0,0021838909	1,31E-03
363,5	5,8541E-01	0,138114946	8,0854E-02	0,11676376	6,8355E-02	0,0023349216	1,37E-03
364,0	6,0628E-01	0,138943744	8,4239E-02	0,117288019	7,1109E-02	0,0024700975	1,50E-03
364,5	6,0058E-01	0,139778871	8,3948E-02	0,117819367	7,0760E-02	0,0025876006	1,55E-03
365,0	6,2359E-01	0,140620316	8,7689E-02	0,118357815	7,3807E-02	0,0026876470	1,68E-03
365,5	6,8628E-01	0,141468065	9,7087E-02	0,118903372	8,1601E-02	0,0027732020	1,90E-03
366,0	7,3532E-01	0,142322103	1,0465E-01	0,119456045	8,7838E-02	0,0028502038	2,10E-03
366,5	7,3658E-01	0,143182413	1,0547E-01	0,120015838	8,8401E-02	0,0029286211	2,16E-03
367,0	7,2285E-01	0,144048974	1,0413E-01	0,120582757	8,7163E-02	0,0030227071	2,18E-03
367,5	7,0914E-01	0,144921765	1,0277E-01	0,121156803	8,5917E-02	0,0031519970	2,24E-03
368,0	6,6759E-01	0,145800765	9,7335E-02	0,121737976	8,1271E-02	0,0033420539	2,23E-03
368,5	6,6310E-01	0,146685948	9,7267E-02	0,122326276	8,1115E-02	0,0036250791	2,40E-03
369,0	6,9315E-01	0,147577287	1,0229E-01	0,122921698	8,5203E-02	0,0040409258	2,80E-03
369,5	7,4469E-01	0,148474754	1,1057E-01	0,123524239	9,1987E-02	0,0046379035	3,45E-03
370,0	7,5507E-01	0,149378318	1,1279E-01	0,124133891	9,3730E-02	0,0054737022	4,13E-03

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
370,5	6,8261E-01	0,150287947	1,0259E-01	0,124750646	8,5156E-02	0,0066164648	4,52E-03
371,0	6,9338E-01	0,151203607	1,0484E-01	0,125374496	8,6932E-02	0,012635881	8,76E-03
371,5	7,2051E-01	0,152125263	1,0961E-01	0,126005426	9,0788E-02	0,016553938	1,19E-02
372,0	6,7444E-01	0,153052875	1,0322E-01	0,126643426	8,5413E-02	0,020780204	1,40E-02
372,5	6,4253E-01	0,153986406	9,8941E-02	0,127288479	8,1787E-02	0,025248367	1,62E-02
373,0	6,1886E-01	0,154925812	9,5877E-02	0,127940569	7,9177E-02	0,029899481	1,85E-02
373,5	5,5786E-01	0,155871051	8,6954E-02	0,128599677	7,1741E-02	0,03468159	1,93E-02
374,0	5,5640E-01	0,156822078	8,7256E-02	0,129265783	7,1923E-02	0,03954934	2,20E-02
374,5	5,5227E-01	0,157778846	8,7137E-02	0,129938865	7,1761E-02	0,044463585	2,46E-02
375,0	5,8930E-01	0,158741305	9,3546E-02	0,130618899	7,6974E-02	0,049391009	2,91E-02
375,5	6,5162E-01	0,159709405	1,0407E-01	0,131305861	8,5562E-02	0,054303741	3,54E-02
376,0	6,7480E-01	0,160683093	1,0843E-01	0,131999723	8,9073E-02	0,059178961	3,99E-02
376,5	6,6390E-01	0,161662315	1,0733E-01	0,132700457	8,8100E-02	0,063998517	4,25E-02
377,0	7,1225E-01	0,162647015	1,1585E-01	0,133408031	9,5020E-02	0,068748545	4,90E-02
377,5	7,9455E-01	0,163637134	1,3002E-01	0,134122414	1,0657E-01	0,073419071	5,83E-02
378,0	8,5595E-01	0,164632612	1,4092E-01	0,134843573	1,1542E-01	0,078003634	6,68E-02
378,5	8,3418E-01	0,165633388	1,3817E-01	0,13557147	1,1309E-01	0,082498898	6,88E-02
379,0	7,4389E-01	0,166639397	1,2396E-01	0,13630607	1,0140E-01	0,086904263	6,46E-02
379,5	6,6683E-01	0,167650575	1,1179E-01	0,137047333	9,1387E-02	0,091221479	6,08E-02
380,0	7,0077E-01	0,168666853	1,1820E-01	0,137795218	9,6563E-02	0,095454265	6,69E-02
380,5	7,5075E-01	0,169688162	1,2739E-01	0,138549684	1,0402E-01	0,099607916	7,48E-02
381,0	7,6383E-01	0,170714432	1,3040E-01	0,139310685	1,0641E-01	0,103688917	7,92E-02
381,5	6,8837E-01	0,17174559	1,1822E-01	0,140078176	9,6426E-02	0,107704565	7,41E-02
382,0	5,8678E-01	0,172781559	1,0138E-01	0,140852109	8,2649E-02	0,111662574	6,55E-02
382,5	5,0762E-01	0,173822265	8,8236E-02	0,141632436	7,1895E-02	0,115570694	5,87E-02
383,0	4,5499E-01	0,174867628	7,9563E-02	0,142419105	6,4799E-02	0,119436314	5,43E-02
383,5	4,4049E-01	0,175917567	7,7490E-02	0,143212063	6,3083E-02	0,123266101	5,43E-02
384,0	5,0968E-01	0,176972002	9,0199E-02	0,144011257	7,3400E-02	0,127065578	6,48E-02
384,5	6,1359E-01	0,178030846	1,0924E-01	0,144816629	8,8858E-02	0,130838771	8,03E-02
385,0	6,7355E-01	0,179094016	1,2063E-01	0,145628123	9,8088E-02	0,134587804	9,07E-02
385,5	6,4363E-01	0,180161422	1,1596E-01	0,146445679	9,4257E-02	0,138312515	8,90E-02
386,0	6,2100E-01	0,181232975	1,1255E-01	0,147269235	9,1454E-02	0,142010073	8,82E-02
386,5	6,4570E-01	0,182308584	1,1772E-01	0,148098728	9,5627E-02	0,145674593	9,41E-02
387,0	6,5147E-01	0,183388155	1,1947E-01	0,148934095	9,7026E-02	0,149296747	9,73E-02
387,5	6,4204E-01	0,184471593	1,1844E-01	0,149775268	9,6162E-02	0,152863378	9,81E-02
388,0	6,3582E-01	0,185558802	1,1798E-01	0,150622179	9,5769E-02	0,156357111	9,94E-02
388,5	6,3136E-01	0,186649681	1,1784E-01	0,151474759	9,5635E-02	0,159755974	1,01E-01
389,0	6,8543E-01	0,187744131	1,2869E-01	0,152332936	1,0441E-01	0,163033007	1,12E-01
389,5	7,5970E-01	0,188842048	1,4346E-01	0,153196637	1,1638E-01	0,166155874	1,26E-01
390,0	7,9699E-01	0,189943329	1,5138E-01	0,154065787	1,2279E-01	0,16908648	1,35E-01
390,5	8,0371E-01	0,191047866	1,5355E-01	0,15494031	1,2453E-01	0,171780586	1,38E-01
391,0	8,5138E-01	0,192155553	1,6360E-01	0,155820126	1,3266E-01	0,17418742	1,48E-01
391,5	8,6344E-01	0,193266278	1,6687E-01	0,156705157	1,3531E-01	0,176249288	1,52E-01
392,0	7,9493E-01	0,194379929	1,5452E-01	0,15759532	1,2528E-01	0,177901192	1,41E-01
392,5	6,6257E-01	0,195496394	1,2953E-01	0,158490531	1,0501E-01	0,179070449	1,19E-01
393,0	4,7975E-01	0,196615557	9,4326E-02	0,159390707	7,6468E-02	0,179676287	8,62E-02

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
393,5	3,8152E-01	0,1977373	7,5441E-02	0,160295759	6,1156E-02	0,179629482	6,85E-02
394,0	4,9567E-01	0,198861503	9,8570E-02	0,161205599	7,9905E-02	0,181343386	8,99E-02
394,5	6,8385E-01	0,199988047	1,3676E-01	0,162120137	1,1087E-01	0,18235177	1,25E-01
395,0	8,0772E-01	0,201116806	1,6245E-01	0,163039281	1,3169E-01	0,183346188	1,48E-01
395,5	8,6038E-01	0,202247658	1,7401E-01	0,163962937	1,4107E-01	0,184326975	1,59E-01
396,0	7,5655E-01	0,203380475	1,5387E-01	0,16489101	1,2475E-01	0,185294462	1,40E-01
396,5	5,5017E-01	0,204515129	1,1252E-01	0,165823402	9,1231E-02	0,186248972	1,02E-01
397,0	4,2619E-01	0,205651489	8,7647E-02	0,166760015	7,1071E-02	0,187190827	7,98E-02
397,5	6,2945E-01	0,206789423	1,3016E-01	0,167700747	1,0556E-01	0,188120341	1,18E-01
398,0	8,5249E-01	0,207928797	1,7726E-01	0,168645498	1,4377E-01	0,189037824	1,61E-01
398,5	1,0069E+00	0,209069474	2,1051E-01	0,169594163	1,7076E-01	0,189943581	1,91E-01
399,0	1,0693E+00	0,210211318	2,2478E-01	0,170546635	1,8237E-01	0,190837912	2,04E-01
399,5	1,1021E+00	0,211354189	2,3293E-01	0,171502809	1,8901E-01	0,191721112	2,11E-01
400,0	1,1141E+00	0,212497944	2,3674E-01	0,172462573	1,9214E-01	0,192593471	2,15E-01
401,0	1,1603E+00	0,214787535	2,4922E-01	0,174392433	2,0235E-01	0,194306807	2,25E-01
402,0	1,2061E+00	0,217078921	2,6182E-01	0,176335307	2,1268E-01	0,195980146	2,36E-01
403,0	1,1613E+00	0,219370903	2,5476E-01	0,17829026	2,0705E-01	0,197615641	2,29E-01
404,0	1,1801E+00	0,221662255	2,6158E-01	0,180256331	2,1272E-01	0,199215373	2,35E-01
405,0	1,1511E+00	0,223951717	2,5779E-01	0,182232531	2,0977E-01	0,200781348	2,31E-01
406,0	1,1227E+00	0,226238001	2,5400E-01	0,184217843	2,0682E-01	0,202315503	2,27E-01
407,0	1,1026E+00	0,228519791	2,5197E-01	0,186211222	2,0532E-01	0,203819705	2,25E-01
408,0	1,1514E+00	0,23079574	2,6574E-01	0,188211599	2,1671E-01	0,205295752	2,36E-01
409,0	1,2299E+00	0,233064472	2,8665E-01	0,190217873	2,3395E-01	0,206745374	2,54E-01
410,0	1,0485E+00	0,235324579	2,4674E-01	0,192228918	2,0155E-01	0,208170237	2,18E-01
411,0	1,1738E+00	0,237574626	2,7887E-01	0,194243583	2,2800E-01	0,20957194	2,46E-01
412,0	1,2478E+00	0,239813148	2,9924E-01	0,196260685	2,4489E-01	0,210952021	2,63E-01
413,0	1,1971E+00	0,242038651	2,8974E-01	0,198279016	2,3736E-01	0,212311951	2,54E-01
414,0	1,1842E+00	0,244249608	2,8924E-01	0,200297341	2,3719E-01	0,213653144	2,53E-01
415,0	1,2258E+00	0,246444466	3,0209E-01	0,202314398	2,4800E-01	0,214976951	2,64E-01
416,0	1,2624E+00	0,248621641	3,1386E-01	0,204328895	2,5794E-01	0,216284666	2,73E-01
417,0	1,2312E+00	0,250779519	3,0876E-01	0,206339515	2,5405E-01	0,217577524	2,68E-01
418,0	1,1777E+00	0,252916457	2,9786E-01	0,208344914	2,4537E-01	0,218856704	2,58E-01
419,0	1,2258E+00	0,255030783	3,1262E-01	0,210343718	2,5784E-01	0,220123327	2,70E-01
420,0	1,1232E+00	0,257120793	2,8880E-01	0,212334529	2,3849E-01	0,221378463	2,49E-01
421,0	1,2757E+00	0,259184756	3,3064E-01	0,214315918	2,7340E-01	0,222623125	2,84E-01
422,0	1,2583E+00	0,26122091	3,2869E-01	0,216286433	2,7215E-01	0,223858277	2,82E-01
423,0	1,2184E+00	0,263227463	3,2072E-01	0,21824459	2,6591E-01	0,22508483	2,74E-01
424,0	1,2117E+00	0,265202595	3,2135E-01	0,220188881	2,6680E-01	0,226303645	2,74E-01
425,0	1,2488E+00	0,267144456	3,3361E-01	0,222117769	2,7738E-01	0,227515534	2,84E-01
426,0	1,2135E+00	0,269051163	3,2649E-01	0,224029691	2,7186E-01	0,228721261	2,78E-01
427,0	1,1724E+00	0,270920809	3,1763E-01	0,225923054	2,6487E-01	0,229921542	2,70E-01
428,0	1,1839E+00	0,272751452	3,2291E-01	0,227796242	2,6969E-01	0,23111705	2,74E-01
429,0	1,0963E+00	0,274541125	3,0098E-01	0,229647606	2,5176E-01	0,23230841	2,55E-01
430,0	8,7462E-01	0,276287829	2,4165E-01	0,231475475	2,0245E-01	0,233496205	2,04E-01
431,0	7,9394E-01	0,277989534	2,2071E-01	0,233278148	1,8521E-01	0,234680975	1,86E-01
432,0	1,3207E+00	0,279644183	3,6933E-01	0,235053895	3,1044E-01	0,235863216	3,12E-01

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt Wm ⁻² .nm ⁻¹	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}
433,0	1,2288E+00	0,281249688	3,4560E-01	0,236800963	2,9098E-01	0,237043387	2,91E-01
434,0	1,1352E+00	0,282803932	3,2104E-01	0,238517568	2,7077E-01	0,238221904	2,70E-01
435,0	1,2452E+00	0,284304767	3,5402E-01	0,2402019	2,9910E-01	0,239399144	2,98E-01
436,0	1,3659E+00	0,285750019	3,9031E-01	0,241852122	3,3035E-01	0,24057545	3,29E-01
437,0	1,3943E+00	0,287137479	4,0036E-01	0,243466368	3,3947E-01	0,241751124	3,37E-01
438,0	1,2238E+00	0,288464912	3,5302E-01	0,245042746	2,9988E-01	0,242926433	2,97E-01
439,0	1,1775E+00	0,289730054	3,4116E-01	0,246579338	2,9035E-01	0,24410161	2,87E-01
440,0	1,3499E+00	0,290930608	3,9273E-01	0,248074195	3,3488E-01	0,245276854	3,31E-01
441,0	1,3313E+00	0,29206425	3,8883E-01	0,249525344	3,3219E-01	0,246452329	3,28E-01
442,0	1,4250E+00	0,293128625	4,1771E-01	0,250930782	3,5758E-01	0,247628169	3,53E-01
443,0	1,4453E+00	0,29412135	4,2509E-01	0,252288482	3,6463E-01	0,248804475	3,60E-01
444,0	1,4084E+00	0,295040011	4,1553E-01	0,253596385	3,5717E-01	0,249981318	3,52E-01
445,0	1,4619E+00	0,295882165	4,3255E-01	0,25485241	3,7257E-01	0,251158741	3,67E-01
446,0	1,3108E+00	0,296645338	3,8884E-01	0,256054443	3,3564E-01	0,252336755	3,31E-01
447,0	1,4903E+00	0,297327029	4,4311E-01	0,257200347	3,8331E-01	0,253515348	3,78E-01
448,0	1,5081E+00	0,297924704	4,4930E-01	0,258287957	3,8952E-01	0,254694476	3,84E-01
449,0	1,5045E+00	0,298435803	4,4900E-01	0,259315078	3,9014E-01	0,255874073	3,85E-01
450,0	1,5595E+00	0,298857734	4,6607E-01	0,26027949	4,0591E-01	0,257054045	4,01E-01
451,0	1,6173E+00	0,310013053	5,0138E-01	0,266077468	4,3033E-01	0,258234275	4,18E-01
452,0	1,5482E+00	0,311447248	4,8218E-01	0,267663419	4,1440E-01	0,259414623	4,02E-01
453,0	1,4297E+00	0,312875186	4,4732E-01	0,26924247	3,8494E-01	0,260594925	3,73E-01
454,0	1,5335E+00	0,314296897	4,8197E-01	0,270814646	4,1529E-01	0,261774996	4,01E-01
455,0	1,5224E+00	0,315712409	4,8064E-01	0,272379969	4,1467E-01	0,262954629	4,00E-01
456,0	1,5724E+00	0,317121749	4,9864E-01	0,273938464	4,3074E-01	0,264133597	4,15E-01
457,0	1,5854E+00	0,318524946	5,0499E-01	0,275490154	4,3676E-01	0,265311655	4,21E-01
458,0	1,5514E+00	0,319922029	4,9633E-01	0,277035064	4,2979E-01	0,266488537	4,13E-01
459,0	1,5391E+00	0,321313025	4,9453E-01	0,278573216	4,2875E-01	0,26766396	4,12E-01
460,0	1,5291E+00	0,322697963	4,9344E-01	0,280104634	4,2831E-01	0,268837624	4,11E-01
461,0	1,5827E+00	0,324076872	5,1292E-01	0,281629342	4,4573E-01	0,270009213	4,27E-01
462,0	1,5975E+00	0,325449779	5,1991E-01	0,283147364	4,5233E-01	0,271178393	4,33E-01
463,0	1,6031E+00	0,326816712	5,2392E-01	0,284658724	4,5634E-01	0,272344819	4,37E-01
464,0	1,5544E+00	0,3281777	5,1012E-01	0,286163444	4,4481E-01	0,273508127	4,25E-01
465,0	1,5350E+00	0,329532772	5,0583E-01	0,287661549	4,4156E-01	0,274667943	4,22E-01
466,0	1,5673E+00	0,330881955	5,1859E-01	0,289153063	4,5319E-01	0,275823879	4,32E-01
467,0	1,4973E+00	0,332225278	4,9744E-01	0,290638009	4,3517E-01	0,276975534	4,15E-01
468,0	1,5619E+00	0,33356277	5,2099E-01	0,29211641	4,5626E-01	0,278122497	4,34E-01
469,0	1,5682E+00	0,334894457	5,2518E-01	0,293588291	4,6041E-01	0,279264345	4,38E-01
470,0	1,5077E+00	0,336220369	5,0692E-01	0,295053676	4,4485E-01	0,280400645	4,23E-01
471,0	1,5331E+00	0,337540534	5,1748E-01	0,296512587	4,5458E-01	0,281530957	4,32E-01
472,0	1,6126E+00	0,338854981	5,4644E-01	0,297965048	4,8050E-01	0,282654827	4,56E-01
473,0	1,5499E+00	0,340163737	5,2722E-01	0,299411084	4,6406E-01	0,283771798	4,40E-01
474,0	1,5671E+00	0,34146683	5,3511E-01	0,300850718	4,7146E-01	0,284881403	4,46E-01
475,0	1,6185E+00	0,34276429	5,5476E-01	0,302283973	4,8925E-01	0,285983169	4,63E-01
476,0	1,5631E+00	0,344056144	5,3779E-01	0,303710874	4,7473E-01	0,287076614	4,49E-01
477,0	1,5724E+00	0,34534242	5,4302E-01	0,305131444	4,7979E-01	0,288161254	4,53E-01
478,0	1,6230E+00	0,346623148	5,6257E-01	0,306545706	4,9752E-01	0,289236599	4,69E-01

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt Wm ⁻² .nm ⁻¹	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}
479,0	1,5916E+00	0,347898354	5,5372E-01	0,307953684	4,9014E-01	0,290302152	4,62E-01
480,0	1,6181E+00	0,349168068	5,6499E-01	0,309355403	5,0057E-01	0,291357415	4,71E-01
481,0	1,6177E+00	0,350432318	5,6689E-01	0,310750885	5,0270E-01	0,292401885	4,73E-01
482,0	1,6236E+00	0,351691132	5,7101E-01	0,312140155	5,0679E-01	0,293435058	4,76E-01
483,0	1,6038E+00	0,352944538	5,6605E-01	0,313523236	5,0283E-01	0,294456424	4,72E-01
484,0	1,5734E+00	0,354192564	5,5729E-01	0,314900151	4,9546E-01	0,295465476	4,65E-01
485,0	1,5683E+00	0,355435239	5,5743E-01	0,316270925	4,9601E-01	0,296461703	4,65E-01
486,0	1,2716E+00	0,356672592	4,5354E-01	0,317635581	4,0391E-01	0,297444593	3,78E-01
487,0	1,4241E+00	0,357904649	5,0969E-01	0,318994143	4,5428E-01	0,298413635	4,25E-01
488,0	1,5413E+00	0,359131441	5,5353E-01	0,320346634	4,9375E-01	0,299368319	4,61E-01
489,0	1,4519E+00	0,360352994	5,2320E-01	0,321693079	4,6707E-01	0,300308134	4,36E-01
490,0	1,6224E+00	0,361569337	5,8661E-01	0,3230335	5,2409E-01	0,301232573	4,89E-01
491,0	1,5595E+00	0,362780499	5,6576E-01	0,324367922	5,0585E-01	0,302141127	4,71E-01
492,0	1,4869E+00	0,363986508	5,4121E-01	0,325696368	4,8428E-01	0,303033293	4,51E-01
493,0	1,5903E+00	0,365187392	5,8076E-01	0,327018862	5,2006E-01	0,303908568	4,83E-01
494,0	1,5525E+00	0,366383179	5,6881E-01	0,328335428	5,0974E-01	0,304766455	4,73E-01
495,0	1,6485E+00	0,367573897	6,0595E-01	0,329646089	5,4342E-01	0,305606459	5,04E-01
496,0	1,5676E+00	0,368759576	5,7807E-01	0,330950869	5,1880E-01	0,306428088	4,80E-01
497,0	1,5944E+00	0,369940242	5,8983E-01	0,332249791	5,2974E-01	0,307230858	4,90E-01
498,0	1,5509E+00	0,371115925	5,7556E-01	0,33354288	5,1729E-01	0,308014285	4,78E-01
499,0	1,5507E+00	0,372286653	5,7730E-01	0,334830159	5,1922E-01	0,308777895	4,79E-01
500,0	1,5451E+00	0,373452453	5,7702E-01	0,336111651	5,1933E-01	0,309521217	4,78E-01
501,0	1,4978E+00	0,374613355	5,6110E-01	0,337387381	5,0534E-01	0,310243788	4,65E-01
502,0	1,4966E+00	0,375769387	5,6238E-01	0,338657372	5,0683E-01	0,31094515	4,65E-01
503,0	1,5653E+00	0,376920576	5,8999E-01	0,339921648	5,3208E-01	0,311624853	4,88E-01
504,0	1,4587E+00	0,378066951	5,5149E-01	0,341180232	4,9768E-01	0,312282453	4,56E-01
505,0	1,5635E+00	0,379208541	5,9289E-01	0,342433148	5,3539E-01	0,312917514	4,89E-01
506,0	1,6264E+00	0,380345373	6,1859E-01	0,34368042	5,5896E-01	0,313529609	5,10E-01
507,0	1,5560E+00	0,381477476	5,9358E-01	0,344922072	5,3670E-01	0,314118319	4,89E-01
508,0	1,5165E+00	0,382604878	5,8022E-01	0,346158126	5,2495E-01	0,314683233	4,77E-01
509,0	1,5893E+00	0,383727608	6,0986E-01	0,347388608	5,5210E-01	0,315223949	5,01E-01
510,0	1,5481E+00	0,384845694	5,9578E-01	0,34861354	5,3969E-01	0,315740074	4,89E-01
511,0	1,5769E+00	0,385959163	6,0862E-01	0,349832946	5,5165E-01	0,316231226	4,99E-01
512,0	1,6186E+00	0,387068045	6,2651E-01	0,35104685	5,6820E-01	0,316697032	5,13E-01
513,0	1,5206E+00	0,388172367	5,9025E-01	0,352255276	5,3564E-01	0,317137128	4,82E-01
514,0	1,4885E+00	0,389272158	5,7943E-01	0,353458247	5,2612E-01	0,317551162	4,73E-01
515,0	1,5314E+00	0,390367447	5,9781E-01	0,354655787	5,4312E-01	0,317938792	4,87E-01
516,0	1,5455E+00	0,39145826	6,0500E-01	0,35584792	5,4996E-01	0,318299687	4,92E-01
517,0	1,2594E+00	0,392544628	4,9437E-01	0,357034669	4,4965E-01	0,318633528	4,01E-01
518,0	1,4403E+00	0,393626577	5,6694E-01	0,358216058	5,1594E-01	0,318940006	4,59E-01
519,0	1,3957E+00	0,394704137	5,5089E-01	0,359392111	5,0160E-01	0,319218825	4,46E-01
520,0	1,5236E+00	0,395777335	6,0301E-01	0,360562851	5,4935E-01	0,319469699	4,87E-01
521,0	1,5346E+00	0,3968462	6,0900E-01	0,361728302	5,5511E-01	0,319692357	4,91E-01
522,0	1,5690E+00	0,397910759	6,2432E-01	0,362888487	5,6937E-01	0,319886536	5,02E-01
523,0	1,4789E+00	0,398971043	5,9004E-01	0,364043432	5,3838E-01	0,320051991	4,73E-01
524,0	1,5905E+00	0,400027078	6,3624E-01	0,365193158	5,8084E-01	0,320188484	5,09E-01

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt Wm ⁻² .nm ⁻¹	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}
525,0	1,5781E+00	0,401078892	6,3294E-01	0,36633769	5,7812E-01	0,320295794	5,05E-01
526,0	1,5341E+00	0,402126515	6,1690E-01	0,367477052	5,6375E-01	0,320373712	4,91E-01
527,0	1,3417E+00	0,403169974	5,4093E-01	0,368611267	4,9457E-01	0,320422041	4,30E-01
528,0	1,5357E+00	0,404209299	6,2074E-01	0,369740358	5,6781E-01	0,320440598	4,92E-01
529,0	1,6071E+00	0,405244516	6,5127E-01	0,37086435	5,9602E-01	0,320429213	5,15E-01
530,0	1,5446E+00	0,406275654	6,2753E-01	0,371983267	5,7457E-01	0,320387731	4,95E-01
531,0	1,6292E+00	0,407302742	6,6358E-01	0,373097131	6,0785E-01	0,32031601	5,22E-01
532,0	1,5998E+00	0,408325807	6,5324E-01	0,374205967	5,9865E-01	0,32021392	5,12E-01
533,0	1,4286E+00	0,409344879	5,8479E-01	0,375309798	5,3617E-01	0,320081348	4,57E-01
534,0	1,5302E+00	0,410359985	6,2793E-01	0,376408648	5,7598E-01	0,319918193	4,90E-01
535,0	1,5535E+00	0,411371154	6,3907E-01	0,377502541	5,8645E-01	0,319724369	4,97E-01
536,0	1,6199E+00	0,412378414	6,6801E-01	0,3785915	6,1328E-01	0,319499803	5,18E-01
537,0	1,4989E+00	0,413381793	6,1962E-01	0,379675549	5,6910E-01	0,319244437	4,79E-01
538,0	1,5738E+00	0,414381319	6,5215E-01	0,380754712	5,9923E-01	0,318958229	5,02E-01
539,0	1,5352E+00	0,415377022	6,3769E-01	0,381829012	5,8618E-01	0,318641148	4,89E-01
540,0	1,4825E+00	0,416368928	6,1727E-01	0,382898473	5,6765E-01	0,318293179	4,72E-01
541,0	1,4251E+00	0,417357067	5,9478E-01	0,383963119	5,4719E-01	0,317914323	4,53E-01
542,0	1,5511E+00	0,418341466	6,4889E-01	0,385022973	5,9721E-01	0,317504593	4,92E-01
543,0	1,5256E+00	0,419322154	6,3972E-01	0,38607806	5,8900E-01	0,317064018	4,84E-01
544,0	1,5792E+00	0,420299159	6,6374E-01	0,387128402	6,1135E-01	0,316592641	5,00E-01
545,0	1,5435E+00	0,42127251	6,5023E-01	0,388174023	5,9915E-01	0,316090518	4,88E-01
546,0	1,5291E+00	0,422242234	6,4565E-01	0,389214948	5,9515E-01	0,315557723	4,83E-01
547,0	1,5490E+00	0,42320836	6,5555E-01	0,3902512	6,0450E-01	0,314994341	4,88E-01
548,0	1,5049E+00	0,424170917	6,3833E-01	0,391282802	5,8884E-01	0,314400473	4,73E-01
549,0	1,5520E+00	0,425129932	6,5980E-01	0,392309778	6,0886E-01	0,313776235	4,87E-01
550,0	1,5399E+00	0,426085434	6,5613E-01	0,393332153	6,0569E-01	0,313121754	4,82E-01
551,0	1,5382E+00	0,427037451	6,5687E-01	0,394349949	6,0659E-01	0,312437177	4,81E-01
552,0	1,5697E+00	0,427986011	6,7181E-01	0,39536319	6,2060E-01	0,311722659	4,89E-01
553,0	1,5250E+00	0,428931144	6,5412E-01	0,3963719	6,0447E-01	0,310978373	4,74E-01
554,0	1,5549E+00	0,429872875	6,6841E-01	0,397376103	6,1788E-01	0,310204506	4,82E-01
555,0	1,5634E+00	0,430811236	6,7353E-01	0,398375822	6,2282E-01	0,309401256	4,84E-01
556,0	1,5366E+00	0,431746252	6,6342E-01	0,399371081	6,1367E-01	0,308568839	4,74E-01
557,0	1,4988E+00	0,432677954	6,4850E-01	0,400361903	6,0006E-01	0,307707481	4,61E-01
558,0	1,5310E+00	0,433606368	6,6385E-01	0,401348313	6,1446E-01	0,306817424	4,70E-01
559,0	1,4483E+00	0,434531524	6,2933E-01	0,402330334	5,8270E-01	0,305898922	4,43E-01
560,0	1,4740E+00	0,435453449	6,4186E-01	0,40330799	5,9448E-01	0,304952243	4,49E-01
561,0	1,5595E+00	0,436372172	6,8052E-01	0,404281305	6,3048E-01	0,303977669	4,74E-01
562,0	1,4847E+00	0,437287722	6,4924E-01	0,405250301	6,0168E-01	0,302975494	4,50E-01
563,0	1,5408E+00	0,438200125	6,7518E-01	0,406215003	6,2590E-01	0,301946025	4,65E-01
564,0	1,5106E+00	0,439109412	6,6332E-01	0,407175435	6,1508E-01	0,300889581	4,55E-01
565,0	1,5201E+00	0,440015609	6,6887E-01	0,408131619	6,2040E-01	0,299806496	4,56E-01
566,0	1,4374E+00	0,440918746	6,3378E-01	0,409083581	5,8802E-01	0,298697113	4,29E-01
567,0	1,5320E+00	0,44181885	6,7687E-01	0,410031343	6,2817E-01	0,297561789	4,56E-01
568,0	1,5180E+00	0,44271595	6,7204E-01	0,41097493	6,2386E-01	0,296400894	4,50E-01
569,0	1,4807E+00	0,443610074	6,5685E-01	0,411914364	6,0992E-01	0,295214807	4,37E-01
570,0	1,4816E+00	0,44450125	6,5857E-01	0,41284967	6,1168E-01	0,294003921	4,36E-01

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt Wm ⁻² .nm ⁻¹	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}
571,0	1,4331E+00	0,445389507	6,3829E-01	0,413780871	5,9299E-01	0,292768639	4,20E-01
572,0	1,5134E+00	0,446274873	6,7539E-01	0,414707991	6,2762E-01	0,291509374	4,41E-01
573,0	1,5198E+00	0,447157376	6,7959E-01	0,415631053	6,3168E-01	0,290226552	4,41E-01
574,0	1,5119E+00	0,448037044	6,7739E-01	0,416550082	6,2978E-01	0,288920608	4,37E-01
575,0	1,4777E+00	0,448913907	6,6336E-01	0,417465101	6,1689E-01	0,287591987	4,25E-01
576,0	1,4654E+00	0,449787991	6,5912E-01	0,418376134	6,1309E-01	0,286241145	4,19E-01
577,0	1,5023E+00	0,450659326	6,7703E-01	0,419283204	6,2989E-01	0,284868547	4,28E-01
578,0	1,4560E+00	0,451527939	6,5742E-01	0,420186335	6,1179E-01	0,283474668	4,13E-01
579,0	1,4770E+00	0,452393859	6,6819E-01	0,42108555	6,2194E-01	0,28205999	4,17E-01
580,0	1,5020E+00	0,453257114	6,8079E-01	0,421980875	6,3382E-01	0,280625007	4,21E-01
581,0	1,5089E+00	0,454117732	6,8522E-01	0,422872331	6,3807E-01	0,279170218	4,21E-01
582,0	1,5320E+00	0,454975743	6,9702E-01	0,423759943	6,4920E-01	0,277696132	4,25E-01
583,0	1,5479E+00	0,455831173	7,0558E-01	0,424643734	6,5731E-01	0,276203266	4,28E-01
584,0	1,5448E+00	0,456684051	7,0549E-01	0,425523729	6,5735E-01	0,274692142	4,24E-01
585,0	1,5324E+00	0,457534406	7,0113E-01	0,426399951	6,5342E-01	0,273163292	4,19E-01
586,0	1,4953E+00	0,458382266	6,8542E-01	0,427272423	6,3890E-01	0,271617253	4,06E-01
587,0	1,5281E+00	0,459227658	7,0175E-01	0,428141169	6,5424E-01	0,270054568	4,13E-01
588,0	1,4934E+00	0,460070612	6,8707E-01	0,429006213	6,4068E-01	0,268475787	4,01E-01
589,0	1,2894E+00	0,460911156	5,9430E-01	0,429867579	5,5427E-01	0,266881465	3,44E-01
590,0	1,3709E+00	0,461749318	6,3301E-01	0,430725289	5,9048E-01	0,26527216	3,64E-01
591,0	1,4662E+00	0,462585125	6,7824E-01	0,431579369	6,3278E-01	0,263648438	3,87E-01
592,0	1,4354E+00	0,463418607	6,6519E-01	0,432429842	6,2071E-01	0,262010867	3,76E-01
593,0	1,4561E+00	0,464249792	6,7599E-01	0,43327673	6,3089E-01	0,26036002	3,79E-01
594,0	1,4491E+00	0,465078708	6,7395E-01	0,434120059	6,2908E-01	0,258696472	3,75E-01
595,0	1,4308E+00	0,465905383	6,6662E-01	0,434959852	6,2234E-01	0,257020803	3,68E-01
596,0	1,4745E+00	0,466729846	6,8819E-01	0,435796131	6,4258E-01	0,255333592	3,76E-01
597,0	1,4788E+00	0,467552125	6,9142E-01	0,436628922	6,4569E-01	0,253635423	3,75E-01
598,0	1,4607E+00	0,468372247	6,8415E-01	0,437458248	6,3900E-01	0,251926881	3,68E-01
599,0	1,4606E+00	0,469190242	6,8530E-01	0,438284132	6,4016E-01	0,250208551	3,65E-01
600,0	1,4753E+00	0,470006138	6,9340E-01	0,439106598	6,4781E-01	0,248481018	3,67E-01
601,0	1,4579E+00	0,470819963	6,8641E-01	0,43992567	6,4137E-01	0,246744869	3,60E-01
602,0	1,4360E+00	0,471631745	6,7726E-01	0,440741371	6,3290E-01	0,245000689	3,52E-01
603,0	1,4664E+00	0,472441512	6,9279E-01	0,441553725	6,4749E-01	0,243249062	3,57E-01
604,0	1,4921E+00	0,473249293	7,0614E-01	0,442362757	6,6005E-01	0,241490572	3,60E-01
605,0	1,4895E+00	0,474055116	7,0611E-01	0,443168489	6,6010E-01	0,239725798	3,57E-01
606,0	1,4822E+00	0,47485901	7,0384E-01	0,443970945	6,5805E-01	0,237955318	3,53E-01
607,0	1,4911E+00	0,475661002	7,0926E-01	0,444770148	6,6320E-01	0,236179707	3,52E-01
608,0	1,4862E+00	0,476461121	7,0812E-01	0,445566124	6,6220E-01	0,234399537	3,48E-01
609,0	1,4749E+00	0,477259395	7,0391E-01	0,446358894	6,5833E-01	0,232615373	3,43E-01
610,0	1,4686E+00	0,478055853	7,0207E-01	0,447148484	6,5668E-01	0,230827777	3,39E-01
611,0	1,4611E+00	0,478850522	6,9965E-01	0,447934916	6,5448E-01	0,229037304	3,35E-01
612,0	1,4831E+00	0,479643431	7,1136E-01	0,448718215	6,6549E-01	0,227244505	3,37E-01
613,0	1,4621E+00	0,480434609	7,0244E-01	0,449498403	6,5721E-01	0,225449923	3,30E-01
614,0	1,4176E+00	0,481224083	6,8218E-01	0,450275506	6,3831E-01	0,223654093	3,17E-01
615,0	1,4697E+00	0,482011881	7,0841E-01	0,451049545	6,6291E-01	0,221857543	3,26E-01
616,0	1,4310E+00	0,482798033	6,9088E-01	0,451820546	6,4656E-01	0,220060791	3,15E-01

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt Wm ⁻² .nm ⁻¹	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}
617,0	1,4128E+00	0,483582567	6,8321E-01	0,452588531	6,3942E-01	0,218264348	3,08E-01
618,0	1,4664E+00	0,48436551	7,1027E-01	0,453353525	6,6480E-01	0,216468712	3,17E-01
619,0	1,4733E+00	0,485146891	7,1477E-01	0,45411555	6,6905E-01	0,214674373	3,16E-01
620,0	1,4739E+00	0,485926738	7,1621E-01	0,454874632	6,7044E-01	0,212881808	3,14E-01
621,0	1,4802E+00	0,486705079	7,2042E-01	0,455630793	6,7442E-01	0,211091483	3,12E-01
622,0	1,4269E+00	0,487481944	6,9559E-01	0,456384057	6,5121E-01	0,209303851	2,99E-01
623,0	1,4165E+00	0,488257359	6,9162E-01	0,457134448	6,4753E-01	0,207519351	2,94E-01
624,0	1,4118E+00	0,489031354	6,9041E-01	0,45788199	6,4644E-01	0,205738408	2,90E-01
625,0	1,4026E+00	0,489803956	6,8700E-01	0,458626705	6,4327E-01	0,203961434	2,86E-01
626,0	1,4012E+00	0,490575194	6,8739E-01	0,459368619	6,4367E-01	0,202188823	2,83E-01
627,0	1,4417E+00	0,491345096	7,0837E-01	0,460107754	6,6334E-01	0,200420954	2,89E-01
628,0	1,3631E+00	0,492113691	6,7080E-01	0,460844134	6,2818E-01	0,198658189	2,71E-01
629,0	1,4114E+00	0,492881006	6,9565E-01	0,461577784	6,5147E-01	0,196900871	2,78E-01
630,0	1,3924E+00	0,493647071	6,8735E-01	0,462308726	6,4372E-01	0,195149325	2,72E-01
631,0	1,4161E+00	0,494411912	7,0014E-01	0,463036984	6,5571E-01	0,193403858	2,74E-01
632,0	1,3638E+00	0,495175559	6,7532E-01	0,463762582	6,3248E-01	0,191664756	2,61E-01
633,0	1,4508E+00	0,49593804	7,1951E-01	0,464485544	6,7388E-01	0,189932283	2,76E-01
634,0	1,4284E+00	0,496699383	7,0949E-01	0,465205893	6,6450E-01	0,188206683	2,69E-01
635,0	1,4458E+00	0,497459617	7,1923E-01	0,465923653	6,7363E-01	0,186488176	2,70E-01
636,0	1,4128E+00	0,498218769	7,0388E-01	0,466638848	6,5927E-01	0,18477696	2,61E-01
637,0	1,4610E+00	0,498976868	7,2901E-01	0,467351502	6,8280E-01	0,183073207	2,67E-01
638,0	1,4707E+00	0,499733942	7,3496E-01	0,468061637	6,8838E-01	0,181377066	2,67E-01
639,0	1,4646E+00	0,500490019	7,3302E-01	0,468769278	6,8656E-01	0,17968866	2,63E-01
640,0	1,4340E+00	0,501245129	7,1879E-01	0,469474449	6,7323E-01	0,178008083	2,55E-01
641,0	1,4348E+00	0,501999298	7,2027E-01	0,470177173	6,7461E-01	0,176335404	2,53E-01
642,0	1,4376E+00	0,502752555	7,2276E-01	0,470877473	6,7693E-01	0,174670662	2,51E-01
643,0	1,4525E+00	0,50350493	7,3134E-01	0,471575374	6,8496E-01	0,173013867	2,51E-01
644,0	1,4462E+00	0,504256449	7,2926E-01	0,4722709	6,8300E-01	0,171365001	2,48E-01
645,0	1,4567E+00	0,505007141	7,3564E-01	0,472964073	6,8897E-01	0,16972401	2,47E-01
646,0	1,4150E+00	0,505757034	7,1565E-01	0,473654918	6,7022E-01	0,168090813	2,38E-01
647,0	1,4086E+00	0,506506158	7,1346E-01	0,474343458	6,6816E-01	0,166465293	2,34E-01
648,0	1,3952E+00	0,507254539	7,0772E-01	0,475029717	6,6276E-01	0,164847301	2,30E-01
649,0	1,3519E+00	0,508002206	6,8677E-01	0,475713718	6,4312E-01	0,163236651	2,21E-01
650,0	1,3594E+00	0,508749188	6,9159E-01	0,476395486	6,4761E-01	0,161633123	2,20E-01
651,0	1,4447E+00	0,509495513	7,3607E-01	0,477075044	6,8923E-01	0,16003646	2,31E-01
652,0	1,3871E+00	0,510241209	7,0776E-01	0,477752415	6,6269E-01	0,158446368	2,20E-01
653,0	1,4311E+00	0,510986304	7,3127E-01	0,478427624	6,8468E-01	0,156862511	2,24E-01
654,0	1,4153E+00	0,511730826	7,2425E-01	0,479100694	6,7807E-01	0,155284519	2,20E-01
655,0	1,3499E+00	0,512474805	6,9179E-01	0,479771648	6,4764E-01	0,153711976	2,07E-01
656,0	1,1851E+00	0,513218268	6,0821E-01	0,480440511	5,6937E-01	0,152144427	1,80E-01
657,0	1,2393E+00	0,513961243	6,3695E-01	0,481107306	5,9624E-01	0,150581376	1,87E-01
658,0	1,3855E+00	0,514703759	7,1312E-01	0,481772057	6,6750E-01	0,149022279	2,06E-01
659,0	1,3905E+00	0,515445844	7,1673E-01	0,482434787	6,7083E-01	0,147466551	2,05E-01
660,0	1,3992E+00	0,516187526	7,2225E-01	0,483095521	6,7595E-01	0,145913561	2,04E-01
661,0	1,3933E+00	0,516928834	7,2024E-01	0,483754281	6,7401E-01	0,144362629	2,01E-01
662,0	1,3819E+00	0,517669796	7,1537E-01	0,484411091	6,6941E-01	0,142813029	1,97E-01

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
663,0	1,3844E+00	0,51841044	7,1769E-01	0,485065976	6,7153E-01	0,141263986	1,96E-01
664,0	1,3967E+00	0,519150794	7,2510E-01	0,485718959	6,7840E-01	0,139714674	1,95E-01
665,0	1,4214E+00	0,519890887	7,3897E-01	0,486370063	6,9133E-01	0,138164219	1,96E-01
666,0	1,4203E+00	0,520630746	7,3945E-01	0,487019313	6,9171E-01	0,136611691	1,94E-01
667,0	1,4102E+00	0,521370401	7,3524E-01	0,487666731	6,8771E-01	0,13505611	1,90E-01
668,0	1,4150E+00	0,52210988	7,3879E-01	0,488312342	6,9096E-01	0,133496439	1,89E-01
669,0	1,4394E+00	0,52284921	7,5259E-01	0,48895617	7,0380E-01	0,131931588	1,90E-01
670,0	1,4196E+00	0,52358842	7,4329E-01	0,489598237	6,9503E-01	0,13036041	1,85E-01
671,0	1,4169E+00	0,524327539	7,4292E-01	0,490238568	6,9462E-01	0,128781698	1,82E-01
672,0	1,3972E+00	0,525066594	7,3362E-01	0,490877186	6,8585E-01	0,12719419	1,78E-01
673,0	1,4094E+00	0,525805614	7,4107E-01	0,491514116	6,9274E-01	0,125596561	1,77E-01
674,0	1,4074E+00	0,526544628	7,4106E-01	0,49214938	6,9265E-01	0,123987427	1,74E-01
675,0	1,3958E+00	0,527283662	7,3598E-01	0,492783002	6,8783E-01	0,12236534	1,71E-01
676,0	1,4120E+00	0,528022747	7,4557E-01	0,493415007	6,9670E-01	0,118643906	1,68E-01
677,0	1,3991E+00	0,528761909	7,3979E-01	0,494045417	6,9122E-01	0,116877729	1,64E-01
678,0	1,4066E+00	0,529501178	7,4480E-01	0,494674256	6,9581E-01	0,115102624	1,62E-01
679,0	1,3947E+00	0,530240581	7,3953E-01	0,495301549	6,9080E-01	0,113319946	1,58E-01
680,0	1,3969E+00	0,530980147	7,4173E-01	0,495927319	6,9276E-01	0,111531014	1,56E-01
681,0	1,3915E+00	0,531719904	7,3989E-01	0,496551589	6,9095E-01	0,109737113	1,53E-01
682,0	1,3981E+00	0,532459881	7,4443E-01	0,497174383	6,9510E-01	0,107939494	1,51E-01
683,0	1,3830E+00	0,533200105	7,3742E-01	0,497795726	6,8845E-01	0,106139375	1,47E-01
684,0	1,3739E+00	0,533940605	7,3358E-01	0,498415639	6,8477E-01	0,104337939	1,43E-01
685,0	1,3748E+00	0,534681409	7,3508E-01	0,499034148	6,8607E-01	0,102536336	1,41E-01
686,0	1,3438E+00	0,535422546	7,1950E-01	0,499651276	6,7143E-01	0,100735686	1,35E-01
687,0	9,6824E-01	0,536164044	5,1914E-01	0,500267047	4,8438E-01	0,098937073	9,58E-02
688,0	1,1206E+00	0,53690593	6,0166E-01	0,500881484	5,6129E-01	0,097141553	1,09E-01
689,0	1,1278E+00	0,537648234	6,0636E-01	0,50149461	5,6559E-01	0,095350146	1,08E-01
690,0	1,1821E+00	0,538390984	6,3643E-01	0,502106451	5,9354E-01	0,093563843	1,11E-01
691,0	1,2333E+00	0,539134207	6,6491E-01	0,502717028	6,2000E-01	0,091783606	1,13E-01
692,0	1,2689E+00	0,539877932	6,8505E-01	0,503326367	6,3867E-01	0,090010362	1,14E-01
693,0	1,2609E+00	0,540622188	6,8167E-01	0,503934491	6,3541E-01	0,088245012	1,11E-01
694,0	1,2464E+00	0,541367003	6,7476E-01	0,504541422	6,2886E-01	0,086488423	1,08E-01
695,0	1,2714E+00	0,542112404	6,8924E-01	0,505147186	6,4224E-01	0,084741437	1,08E-01
696,0	1,2684E+00	0,542858421	6,8856E-01	0,505751806	6,4150E-01	0,083004864	1,05E-01
697,0	1,3403E+00	0,543605082	7,2859E-01	0,506355305	6,7867E-01	0,081279484	1,09E-01
698,0	1,3192E+00	0,544352414	7,1811E-01	0,506957707	6,6878E-01	0,079566052	1,05E-01
699,0	1,2918E+00	0,545100446	7,0416E-01	0,507559036	6,5566E-01	0,077865293	1,01E-01
700,0	1,2823E+00	0,545849207	6,9994E-01	0,508159316	6,5161E-01	0,076177903	9,77E-02
701,0	1,2659E+00	0,546598724	6,9194E-01	0,50875857	6,4404E-01	0,074504552	9,43E-02
702,0	1,2674E+00	0,547349026	6,9371E-01	0,509356821	6,4556E-01	0,072845884	9,23E-02
703,0	1,2747E+00	0,548100141	6,9866E-01	0,509954094	6,5004E-01	0,071202514	9,08E-02
704,0	1,3078E+00	0,548852098	7,1779E-01	0,510550413	6,6770E-01	0,069575031	9,10E-02
705,0	1,3214E+00	0,549604925	7,2625E-01	0,5111458	6,7543E-01	0,067964	8,98E-02
706,0	1,3144E+00	0,550358649	7,2339E-01	0,51174028	6,7263E-01	0,066369958	8,72E-02
707,0	1,3090E+00	0,5511133	7,2141E-01	0,512333876	6,7065E-01	0,064793418	8,48E-02
708,0	1,3048E+00	0,551868906	7,2008E-01	0,512926612	6,6927E-01	0,063234867	8,25E-02

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
709,0	1,3095E+00	0,552625494	7,2366E-01	0,513518512	6,7245E-01	0,061694768	8,08E-02
710,0	1,3175E+00	0,553383093	7,2908E-01	0,514109599	6,7734E-01	0,06017356	7,93E-02
711,0	1,3155E+00	0,554141732	7,2897E-01	0,514699897	6,7709E-01	0,058671656	7,72E-02
712,0	1,3071E+00	0,554901439	7,2531E-01	0,51528943	6,7353E-01	0,05718945	7,48E-02
713,0	1,2918E+00	0,555662241	7,1780E-01	0,515878221	6,6641E-01	0,055727307	7,20E-02
714,0	1,3029E+00	0,556424168	7,2497E-01	0,516466294	6,7290E-01	0,054285574	7,07E-02
715,0	1,2587E+00	0,557187247	7,0133E-01	0,517053673	6,5082E-01	0,052864572	6,65E-02
716,0	1,2716E+00	0,557951507	7,0949E-01	0,517640382	6,5823E-01	0,051464601	6,54E-02
717,0	1,1071E+00	0,558716976	6,1856E-01	0,518226443	5,7373E-01	0,050085941	5,55E-02
718,0	1,0296E+00	0,559483683	5,7604E-01	0,518811882	5,3417E-01	0,048728847	5,02E-02
719,0	9,2318E-01	0,560251655	5,1721E-01	0,519396721	4,7950E-01	0,047393556	4,38E-02
720,0	9,8550E-01	0,561020921	5,5289E-01	0,519980984	5,1244E-01	0,046080282	4,54E-02
721,0	1,0861E+00	0,561791509	6,1016E-01	0,520564695	5,6539E-01	0,04478922	4,86E-02
722,0	1,2407E+00	0,562563447	6,9797E-01	0,521147877	6,4659E-01	0,043520544	5,40E-02
723,0	1,1444E+00	0,563336765	6,4468E-01	0,521730555	5,9707E-01	0,042274409	4,84E-02
724,0	1,0555E+00	0,564111489	5,9542E-01	0,522312751	5,5130E-01	0,04105095	4,33E-02
725,0	1,0380E+00	0,564887649	5,8635E-01	0,52289449	5,4276E-01	0,039850283	4,14E-02
726,0	1,0813E+00	0,565665272	6,1165E-01	0,523475796	5,6603E-01	0,038672505	4,18E-02
727,0	1,0850E+00	0,566444387	6,1459E-01	0,524056691	5,6860E-01	0,037517697	4,07E-02
728,0	1,0400E+00	0,567225022	5,8991E-01	0,5246372	5,4562E-01	0,036385918	3,78E-02
729,0	1,0466E+00	0,568007205	5,9448E-01	0,525217347	5,4969E-01	0,035277213	3,69E-02
730,0	1,1285E+00	0,568790965	6,4188E-01	0,525797154	5,9336E-01	0,034191607	3,86E-02
731,0	1,0703E+00	0,569576331	6,0962E-01	0,526376646	5,6338E-01	0,033129111	3,55E-02
732,0	1,1534E+00	0,570363329	6,5786E-01	0,526955846	6,0779E-01	0,032089715	3,70E-02
733,0	1,1962E+00	0,571151989	6,8321E-01	0,527534779	6,3104E-01	0,031073397	3,72E-02
734,0	1,2357E+00	0,571942338	7,0675E-01	0,528113467	6,5259E-01	0,030080118	3,72E-02
735,0	1,2178E+00	0,572734406	6,9748E-01	0,528691935	6,4384E-01	0,029109821	3,54E-02
736,0	1,2059E+00	0,57352822	6,9162E-01	0,529270206	6,3825E-01	0,028162438	3,40E-02
737,0	1,2039E+00	0,574323809	6,9143E-01	0,529848303	6,3788E-01	0,027237882	3,28E-02
738,0	1,2269E+00	0,5751212	7,0562E-01	0,530426251	6,5078E-01	0,026336055	3,23E-02
739,0	1,1905E+00	0,575920423	6,8563E-01	0,531004074	6,3216E-01	0,025456842	3,03E-02
740,0	1,2195E+00	0,576721505	7,0331E-01	0,531581794	6,4826E-01	0,024600116	3,00E-02
741,0	1,2148E+00	0,577524475	7,0158E-01	0,532159436	6,4647E-01	0,023765736	2,89E-02
742,0	1,2153E+00	0,578329361	7,0284E-01	0,532737022	6,4744E-01	0,0247274	3,01E-02
743,0	1,2405E+00	0,579136191	7,1842E-01	0,533314578	6,6158E-01	0,023509304	2,92E-02
744,0	1,2503E+00	0,579944993	7,2511E-01	0,533892127	6,6753E-01	0,022377145	2,80E-02
745,0	1,2497E+00	0,580755797	7,2577E-01	0,534469691	6,6793E-01	0,021324547	2,66E-02
746,0	1,2470E+00	0,581568629	7,2522E-01	0,535047296	6,6720E-01	0,020345507	2,54E-02
747,0	1,2477E+00	0,582383519	7,2664E-01	0,535624964	6,6830E-01	0,01943438	2,42E-02
748,0	1,2401E+00	0,583200495	7,2323E-01	0,53620272	6,6494E-01	0,018585869	2,30E-02
749,0	1,2357E+00	0,584019584	7,2167E-01	0,536780586	6,6330E-01	0,017795007	2,20E-02
750,0	1,2341E+00	0,584840816	7,2175E-01	0,537358587	6,6315E-01	0,017057146	2,11E-02
751,0	1,2286E+00	0,577125788	7,0906E-01	0,536161548	6,5873E-01	0,016367945	2,01E-02
752,0	1,2330E+00	0,578370359	7,1313E-01	0,53668801	6,6174E-01	0,015723354	1,94E-02
753,0	1,2266E+00	0,579593562	7,1093E-01	0,537212125	6,5894E-01	0,015119603	1,85E-02
754,0	1,2420E+00	0,580795828	7,2135E-01	0,537733925	6,6787E-01	0,014553194	1,81E-02

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt Wm ⁻² .nm ⁻¹	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}
755,0	1,2383E+00	0,581977583	7,2066E-01	0,538253442	6,6652E-01	0,014020882	1,74E-02
756,0	1,2232E+00	0,58313925	7,1330E-01	0,538770706	6,5902E-01	0,013519667	1,65E-02
757,0	1,2221E+00	0,584281248	7,1405E-01	0,539285745	6,5906E-01	0,01304678	1,59E-02
758,0	1,2295E+00	0,585403991	7,1975E-01	0,539798589	6,6368E-01	0,012599679	1,55E-02
759,0	1,1945E+00	0,586507888	7,0058E-01	0,540309264	6,4540E-01	0,012176025	1,45E-02
760,0	2,6604E-01	0,587593347	1,5632E-01	0,540817797	1,4388E-01	0,011773686	3,13E-03
761,0	1,5396E-01	0,588660768	9,0630E-02	0,541324213	8,3342E-02	0,011390714	1,75E-03
762,0	6,8766E-01	0,58971055	4,0552E-01	0,541828537	3,7259E-01	0,011025343	7,58E-03
763,0	3,7952E-01	0,590743085	2,2420E-01	0,542330791	2,0583E-01	0,010675974	4,05E-03
764,0	5,3878E-01	0,591758764	3,1883E-01	0,542830999	2,9247E-01	0,010341169	5,57E-03
765,0	6,8601E-01	0,592757971	4,0664E-01	0,543329181	3,7273E-01	0,010019638	6,87E-03
766,0	8,1461E-01	0,593741088	4,8367E-01	0,543825359	4,4301E-01	0,009710231	7,91E-03
767,0	9,7417E-01	0,594708491	5,7935E-01	0,544319551	5,3026E-01	0,009411931	9,17E-03
768,0	1,1138E+00	0,595660552	6,6345E-01	0,544811776	6,0681E-01	0,009123842	1,02E-02
769,0	1,1278E+00	0,596597642	6,7284E-01	0,545302052	6,1499E-01	0,008845183	9,98E-03
770,0	1,1608E+00	0,597520124	6,9360E-01	0,545790394	6,3355E-01	0,008575277	9,95E-03
771,0	1,1686E+00	0,598428357	6,9932E-01	0,54627682	6,3838E-01	0,008313545	9,72E-03
772,0	1,1778E+00	0,5993227	7,0588E-01	0,546761343	6,4398E-01	0,008059499	9,49E-03
773,0	1,1771E+00	0,600203503	7,0650E-01	0,547243977	6,4416E-01	0,007812731	9,20E-03
774,0	1,1771E+00	0,601071114	7,0752E-01	0,547724734	6,4473E-01	0,007572909	8,91E-03
775,0	1,1771E+00	0,601925876	7,0853E-01	0,548203627	6,4529E-01	0,007339769	8,64E-03
776,0	1,1798E+00	0,60276813	7,1115E-01	0,548680666	6,4733E-01	0,007113107	8,39E-03
777,0	1,1727E+00	0,603598211	7,0784E-01	0,54915586	6,4400E-01	0,006892774	8,08E-03
778,0	1,1713E+00	0,60441645	7,0795E-01	0,549629219	6,4378E-01	0,006678668	7,82E-03
779,0	1,1765E+00	0,605223174	7,1205E-01	0,550100751	6,4719E-01	0,00647073	7,61E-03
780,0	1,1636E+00	0,606018705	7,0516E-01	0,550570461	6,4064E-01	0,006268936	7,29E-03
781,0	1,1607E+00	0,606803363	7,0432E-01	0,551038356	6,3959E-01	0,006073293	7,05E-03
782,0	1,1662E+00	0,607577462	7,0856E-01	0,551504441	6,4316E-01	0,005883833	6,86E-03
783,0	1,1614E+00	0,608341312	7,0653E-01	0,551968719	6,4106E-01	0,005700608	6,62E-03
784,0	1,1536E+00	0,609095221	7,0265E-01	0,552431194	6,3728E-01	0,005523686	6,37E-03
785,0	1,1586E+00	0,609839489	7,0656E-01	0,552891867	6,4058E-01	0,005353143	6,20E-03
786,0	1,1592E+00	0,610574415	7,0778E-01	0,55335074	6,4144E-01	0,005189064	6,02E-03
787,0	1,1450E+00	0,611300293	6,9994E-01	0,553807812	6,3411E-01	0,005031535	5,76E-03
788,0	1,1305E+00	0,612017411	6,9189E-01	0,554263082	6,2659E-01	0,004880639	5,52E-03
789,0	1,1257E+00	0,612726057	6,8975E-01	0,554716548	6,2444E-01	0,004736456	5,33E-03
790,0	1,0910E+00	0,613426511	6,6925E-01	0,555168208	6,0569E-01	0,004599054	5,02E-03
791,0	1,1058E+00	0,61411905	6,7909E-01	0,555618058	6,1440E-01	0,004468493	4,94E-03
792,0	1,0953E+00	0,614803947	6,7339E-01	0,556066092	6,0906E-01	0,004344814	4,76E-03
793,0	1,0875E+00	0,615481472	6,6934E-01	0,556512304	6,0521E-01	0,004228045	4,60E-03
794,0	1,0972E+00	0,616151888	6,7604E-01	0,556956689	6,1109E-01	0,004118191	4,52E-03
795,0	1,0932E+00	0,616815457	6,7430E-01	0,557399237	6,0935E-01	0,004015235	4,39E-03
796,0	1,0742E+00	0,617472435	6,6329E-01	0,557839941	5,9923E-01	0,003919139	4,21E-03
797,0	1,0913E+00	0,618123074	6,7456E-01	0,55827879	6,0925E-01	0,003829836	4,18E-03
798,0	1,1121E+00	0,618767622	6,8813E-01	0,558715773	6,2135E-01	0,003747236	4,17E-03
799,0	1,0905E+00	0,619406324	6,7546E-01	0,55915088	6,0975E-01	0,003671217	4,00E-03
800,0	1,0725E+00	0,620039418	6,6499E-01	0,559584097	6,0015E-01	0,003601631	3,86E-03

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
801,0	1,0843E+00	0,620667141	6,7299E-01	0,56001541	6,0722E-01	0,003538299	3,84E-03
802,0	1,0856E+00	0,621289724	6,7447E-01	0,560444805	6,0842E-01	0,003481013	3,78E-03
803,0	1,0657E+00	0,621907395	6,6277E-01	0,560872267	5,9772E-01	0,003429534	3,65E-03
804,0	1,0782E+00	0,622520376	6,7120E-01	0,561297778	6,0519E-01	0,003383594	3,65E-03
805,0	1,0545E+00	0,623128887	6,5709E-01	0,561721321	5,9234E-01	0,003342894	3,53E-03
806,0	1,0974E+00	0,623733142	6,8448E-01	0,562142878	6,1690E-01	0,003307107	3,63E-03
807,0	1,0859E+00	0,624333353	6,7796E-01	0,562562429	6,1089E-01	0,003275877	3,56E-03
808,0	1,0821E+00	0,624929725	6,7624E-01	0,562979953	6,0920E-01	0,003248822	3,52E-03
809,0	1,0548E+00	0,625522462	6,5980E-01	0,563395429	5,9427E-01	0,003225532	3,40E-03
810,0	1,0559E+00	0,626111761	6,6111E-01	0,563808835	5,9533E-01	0,003205576	3,38E-03
811,0	1,0533E+00	0,626697817	6,6010E-01	0,564220147	5,9429E-01	0,003188496	3,36E-03
812,0	1,0268E+00	0,627280819	6,4409E-01	0,564629341	5,7976E-01	0,003173819	3,26E-03
813,0	1,0086E+00	0,627860954	6,3326E-01	0,565036391	5,6990E-01	0,003161049	3,19E-03
814,0	9,0356E-01	0,628438402	5,6783E-01	0,56544127	5,1091E-01	0,003149677	2,85E-03
815,0	8,9523E-01	0,629013342	5,6311E-01	0,565843953	5,0656E-01	0,003139181	2,81E-03
816,0	8,3216E-01	0,629585946	5,2392E-01	0,56624441	4,7121E-01	0,00312903	2,60E-03
817,0	8,5183E-01	0,630156385	5,3679E-01	0,566642612	4,8268E-01	0,003118684	2,66E-03
818,0	8,2259E-01	0,630724822	5,1883E-01	0,567038528	4,6644E-01	0,003107603	2,56E-03
819,0	9,0519E-01	0,631291419	5,7144E-01	0,567432129	5,1363E-01	0,003095248	2,80E-03
820,0	8,6188E-01	0,631856333	5,4458E-01	0,56782338	4,8940E-01	0,003081081	2,66E-03
821,0	9,9764E-01	0,632419716	6,3093E-01	0,56821225	5,6687E-01	0,003064579	3,06E-03
822,0	9,5157E-01	0,632981716	6,0233E-01	0,568598704	5,4106E-01	0,00304523	2,90E-03
823,0	6,7271E-01	0,633542478	4,2619E-01	0,568982707	3,8276E-01	0,003022539	2,03E-03
824,0	9,3506E-01	0,634102142	5,9292E-01	0,569364222	5,3239E-01	0,002996037	2,80E-03
825,0	9,6935E-01	0,634660843	6,1521E-01	0,569743213	5,5228E-01	0,002965284	2,87E-03
826,0	9,3381E-01	0,635218714	5,9317E-01	0,570119642	5,3238E-01	0,002929874	2,74E-03
827,0	9,8465E-01	0,635775882	6,2602E-01	0,570493469	5,6174E-01	0,002889441	2,85E-03
828,0	8,4979E-01	0,636332471	5,4075E-01	0,570864655	4,8512E-01	0,002843664	2,42E-03
829,0	9,2930E-01	0,6368886	5,9186E-01	0,571233159	5,3085E-01	0,002792278	2,59E-03
830,0	9,1601E-01	0,637444383	5,8391E-01	0,571598938	5,2359E-01	0,002735073	2,51E-03
831,0	9,2392E-01	0,637999933	5,8946E-01	0,57196195	5,2845E-01	0,002671907	2,47E-03
832,0	8,9426E-01	0,638555356	5,7103E-01	0,57232215	5,1180E-01	0,002602711	2,33E-03
833,0	9,5650E-01	0,639110755	6,1131E-01	0,572679495	5,4777E-01	0,002527496	2,42E-03
834,0	9,3412E-01	0,639666228	5,9753E-01	0,573033937	5,3528E-01	0,00244636	2,29E-03
835,0	1,0032E+00	0,64022187	6,4227E-01	0,573385431	5,7522E-01	0,002359495	2,37E-03
836,0	9,7234E-01	0,64077777	6,2305E-01	0,573733928	5,5786E-01	0,0022672	2,20E-03
837,0	1,0092E+00	0,641334015	6,4723E-01	0,57407938	5,7936E-01	0,002169881	2,19E-03
838,0	9,9901E-01	0,641890688	6,4126E-01	0,574421737	5,7385E-01	0,002068068	2,07E-03
839,0	1,0013E+00	0,642447865	6,4328E-01	0,574760948	5,7551E-01	0,001962417	1,96E-03
840,0	1,0157E+00	0,64300562	6,5310E-01	0,575096961	5,8413E-01	0,001853724	1,88E-03
841,0	1,0101E+00	0,643564023	6,5006E-01	0,575429724	5,8124E-01	0,00174293	1,76E-03
842,0	9,9703E-01	0,64412314	6,4221E-01	0,575759183	5,7405E-01	0,001631133	1,63E-03
843,0	1,0053E+00	0,64468303	6,4810E-01	0,576085284	5,7914E-01	0,0015196	1,53E-03
844,0	9,8631E-01	0,645243752	6,3641E-01	0,57640797	5,6852E-01	0,001686717	1,66E-03
845,0	1,0165E+00	0,645805358	6,5646E-01	0,576727185	5,8624E-01	0,00151935	1,54E-03
846,0	1,0187E+00	0,646367897	6,5845E-01	0,577042873	5,8783E-01	0,00140815	1,43E-03

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt Wm ⁻² .nm ⁻¹	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}	Resposta espectral A/Wm ⁻² .nm ⁻¹	I _{cc}
847,0	9,9170E-01	0,646931413	6,4156E-01	0,577354973	5,7256E-01	0,001327984	1,32E-03
848,0	9,9217E-01	0,647495947	6,4243E-01	0,577663427	5,7314E-01	0,001253721	1,24E-03
849,0	9,8596E-01	0,648061535	6,3896E-01	0,577968174	5,6985E-01	0,001160229	1,14E-03
850,0	8,9372E-01	0,648628209	5,7969E-01	0,578269153	5,1681E-01	0,001022375	9,14E-04
851,0	9,7493E-01	0,649195997	6,3292E-01	0,578566301	5,6406E-01	0,000815028	7,95E-04
852,0	9,6927E-01	0,649764923	6,2980E-01	0,578859554	5,6107E-01	0,000513055	4,97E-04
853,0	9,6486E-01	0,650335006	6,2748E-01	0,57914885	5,5880E-01	9,13257E-05	8,81E-05
854,0	8,5112E-01	0,650906263	5,5400E-01	0,579434121	4,9317E-01	0	0,00E+00
855,0	9,1300E-01	0,651478703	5,9480E-01	0,579715302	5,2928E-01		
856,0	9,7317E-01	0,652052335	6,3456E-01	0,579992325	5,6443E-01		
857,0	9,9166E-01	0,652627161	6,4718E-01	0,580265123	5,7543E-01		
858,0	9,9196E-01	0,65320318	6,4795E-01	0,580533625	5,7587E-01		
859,0	9,9171E-01	0,653780387	6,4836E-01	0,580797762	5,7598E-01		
860,0	9,8816E-01	0,654358773	6,4661E-01	0,581057463	5,7418E-01		
861,0	9,8679E-01	0,654938323	6,4629E-01	0,581312654	5,7363E-01		
862,0	9,9449E-01	0,655519021	6,5191E-01	0,581563264	5,7836E-01		
863,0	1,0005E+00	0,656100844	6,5643E-01	0,581809218	5,8210E-01		
864,0	9,7916E-01	0,656683765	6,4300E-01	0,58205044	5,6992E-01		
865,0	9,6324E-01	0,657267756	6,3311E-01	0,582286855	5,6088E-01		
866,0	8,4900E-01	0,657852781	5,5852E-01	0,582518386	4,9456E-01		
867,0	9,1546E-01	0,658438802	6,0277E-01	0,582744955	5,3348E-01		
868,0	9,5920E-01	0,659025776	6,3214E-01	0,582966482	5,5918E-01		
869,0	9,4956E-01	0,659613657	6,2634E-01	0,583182887	5,5377E-01		
870,0	9,6755E-01	0,660202393	6,3878E-01	0,583394091	5,6446E-01		
871,0	9,5387E-01	0,660791929	6,3031E-01	0,58360001	5,5668E-01		
872,0	9,6686E-01	0,661382206	6,3946E-01	0,583800561	5,6445E-01		
873,0	9,5721E-01	0,66197316	6,3365E-01	0,583995662	5,5901E-01		
874,0	9,4042E-01	0,662564725	6,2309E-01	0,584185227	5,4938E-01		
875,0	9,2687E-01	0,663156827	6,1466E-01	0,584369169	5,4163E-01		
876,0	9,5277E-01	0,663749392	6,3240E-01	0,584547404	5,5694E-01		
877,0	9,5615E-01	0,664342338	6,3521E-01	0,584719841	5,5908E-01		
878,0	9,5237E-01	0,664935582	6,3326E-01	0,584886394	5,5703E-01		
879,0	9,3656E-01	0,665529036	6,2331E-01	0,585046971	5,4793E-01		
880,0	9,3957E-01	0,666122607	6,2587E-01	0,585201483	5,4984E-01		
881,0	9,0861E-01	0,666716198	6,0579E-01	0,585349838	5,3185E-01		
882,0	9,3245E-01	0,667309708	6,2223E-01	0,585491943	5,4594E-01		
883,0	9,2927E-01	0,667903032	6,2066E-01	0,585627703	5,4421E-01		
884,0	9,3305E-01	0,668496062	6,2374E-01	0,585757026	5,4654E-01		
885,0	9,4423E-01	0,669088683	6,3177E-01	0,585879815	5,5321E-01		
886,0	9,0752E-01	0,669680779	6,0775E-01	0,585995973	5,3180E-01		
887,0	9,1062E-01	0,670272228	6,1036E-01	0,586105404	5,3372E-01		
888,0	9,2228E-01	0,670862903	6,1872E-01	0,586208008	5,4065E-01		
889,0	9,3455E-01	0,671452676	6,2751E-01	0,586303685	5,4793E-01		
890,0	9,2393E-01	0,672041412	6,2092E-01	0,586392337	5,4179E-01		
891,0	9,2584E-01	0,672628972	6,2275E-01	0,58647386	5,4298E-01		
892,0	9,0881E-01	0,673215215	6,1182E-01	0,586548153	5,3306E-01		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
893,0	8,7327E-01	0,673799993	5,8841E-01	0,586615113	5,1227E-01		
894,0	8,5130E-01	0,674383156	5,7410E-01	0,586674634	4,9944E-01		
895,0	8,1357E-01	0,67496455	5,4913E-01	0,586726612	4,7734E-01		
896,0	7,6253E-01	0,675544015	5,1512E-01	0,58677094	4,4743E-01		
897,0	6,6566E-01	0,676121388	4,5007E-01	0,586807512	3,9061E-01		
898,0	7,1780E-01	0,676696502	4,8573E-01	0,586836217	4,2123E-01		
899,0	5,4871E-01	0,677269185	3,7162E-01	0,586856949	3,2201E-01		
900,0	7,4260E-01	0,677839261	5,0336E-01	0,586869595	4,3581E-01		
901,0	5,9933E-01	0,678406551	4,0659E-01	0,586874045	3,5173E-01		
902,0	6,6791E-01	0,678970872	4,5349E-01	0,586870188	3,9198E-01		
903,0	6,8889E-01	0,679532034	4,6812E-01	0,586857909	4,0428E-01		
904,0	8,4457E-01	0,680089845	5,7438E-01	0,586837094	4,9563E-01		
905,0	8,1709E-01	0,68064411	5,5615E-01	0,58680763	4,7947E-01		
906,0	7,7558E-01	0,681194627	5,2832E-01	0,586769398	4,5509E-01		
907,0	6,3854E-01	0,681741193	4,3532E-01	0,586722283	3,7465E-01		
908,0	6,5217E-01	0,682283597	4,4496E-01	0,586666166	3,8261E-01		
909,0	7,0431E-01	0,682821627	4,8092E-01	0,586600929	4,1315E-01		
910,0	6,2467E-01	0,683355066	4,2687E-01	0,586526451	3,6639E-01		
911,0	6,6808E-01	0,683883693	4,5689E-01	0,586442611	3,9179E-01		
912,0	6,8893E-01	0,684407282	4,7151E-01	0,586349288	4,0395E-01		
913,0	6,2834E-01	0,684925603	4,3037E-01	0,586246358	3,6836E-01		
914,0	6,2649E-01	0,685438423	4,2942E-01	0,586133698	3,6721E-01		
915,0	6,7836E-01	0,685945503	4,6532E-01	0,586011183	3,9753E-01		
916,0	5,7646E-01	0,686446602	3,9571E-01	0,585878688	3,3774E-01		
917,0	7,3017E-01	0,686941474	5,0158E-01	0,585736084	4,2769E-01		
918,0	5,9271E-01	0,687429867	4,0745E-01	0,585583245	3,4708E-01		
919,0	7,3877E-01	0,687911528	5,0821E-01	0,585420042	4,3249E-01		
920,0	7,4414E-01	0,688386197	5,1226E-01	0,585246344	4,3551E-01		
921,0	7,8049E-01	0,688853612	5,3764E-01	0,585062022	4,5664E-01		
922,0	7,0026E-01	0,689313506	4,8270E-01	0,584866944	4,0956E-01		
923,0	7,4504E-01	0,689765608	5,1390E-01	0,584660976	4,3560E-01		
924,0	7,2150E-01	0,690209642	4,9799E-01	0,584443986	4,2168E-01		
925,0	7,1110E-01	0,690645328	4,9112E-01	0,584215839	4,1544E-01		
926,0	7,0331E-01	0,691072384	4,8604E-01	0,583976399	4,1072E-01		
927,0	7,8742E-01	0,691490521	5,4449E-01	0,58372553	4,5964E-01		
928,0	5,8968E-01	0,691899448	4,0800E-01	0,583463094	3,4406E-01		
929,0	5,5127E-01	0,692298867	3,8164E-01	0,583188952	3,2149E-01		
930,0	4,3210E-01	0,69268848	2,9931E-01	0,582902965	2,5187E-01		
931,0	4,0921E-01	0,693067982	2,8361E-01	0,582604994	2,3841E-01		
932,0	3,0086E-01	0,693437063	2,0863E-01	0,582294895	1,7519E-01		
933,0	2,4841E-01	0,693795412	1,7235E-01	0,581972527	1,4457E-01		
934,0	1,4380E-01	0,694142712	9,9818E-02	0,581637747	8,3640E-02		
935,0	2,5084E-01	0,694478641	1,7420E-01	0,58129041	1,4581E-01		
936,0	1,6142E-01	0,694802874	1,1216E-01	0,580930371	9,3774E-02		
937,0	1,6338E-01	0,695115082	1,1357E-01	0,580557483	9,4851E-02		
938,0	2,0058E-01	0,695414932	1,3949E-01	0,5801716	1,1637E-01		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
939,0	3,9887E-01	0,695702085	2,7749E-01	0,579772572	2,3125E-01		
940,0	4,7181E-01	0,6959762	3,2837E-01	0,579360252	2,7335E-01		
941,0	3,7195E-01	0,696236932	2,5897E-01	0,578934488	2,1533E-01		
942,0	4,0532E-01	0,696483929	2,8230E-01	0,578495129	2,3448E-01		
943,0	2,7834E-01	0,696716838	1,9392E-01	0,578042023	1,6089E-01		
944,0	2,8579E-01	0,696935301	1,9918E-01	0,577575018	1,6507E-01		
945,0	3,6821E-01	0,697138954	2,5669E-01	0,577093958	2,1249E-01		
946,0	1,9461E-01	0,697327431	1,3571E-01	0,57659869	1,1221E-01		
947,0	3,7112E-01	0,697500361	2,5886E-01	0,576089056	2,1380E-01		
948,0	2,7423E-01	0,697657369	1,9132E-01	0,5755649	1,5784E-01		
949,0	4,9396E-01	0,697798077	3,4468E-01	0,575026064	2,8404E-01		
950,0	1,4726E-01	0,697922099	1,0278E-01	0,574472389	8,4597E-02		
951,0	4,8378E-01	0,69802905	3,3769E-01	0,573903715	2,7764E-01		
952,0	2,6891E-01	0,698118538	1,8773E-01	0,573319881	1,5417E-01		
953,0	3,4362E-01	0,698190165	2,3991E-01	0,572720725	1,9680E-01		
954,0	4,2411E-01	0,698243534	2,9613E-01	0,572106084	2,4264E-01		
955,0	3,4117E-01	0,698278239	2,3823E-01	0,571475794	1,9497E-01		
956,0	3,2821E-01	0,698293872	2,2919E-01	0,570829691	1,8735E-01		
957,0	2,7067E-01	0,698290022	1,8901E-01	0,570167608	1,5433E-01		
958,0	4,6101E-01	0,69826627	3,2191E-01	0,56948938	2,6254E-01		
959,0	3,7385E-01	0,698222197	2,6103E-01	0,568794837	2,1264E-01		
960,0	4,2066E-01	0,698157378	2,9369E-01	0,568083812	2,3897E-01		
961,0	4,6120E-01	0,698071383	3,2195E-01	0,567356135	2,6166E-01		
962,0	4,4174E-01	0,69796378	3,0832E-01	0,566611635	2,5030E-01		
963,0	5,0503E-01	0,697834131	3,5243E-01	0,56585014	2,8577E-01		
964,0	4,5860E-01	0,697681994	3,1996E-01	0,565071478	2,5914E-01		
965,0	5,0374E-01	0,697506925	3,5136E-01	0,564275475	2,8425E-01		
966,0	5,0275E-01	0,697308473	3,5057E-01	0,563461957	2,8328E-01		
967,0	5,0240E-01	0,697086183	3,5022E-01	0,562630748	2,8267E-01		
968,0	6,5210E-01	0,696839599	4,5441E-01	0,561781671	3,6634E-01		
969,0	6,8622E-01	0,696568258	4,7800E-01	0,560914549	3,8491E-01		
970,0	6,3461E-01	0,696271693	4,4186E-01	0,560029204	3,5540E-01		
971,0	7,1397E-01	0,695949434	4,9689E-01	0,559125456	3,9920E-01		
972,0	6,8765E-01	0,695601006	4,7833E-01	0,558203124	3,8385E-01		
973,0	6,0648E-01	0,69522593	4,2164E-01	0,557262028	3,3797E-01		
974,0	5,7529E-01	0,694823723	3,9973E-01	0,556301984	3,2003E-01		
975,0	5,8987E-01	0,694393898	4,0960E-01	0,55532281	3,2757E-01		
976,0	5,7191E-01	0,693935964	3,9687E-01	0,554324321	3,1702E-01		
977,0	6,3864E-01	0,693449425	4,4286E-01	0,553306332	3,5336E-01		
978,0	6,1509E-01	0,692933781	4,2622E-01	0,552268656	3,3969E-01		
979,0	6,3815E-01	0,692388529	4,4185E-01	0,551211107	3,5176E-01		
980,0	6,0468E-01	0,69181316	4,1833E-01	0,550133495	3,3265E-01		
981,0	7,1338E-01	0,691207163	4,9309E-01	0,549035633	3,9167E-01		
982,0	6,9218E-01	0,690570022	4,7800E-01	0,547917329	3,7926E-01		
983,0	6,6865E-01	0,689901215	4,6130E-01	0,546778393	3,6560E-01		
984,0	7,3732E-01	0,689200218	5,0816E-01	0,545618632	4,0230E-01		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
985,0	6,8817E-01	0,688466503	4,7378E-01	0,544437853	3,7467E-01		
986,0	7,5083E-01	0,687699536	5,1635E-01	0,543235863	4,0788E-01		
987,0	7,3928E-01	0,686898781	5,0781E-01	0,542012465	4,0070E-01		
988,0	7,3462E-01	0,686063697	5,0400E-01	0,540767465	3,9726E-01		
989,0	7,4906E-01	0,685193737	5,1325E-01	0,539500664	4,0412E-01		
990,0	7,3227E-01	0,684288353	5,0108E-01	0,538211866	3,9412E-01		
991,0	7,5358E-01	0,683346991	5,1496E-01	0,536900871	4,0460E-01		
992,0	7,5102E-01	0,682369092	5,1247E-01	0,535567479	4,0222E-01		
993,0	7,3728E-01	0,681354096	5,0235E-01	0,534211489	3,9386E-01		
994,0	7,5410E-01	0,680301436	5,1302E-01	0,5328327	4,0181E-01		
995,0	7,5176E-01	0,679210541	5,1060E-01	0,531430908	3,9951E-01		
996,0	7,4884E-01	0,678080838	5,0777E-01	0,53000591	3,9689E-01		
997,0	7,3971E-01	0,676911747	5,0072E-01	0,528557501	3,9098E-01		
998,0	7,3887E-01	0,675702686	4,9926E-01	0,527085475	3,8945E-01		
999,0	7,3857E-01	0,674453068	4,9813E-01	0,525589625	3,8818E-01		
1000,0	7,3532E-01	0,673162302	4,9499E-01	0,524069744	3,8536E-01		
1001,0	7,4442E-01	0,671829792	5,0012E-01	0,522525623	3,8898E-01		
1002,0	7,2805E-01	0,67045494	4,8812E-01	0,520957052	3,7928E-01		
1003,0	7,3442E-01	0,669037142	4,9135E-01	0,51936382	3,8143E-01		
1004,0	7,2336E-01	0,66757579	4,8290E-01	0,517745717	3,7452E-01		
1005,0	6,8174E-01	0,666070272	4,5409E-01	0,516102528	3,5185E-01		
1006,0	7,1252E-01	0,664519973	4,7348E-01	0,514434042	3,6654E-01		
1007,0	7,2753E-01	0,662924272	4,8230E-01	0,512740042	3,7303E-01		
1008,0	7,2685E-01	0,661282545	4,8065E-01	0,511020314	3,7144E-01		
1009,0	7,1972E-01	0,659594163	4,7472E-01	0,509274641	3,6654E-01		
1010,0	7,1914E-01	0,657858495	4,7309E-01	0,507502806	3,6497E-01		
1011,0	7,2278E-01	0,656074902	4,7420E-01	0,50570459	3,6551E-01		
1012,0	7,1877E-01	0,654242745	4,7025E-01	0,503879774	3,6217E-01		
1013,0	7,1761E-01	0,652361378	4,6814E-01	0,502028136	3,6026E-01		
1014,0	7,2068E-01	0,650430152	4,6875E-01	0,500149457	3,6045E-01		
1015,0	7,0817E-01	0,648448414	4,5921E-01	0,498243513	3,5284E-01		
1016,0	7,1129E-01	0,646415505	4,5979E-01	0,496310082	3,5302E-01		
1017,0	7,0337E-01	0,644330766	4,5320E-01	0,494348938	3,4771E-01		
1018,0	7,1422E-01	0,642193528	4,5867E-01	0,492359857	3,5165E-01		
1019,0	6,8878E-01	0,640003124	4,4082E-01	0,490342612	3,3774E-01		
1020,0	6,9896E-01	0,637758878	4,4577E-01	0,488296977	3,4130E-01		
1021,0	7,0175E-01	0,635460112	4,4593E-01	0,486222722	3,4121E-01		
1022,0	6,8970E-01	0,633106144	4,3665E-01	0,484119618	3,3390E-01		
1023,0	6,9508E-01	0,630696287	4,3838E-01	0,481987437	3,3502E-01		
1024,0	6,9058E-01	0,628229851	4,3384E-01	0,479825946	3,3136E-01		
1025,0	6,9753E-01	0,62570614	4,3645E-01	0,477634912	3,3316E-01		
1026,0	6,9636E-01	0,623124455	4,3392E-01	0,475414105	3,3106E-01		
1027,0	6,9305E-01	0,620484094	4,3003E-01	0,473163288	3,2793E-01		
1028,0	6,9385E-01	0,617784349	4,2865E-01	0,470882227	3,2672E-01		
1029,0	6,8628E-01	0,615024508	4,2208E-01	0,468570686	3,2157E-01		
1030,0	6,9055E-01	0,612203855	4,2276E-01	0,466228429	3,2195E-01		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
1031,0	6,8736E-01	0,609321672	4,1882E-01	0,463855216	3,1884E-01		
1032,0	6,8787E-01	0,606377233	4,1711E-01	0,46145081	3,1742E-01		
1033,0	6,7613E-01	0,603369811	4,0796E-01	0,459014969	3,1035E-01		
1034,0	6,8015E-01	0,600298674	4,0829E-01	0,456547454	3,1052E-01		
1035,0	6,8234E-01	0,597163084	4,0747E-01	0,454048023	3,0982E-01		
1036,0	6,8202E-01	0,593962302	4,0509E-01	0,451516432	3,0794E-01		
1037,0	6,7497E-01	0,590695582	3,9870E-01	0,448952438	3,0303E-01		
1038,0	6,7172E-01	0,587362176	3,9454E-01	0,446355796	2,9983E-01		
1039,0	6,7636E-01	0,583961331	3,9497E-01	0,44372626	3,0012E-01		
1040,0	6,7170E-01	0,580492289	3,8992E-01	0,441063584	2,9626E-01		
1041,0	6,7176E-01	0,576954289	3,8757E-01	0,43836752	2,9448E-01		
1042,0	6,7200E-01	0,573346565	3,8529E-01	0,435637818	2,9275E-01		
1043,0	6,6525E-01	0,569668348	3,7897E-01	0,43287423	2,8797E-01		
1044,0	6,6833E-01	0,565918865	3,7822E-01	0,430076505	2,8743E-01		
1045,0	6,6452E-01	0,562097336	3,7352E-01	0,427244391	2,8391E-01		
1046,0	6,4714E-01	0,55820298	3,6124E-01	0,424377635	2,7463E-01		
1047,0	6,5694E-01	0,554235011	3,6410E-01	0,421475985	2,7688E-01		
1048,0	6,6274E-01	0,550192637	3,6463E-01	0,418539185	2,7738E-01		
1049,0	6,5896E-01	0,546075066	3,5984E-01	0,41556698	2,7384E-01		
1050,0	6,5463E-01	0,541881496	3,5473E-01	0,412559113	2,7007E-01		
1051,0	6,5521E-01	0,51460006	3,3717E-01	0,403146733	2,6415E-01		
1052,0	6,5118E-01	0,511101194	3,3282E-01	0,399612332	2,6022E-01		
1053,0	6,4919E-01	0,507559063	3,2950E-01	0,396066386	2,5712E-01		
1054,0	6,4646E-01	0,503974563	3,2580E-01	0,39250936	2,5374E-01		
1055,0	6,4847E-01	0,500348586	3,2446E-01	0,388941716	2,5222E-01		
1056,0	6,4641E-01	0,496682029	3,2106E-01	0,385363917	2,4910E-01		
1057,0	6,4482E-01	0,492975783	3,1788E-01	0,381776425	2,4618E-01		
1058,0	6,3818E-01	0,489230744	3,1222E-01	0,378179704	2,4135E-01		
1059,0	6,1875E-01	0,485447804	3,0037E-01	0,374574215	2,3177E-01		
1060,0	6,3585E-01	0,48162786	3,0624E-01	0,370960423	2,3588E-01		
1061,0	6,2121E-01	0,477771803	2,9680E-01	0,36733879	2,2819E-01		
1062,0	6,3266E-01	0,473880529	2,9981E-01	0,363709778	2,3010E-01		
1063,0	6,2239E-01	0,469954932	2,9250E-01	0,360073851	2,2411E-01		
1064,0	6,3196E-01	0,465995904	2,9449E-01	0,35643147	2,2525E-01		
1065,0	6,2913E-01	0,462004341	2,9066E-01	0,3527831	2,2195E-01		
1066,0	6,1713E-01	0,457981137	2,8263E-01	0,349129203	2,1546E-01		
1067,0	6,2032E-01	0,453927185	2,8158E-01	0,345470241	2,1430E-01		
1068,0	6,1944E-01	0,449843379	2,7865E-01	0,341806678	2,1173E-01		
1069,0	5,8626E-01	0,445730614	2,6131E-01	0,338138976	1,9824E-01		
1070,0	6,0469E-01	0,441589784	2,6702E-01	0,334467598	2,0225E-01		
1071,0	6,1661E-01	0,437421782	2,6972E-01	0,330793007	2,0397E-01		
1072,0	6,1536E-01	0,433227502	2,6659E-01	0,327115666	2,0129E-01		
1073,0	6,0363E-01	0,429007839	2,5896E-01	0,323436037	1,9524E-01		
1074,0	6,2158E-01	0,424763687	2,6402E-01	0,319754583	1,9875E-01		
1075,0	5,9252E-01	0,420495939	2,4915E-01	0,316071767	1,8728E-01		
1076,0	6,1471E-01	0,41620549	2,5585E-01	0,312388053	1,9203E-01		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgh (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
1077,0	6,0434E-01	0,411893233	2,4892E-01	0,308703902	1,8656E-01		
1078,0	6,0321E-01	0,407560064	2,4584E-01	0,305019777	1,8399E-01		
1079,0	6,0474E-01	0,403206874	2,4384E-01	0,301336142	1,8223E-01		
1080,0	5,9722E-01	0,39883456	2,3819E-01	0,297653459	1,7776E-01		
1081,0	5,8083E-01	0,394444014	2,2910E-01	0,293972191	1,7075E-01		
1082,0	5,8940E-01	0,390036131	2,2989E-01	0,290292801	1,7110E-01		
1083,0	5,9814E-01	0,385611804	2,3065E-01	0,286615751	1,7144E-01		
1084,0	5,7852E-01	0,381171929	2,2052E-01	0,282941505	1,6369E-01		
1085,0	5,9330E-01	0,376717398	2,2351E-01	0,279270524	1,6569E-01		
1086,0	5,5410E-01	0,372249106	2,0626E-01	0,275603273	1,5271E-01		
1087,0	5,6697E-01	0,367767947	2,0851E-01	0,271940213	1,5418E-01		
1088,0	5,9317E-01	0,363274814	2,1548E-01	0,268281809	1,5914E-01		
1089,0	5,7919E-01	0,358770603	2,0780E-01	0,264628521	1,5327E-01		
1090,0	5,5573E-01	0,354256206	1,9687E-01	0,260980814	1,4503E-01		
1091,0	5,8835E-01	0,349732518	2,0577E-01	0,257339149	1,5141E-01		
1092,0	5,8124E-01	0,345200433	2,0064E-01	0,253703991	1,4746E-01		
1093,0	5,1058E-01	0,340660845	1,7393E-01	0,250075801	1,2768E-01		
1094,0	5,3965E-01	0,336114648	1,8138E-01	0,246455042	1,3300E-01		
1095,0	5,2067E-01	0,331562736	1,7263E-01	0,242842178	1,2644E-01		
1096,0	5,0323E-01	0,327006003	1,6456E-01	0,23923767	1,2039E-01		
1097,0	5,7852E-01	0,322445343	1,8654E-01	0,235641983	1,3632E-01		
1098,0	5,0291E-01	0,31788165	1,5987E-01	0,232055578	1,1670E-01		
1099,0	5,0772E-01	0,313315818	1,5908E-01	0,228478919	1,1600E-01		
1100,0	4,8577E-01	0,308748741	1,4998E-01	0,224912468	1,0926E-01		
1101,0	4,9696E-01	0,304181313	1,5117E-01	0,221356688	1,1001E-01		
1102,0	4,6883E-01	0,299614428	1,4047E-01	0,217812042	1,0212E-01		
1103,0	4,6637E-01	0,29504898	1,3760E-01	0,214278992	9,9933E-02		
1104,0	4,6765E-01	0,290485864	1,3585E-01	0,210758002	9,8561E-02		
1105,0	5,0644E-01	0,285925972	1,4480E-01	0,207249534	1,0496E-01		
1106,0	3,9792E-01	0,2813702	1,1196E-01	0,203754052	8,1078E-02		
1107,0	4,8304E-01	0,276819441	1,3371E-01	0,200272017	9,6739E-02		
1108,0	4,1565E-01	0,272274589	1,1317E-01	0,196803893	8,1802E-02		
1109,0	4,1278E-01	0,267736538	1,1052E-01	0,193350143	7,9811E-02		
1110,0	4,7899E-01	0,263206183	1,2607E-01	0,189911229	9,0966E-02		
1111,0	3,3154E-01	0,258684416	8,5764E-02	0,186487614	6,1828E-02		
1112,0	4,1357E-01	0,254172133	1,0512E-01	0,18307976	7,5716E-02		
1113,0	2,6850E-01	0,249670228	6,7036E-02	0,179688132	4,8246E-02		
1114,0	2,9985E-01	0,245179593	7,3517E-02	0,176313191	5,2868E-02		
1115,0	2,4987E-01	0,240701124	6,0144E-02	0,172955401	4,3216E-02		
1116,0	2,0136E-01	0,236235715	4,7568E-02	0,169615224	3,4154E-02		
1117,0	7,9618E-02	0,231784258	1,8454E-02	0,166293122	1,3240E-02		
1118,0	2,1753E-01	0,227347649	4,9455E-02	0,16298956	3,5455E-02		
1119,0	1,1317E-01	0,222926782	2,5229E-02	0,159704999	1,8074E-02		
1120,0	1,4189E-01	0,21852255	3,1006E-02	0,156439903	2,2197E-02		
1121,0	1,8586E-01	0,214135847	3,9799E-02	0,153194733	2,8473E-02		
1122,0	8,1686E-02	0,209767568	1,7135E-02	0,149969954	1,2250E-02		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{cc}
1123,0	1,2817E-01	0,205418606	2,6329E-02	0,146766027	1,8811E-02		
1124,0	1,0870E-01	0,201089855	2,1858E-02	0,143583417	1,5608E-02		
1125,0	1,4428E-01	0,196782211	2,8392E-02	0,140422584	2,0260E-02		
1126,0	5,1589E-02	0,192496565	9,9307E-03	0,137283993	7,0823E-03		
1127,0	1,5725E-01	0,188233814	2,9600E-02	0,134168106	2,1098E-02		
1128,0	9,9224E-02	0,183994849	1,8257E-02	0,131075385	1,3006E-02		
1129,0	1,0591E-01	0,179780567	1,9041E-02	0,128006295	1,3557E-02		
1130,0	7,0574E-02	0,17559186	1,2392E-02	0,124961297	8,8190E-03		
1131,0	2,9560E-01	0,171429622	5,0675E-02	0,121940854	3,6046E-02		
1132,0	2,3411E-01	0,167294749	3,9165E-02	0,118945429	2,7846E-02		
1133,0	1,5331E-01	0,163188133	2,5018E-02	0,115975485	1,7780E-02		
1134,0	4,1740E-02	0,159110668	6,6413E-03	0,113031484	4,7179E-03		
1135,0	1,5462E-02	0,155063249	2,3976E-03	0,110113891	1,7026E-03		
1136,0	1,2876E-01	0,15104677	1,9449E-02	0,107223166	1,3806E-02		
1137,0	2,8785E-01	0,147062125	4,2332E-02	0,104359774	3,0040E-02		
1138,0	2,0329E-01	0,143110207	2,9093E-02	0,101524176	2,0639E-02		
1139,0	2,9850E-01	0,139191912	4,1549E-02	0,098716836	2,9467E-02		
1140,0	2,5599E-01	0,135308132	3,4638E-02	0,095938217	2,4559E-02		
1141,0	1,9337E-01	0,131459761	2,5420E-02	0,093188781	1,8020E-02		
1142,0	2,2479E-01	0,127647695	2,8694E-02	0,090468992	2,0337E-02		
1143,0	3,1183E-01	0,123872827	3,8627E-02	0,087779311	2,7372E-02		
1144,0	1,1326E-01	0,12013605	1,3607E-02	0,085120202	9,6407E-03		
1145,0	1,4604E-01	0,116438259	1,7005E-02	0,082492127	1,2047E-02		
1146,0	1,5764E-01	0,112780348	1,7779E-02	0,07989555	1,2595E-02		
1147,0	5,9176E-02	0,109163211	6,4598E-03	0,077330933	4,5761E-03		
1148,0	2,7113E-01	0,105587742	2,8628E-02	0,074798739	2,0280E-02		
1149,0	2,1854E-01	0,102054835	2,2303E-02	0,072299431	1,5800E-02		
1150,0	1,2164E-01	0,098565384	1,1989E-02	0,069833471	8,4945E-03		
1151,0	2,0340E-01	0,095120282	1,9347E-02	0,067401323	1,3709E-02		
1152,0	2,4762E-01	0,091720425	2,2712E-02	0,065003449	1,6096E-02		
1153,0	2,3812E-01	0,088366706	2,1042E-02	0,062640312	1,4916E-02		
1154,0	1,4248E-01	0,085060019	1,2119E-02	0,060312375	8,5933E-03		
1155,0	3,1316E-01	0,081801258	2,5617E-02	0,0580201	1,8170E-02		
1156,0	2,8090E-01	0,078591317	2,2076E-02	0,055763951	1,5664E-02		
1157,0	3,1458E-01	0,07543109	2,3729E-02	0,05354439	1,6844E-02		
1158,0	3,1171E-01	0,072321471	2,2543E-02	0,051361881	1,6010E-02		
1159,0	3,3693E-01	0,069263354	2,3337E-02	0,049216885	1,6583E-02		
1160,0	2,8648E-01	0,066257634	1,8981E-02	0,047109865	1,3496E-02		
1161,0	3,4753E-01	0,063305203	2,2000E-02	0,045041286	1,5653E-02		
1162,0	3,5002E-01	0,060406957	2,1144E-02	0,043011608	1,5055E-02		
1163,0	4,6857E-01	0,057563789	2,6973E-02	0,041021296	1,9221E-02		
1164,0	4,0188E-01	0,054776593	2,2014E-02	0,039070811	1,5702E-02		
1165,0	3,8860E-01	0,052046264	2,0225E-02	0,037160617	1,4441E-02		
1166,0	3,7494E-01	0,049373695	1,8512E-02	0,035291177	1,3232E-02		
1167,0	4,0996E-01	0,04675978	1,9170E-02	0,033462953	1,3718E-02		
1168,0	4,1954E-01	0,044205413	1,8546E-02	0,031676408	1,3290E-02		

Tabela da multiplicação das respostas espectrais pelo espectro de referência (continuação).

ASTM G173		c - Si		mc - Si		a - Si	
Wvlgth (nm)	Global tilt $Wm^{-2}.nm^{-1}$	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{CC}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{CC}	Resposta espectral $A/Wm^{-2}.nm^{-1}$	I_{CC}
1169,0	4,2310E-01	0,041711488	1,7648E-02	0,029932005	1,2664E-02		
1170,0	4,5873E-01	0,0392789	1,8018E-02	0,028230206	1,2950E-02		
1171,0	4,4831E-01	0,036908543	1,6546E-02	0,026571476	1,1912E-02		
1172,0	4,5483E-01	0,034601309	1,5738E-02	0,024956275	1,1351E-02		
1173,0	4,5642E-01	0,032358094	1,4769E-02	0,023385068	1,0673E-02		
1174,0	3,3692E-01	0,030179792	1,0168E-02	0,021858317	7,3645E-03		
1175,0	4,5240E-01	0,028067296	1,2698E-02	0,020376484	9,2183E-03		
1176,0	4,7679E-01	0,0260215	1,2407E-02	0,018940033	9,0304E-03		
1177,0	4,7235E-01	0,024043299	1,1357E-02	0,017549426	8,2895E-03		
1178,0	3,6000E-01	0,022133586	7,9681E-03	0,016205127	5,8338E-03		
1179,0	4,8371E-01	0,020293256	9,8161E-03	0,014907597	7,2110E-03		
1180,0	4,4069E-01	0,018523202	8,1630E-03	0,013657301	6,0186E-03		
1181,0	4,5514E-01	0,016824319	7,6574E-03	0,0124547	5,6686E-03		
1182,0	3,2318E-01	0,0151975	4,9115E-03	0,011300257	3,6520E-03		
1183,0	4,3870E-01	0,01364364	5,9855E-03	0,010194436	4,4723E-03		
1184,0	4,1985E-01	0,012163632	5,1069E-03	0,009137698	3,8365E-03		
1185,0	4,0741E-01	0,010758371	4,3831E-03	0,008130508	3,3125E-03		
1186,0	4,7715E-01	0,009428751	4,4989E-03	0,007173327	3,4228E-03		
1187,0	4,5575E-01	0,008175665	3,7261E-03	0,006266618	2,8560E-03		
1188,0	3,3504E-01	0,007000008	2,3453E-03	0,005410845	1,8128E-03		
1189,0	4,1569E-01	0,005902674	2,4537E-03	0,00460647	1,9149E-03		
1190,0	4,6239E-01	0,004884556	2,2586E-03	0,003853955	1,7820E-03		
1191,0	4,4660E-01	0,003946549	1,7625E-03	0,003153765	1,4085E-03		
1192,0	4,7336E-01	0,003089547	1,4625E-03	0,002506361	1,1864E-03		
1193,0	4,5434E-01	0,002314444	1,0515E-03	0,001912206	8,6879E-04		
1194,0	4,6890E-01	0,001622133	7,6062E-04	0,001371763	6,4322E-04		
1195,0	4,4696E-01	0,001013509	4,5300E-04	0,000885495	3,9578E-04		
1196,0	4,3131E-01	0,000489466	2,1111E-04	0,000453865	1,9576E-04		
1197,0	4,7715E-01	5,08979E-05	2,4286E-05	7,7335E-05	3,6900E-05		

**ANEXO A – CONSTANTES DAS EQUAÇÕES DE GERAÇÃO DAS RESPOSTAS
ESPECTRAIS (1.14 A 1.27)**

$A_{11} = - 1,23466274445.10^{-9}$	$E_{23} = - 15,8291232065164$
$B_{11} = + 1,78308040561366.10^{-6}$	$A_{24} = + 7,713445097806.10^{-8}$
$C_{11} = - 9,52936690081161.10^{-4}$	$B_{24} = - 2,49208155440925.10^{-4}$
$D_{11} = + 2,24832720451627.10^{-1}$	$C_{24} = + 2,64698692223025.10^{-1}$
$E_{11} = - 19,7604995248947$	$D_{24} = - 92,0677351458392$
$A_{12} = + 4,71283002974.10^{-9}$	$A_{31} = + 3,74741790363001.10^{-9}$
$B_{12} = - 9,51862486359735.10^{-6}$	$B_{31} = - 8,04477065421283.10^{-6}$
$C_{12} = + 7,14734886946203.10^{-3}$	$C_{31} = + 7,19507920447765.10^{-3}$
$D_{12} = - 1,40966951909446$	$D_{31} = - 3,43168737930173$
$A_{13} = - 1,7309298889.10^{-10}$	$E_{31} = + 9,20563551017999.10^{-2}$
$B_{13} = + 5,9282482858166.10^{-7}$	$F_{31} = - 1,31689107776392.10^5$
$C_{13} = - 7,60788021400534.10^{-4}$	$G_{31} = + 7,84848615387158.10^6$
$D_{13} = + 4,34161974403507.10^{-1}$	$A_{32} = - 1,02999929999133.10^{-7}$
$E_{13} = - 92,4326303929912$	$B_{32} = + 1,9649491129077.10^{-4}$
$A_{14} = + 1,4900304694511.10^{-7}$	$C_{32} = - 1,49932381887224.10^{-1}$
$B_{14} = - 4,91885520734158.10^{-4}$	$D_{32} = + 5,7197687327776.10^1$
$C_{14} = + 5,36699683728893.10^{-1}$	$E_{32} = - 1,09093581385737.10^4$
$D_{14} = - 193,202478756395$	$F_{32} = + 8,32235339152216.10^5$
$A_{21} = - 1,14014529735.10^{-9}$	$A_{33} = - 1,24426227184539.10^{-14}$
$B_{21} = + 1,67531978139911.10^{-6}$	$B_{33} = + 4,04718657031776.10^{-11}$
$C_{21} = - 9,08882444199525.10^{-4}$	$C_{33} = - 5,42476389657626.10^{-8}$
$D_{21} = + 2,16752704240992.10^{-1}$	$D_{33} = + 3,83453719187486.10^{-5}$
$E_{21} = - 19,1401744483758$	$E_{33} = - 1,50818487958787.10^{-2}$
$A_{22} = + 3,94733229554.10^{-9}$	$F_{33} = + 3,13290609065406$
$B_{22} = - 8,80230955925754.10^{-6}$	$G_{33} = - 2,68705202871765.10^2$
$C_{22} = + 71204175929132.10^{-3}$	$A_{34} = + 2,91416150066741.10^{-12}$
$D_{22} = - 1,51693629235734$	$B_{34} = - 1,13283125012076.10^{-8}$
$A_{23} = - 4,063170847.10^{-11}$	$C_{34} = + 1,75492461515059.10^{-5}$
$B_{23} = + 1,2766026669044.10^{-7}$	$D_{34} = - 1,35367312499577.10^{-2}$
$C_{23} = - 1,51310567267686.10^{-4}$	$E_{34} = + 5,19634529775182$
$D_{23} = + 8,06352019980025.10^{-2}$	$F_{34} = - 7,93613939888026.10^2$

$$A_{35} = + 3,43155174574725 \cdot 10^{-13}$$

$$B_{35} = - 1,649485624406 \cdot 10^{-9}$$

$$C_{35} = + 3,30240326354817 \cdot 10^{-6}$$

$$D_{35} = - 3,52492367253321 \cdot 10^{-3}$$

$$E_{35} = + 2,11561241478817$$

$$F_{35} = - 6,76972329415092 \cdot 10^2$$

$$G_{35} = + 9,02298445785902 \cdot 10^4$$

$$A_{36} = - 4,18865575784085 \cdot 10^{-6}$$

$$B_{36} = + 1,06463255368343 \cdot 10^{-2}$$

$$C_{36} = - 9,02001046939216$$

$$D_{36} = + 2,54739793827945 \cdot 10^3$$

ANEXO B – RELATÓRIO DOS DADOS DE ENTRADA NO *SOFTWARE* SMARTS (ESPECTRO PADRÃO)

Tabela A.1 – Dados de entrada para geração da distribuição da irradiância do espectro solar de referência.

Card ID	Value	Parameter/Description/Variable Name
1	IEC 60904-3 Ed. 2	Header
2	1	Pressure input mode (1 = pressure and altitude): ISPR
2a	1013.25 0.	Station Pressure (mb) and altitude (km): SPR, ALT
3	1	Standard Atmosphere Profile Selection (1 = use default atmosphere): IATM1
3a	'USSA'	Default Standard Atmosphere Profile: ATM
4	1	Water Vapor Input (1 = default from Atmosphere Profile): IH2O
5	1	Ozone Calculation (1 = default from Atmosphere Profile): IO3
6	1	Pollution level mode (1 = standard conditions/no pollution): IGAS (see X1.3)
7	370	Carbon Dioxide volume mixing ratio (ppm): qCO2 (see X1.3)
7a	1	Extraterrestrial Spectrum (1 = SMARTS/Gueymard): ISPCTR
8	'S&F_RURAL'	Aerosol Profile to Use: AEROS
9	0	Specification for aerosol optical depth/turbidity input (0 = AOD at 500 nm): ITURB
9a	0,084	Aerosol Optical Depth at 500 nm: TAU5
10	38	Far field Spectral Albedo file to use (38 = Light Sandy Soil): IALBDX
10b	1	Specify tilt calculation (1 = yes): ITILT
10c	38 37 180	Albedo and Tilt variables-Albedo file to use for near field, Tilt, and Azimuth: IALBDG, TILT, WAZIM
11	280 4000 1.0 1367.0	Wavelength Range-start, stop, mean radius vector correction, integrated solar spectrum irradiance: WLMN, WLMX, SUNCOR, SOLARC
12	2	Separate spectral output file print mode (2 = yes): IPRT
12a	280 4000.5	Output file wavelength-Print limits, start, stop, minimum step size: WPMN, WPMX, INTVL
12b	1	Number of output variables to print: IOTOT
12c	8	Code relating output variables to print (8 = Hemispherical tilt): OUT (8)
13	1	Circumsolar calculation mode (1 = yes): ICIRC
13a	0 2.9 0	Receiver geometry-Slope, View, Limit half angles: SLOPE, APERT, LIMIT
14	0	Smooth function mode (0 = none): ISCAN
15	0	Illuminance calculation mode (0 = none): ILLUM
16	0	UV calculation mode (0 = none): IUUV
17	2	Solar geometry mode (2 = Air Mass): IMASS
17a	1,5	Air mass value: AMASS

(IEC 60904-3, 2008)

**ANEXO C – RELATÓRIO DOS DADOS DE ENTRADA NO SOFTWARE
SMARTS (ESPECTRO DE FARROUPILHA - DEZEMBRO)**

Tabela – Dados de entrada para geração da distribuição da irradiância do espectro solar de Farroupilha.

Card ID	Value	Parameter/Description/Variable Name
1	'Dezembro'	Header
2	1	Pressure input mode (1 = pressure and altitude): ISPR
2a	926.2591389 0.783 0.002	Station Pressure (mb) and altitude (km): SPR, ALT
3	0	Standard Atmosphere Profile Selection (1 = use default atmosphere): IATM1
3a	20.31419513 75.03231767 'Summer' 20.31419513	Default Standard Atmosphere Profile: ATM
4	2	Water Vapor Input (1 = default from Atmosphere Profile): IH2O
5	1	Ozone Calculation (1 = default from Atmosphere Profile): IO3
6	1	Pollution level mode (1 = standard conditions/no pollution): IGAS (see X1.3)
7	370	Carbon Dioxide volume mixing ratio (ppm): qCO2 (see X1.3)
7a	0	Extraterrestrial Spectrum (1 = SMARTS/Gueymard): ISPCTR
8	'S&F_URBAN'	Aerosol Profile to Use: AEROS
9	0	Specification for aerosol optical depth/turbidity input (0 = AOD at 500 nm): ITURB
9a	0,084	Aerosol Optical Depth at 500 nm: TAU5
10	0	Far field Spectral Albedo file to use (38 = Light Sandy Soil): IALBDX
10b	1	Specify tilt calculation (1 = yes): ITILT
10c	0 29.1330 180	Albedo and Tilt variables-Albedo file to use for near field, Tilt, and Azimuth: IALBDG, TILT, WAZIM
11	280 4000 1.0 1366.1	Wavelength Range-start, stop, mean radius vector correction, integrated solar spectrum irradiance: WLMN, WLMX, SUNCOR, SOLARC
12	2	Separate spectral output file print mode (2 = yes): IPRT
12a	280 4000 0.5	Output file wavelength-Print limits, start, stop, minimum step size: WPMN, WPMX, INTVL
12b	3	Number of output variables to print: IOTOT
12c	8 9 10	Code relating output variables to print (8 = Hemispherical tilt): OUT (8)
13	1	Circumsolar calculation mode (1 = yes): ICIRC
13a	0 2.9 0	Receiver geometry-Slope, View, Limit half angles: SLOPE, APERT, LIMIT
14	0	Smooth function mode (0 = none): ISCAN
15	0	Illuminance calculation mode (0 = none): ILLUM
16	0	UV calculation mode (0 = none): IUUV
17	2	Solar geometry mode (2 = Air Mass): IMASS
17a	1.14	Air mass value: AMASS

(GUEYMARD, 2003)

ANEXO D – EXEMPLOS DE DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CAXIAS DO SUL.

Amostra da tabela com os dados meteorológicos de Caxias do Sul, adaptados para exposição das condições climáticas inerentes ao mês de setembro (2000 à 2014).

<p>----- BDMEP - INMET ----- Estação : CAXIAS DO SUL - RS (OMM: 83942) Latitude (graus) : -29.16 Longitude (graus) : -51.2 Altitude (metros): 759.60 Estação Operante Início de operação: 12/04/1912 Período solicitado dos dados: 01/01/2000 a 31/12/2014 Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP ----- Obs.: Os dados aparecem separados por (ponto e vírgula) no formato txt. Para o formato planilha XLS, siga as instruções -----</p>						
Estação	Data	Insolação Total	Nebulosidade Media	Pressão Media	Temp. Compensada Media	Umidade Relativa Media
83942	set-00	174,2	5.822.222	931.662.222	14.084.667	77.125.000
83942	set-01			932.516.129		
83942	set-02	198	5.133.333	932.830.000	13.496.000	74.233.333
83942	set-03	175,8	5.916.667	932.981.667	14.253.333	
83942	set-04	139,3	7.033.333	931.394.444	16.712.667	75.833.333
83942	set-05	125	6.966.667	931.550.000	11.961.333	82.575.000
83942	set-06	192,9	5.600.000	929.880.000	13.512.667	72.150.000
83942	set-07	133,6	5.588.889	932.123.333	17.168.667	73.108.333
83942	set-08	182,6	6.822.222	931.066.667	12.482.000	75.516.667
83942	set-09	131,6	7.355.556	927.767.778	13.929.333	84.441.667
83942	set-10	162,4	6.400.000	927.853.333	15.160.000	75.908.333
83942	set-11	190,1	4.766.667	930.745.556	14.560.000	70.450.000
83942	set-12	170,3	6.611.111	929.577.778	15.533.333	73.633.333
83942	set-13	165,6	6.455.556	929.134.444	15.038.000	76.116.667
83942	set-14	140,4	7.187.500	927.857.778	16.186.667	80.366.667
		163	6.261.409	930.596.075	14.577.048	76.266.026

(INMET, 2015) - adaptado pelo autor.

ANEXO F – EXEMPLOS DE DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BENTO GONÇALVES.

Amostra da tabela com os dados meteorológicos de Bento Gonçalves, adaptados para exposição das condições climáticas inerentes ao mês de setembro (2000 à 2014).

<p>----- BDMEP - INMET ----- Estação : BENTO GONCALVES - RS (OMM: 83941) Latitude (graus) : -29.15 Longitude (graus) : -51.51 Altitude (metros): 640.00 Estação Operante Início de operação: 01/02/1918 Período solicitado dos dados: 01/01/2000 a 31/12/2014 Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP ----- Obs.: Os dados aparecem separados por Para o formato planilha XLS, siga as instruções -----</p>						
Estação	Data	Insolação Total	Nebulosidade Media	Pressão Media	Temp. Compensada Media	Umidade Relativa Media
83941	set-00	171,3	6.000.000		14.780.667	72.116.667
83941	set-01					
83941	set-02	190,7	5.322.222		13.971.333	70.887.931
83941	set-03	174,5	5.988.889		14.688.000	76.125.000
83941	set-04	145,2	6.900.000		17.213.333	76.933.333
83941	set-05	129,6	6.855.556		12.764.667	80.216.667
83941	set-06	193,3	5.322.222		14.283.333	71.850.000
83941	set-07	181,3	6.266.667		17.699.333	73.766.667
83941	set-08	185,8	6.277.778		13.173.333	75.016.667
83941	set-09	134,4	6.844.444		14.566.000	83.558.333
83941	set-10	168,8	5.977.778		15.486.667	79.558.333
83941	set-11	208,9	4.366.667		15.058.000	70.425.000
83941	set-12	178,3	6.166.667		16.012.667	73.291.667
83941	set-13	166,7	5.700.000		15.302.000	75.683.333
83941	set-14					
		171	5.999.145	0	14.999.949	75.340.738

(INMET, 2015) - adaptado pelo autor.