

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

CAROLINA SCHUMACHER DEFFERRARI

METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ÓPTICA DE CÉLULAS  
FOTOVOLTAICAS ENCAPSULADAS

PORTO ALEGRE

2017

CAROLINA SCHUMACHER DEFFERRARI

METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ÓPTICA DE CÉLULAS  
FOTOVOLTAICAS ENCAPSULADAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Minas Materiais  
e Metalúrgica da Universidade Federal do Rio  
Grande do sul, como requisito parcial à  
obtenção do título de Mestre em Engenharia,  
modalidade Acadêmica.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

PORTO ALEGRE

2017

CAROLINA SCHUMACHER DEFFERRARI

METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ÓPTICA DE CÉLULAS  
FOTOVOLTAICAS ENCAPSULADAS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Banca Examinadora

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Celia de Fraga Malfatti - PPGE3M UFRGS

Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin - UERGS

Prof. Dr. Marcelo Barbalho Pereira – PGMICRO UFRGS

Aprovado em outubro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Arno Krenzinger por dividir comigo um pouco do seu vasto conhecimento e sabedoria e por toda a contribuição e apoio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos colegas do LABSOL pelo ambiente amigável e acolhedor, pelas diversas dicas e por estarem sempre prontos para ajudar a resolver quaisquer problemas, em especial agradeço ao Daniel Aguiar e ao Cesar Prieb.

Agradeço à minha família por todo o apoio e compreensão, em especial à minha mãe, Eloisa Schumacher, e a todos os meus amigos.

Agradeço ao Programa de Pós Graduação pela oportunidade de receber essa formação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela bolsa de estudos.

## RESUMO

As ferramentas computacionais utilizadas em diferentes áreas de pesquisa têm como vantagem sobre análises e ensaios reais a possibilidade de analisar sistemas em diferentes condições de forma mais ágil e com menor consumo de tempo e recursos. A modelagem óptica de dispositivos fotovoltaicos é bastante difundida. Existem diferentes trabalhos na área, com diferentes escopos e graus de detalhamento, que permitem a análise e melhor compreensão das diferentes etapas da conversão da radiação em energia elétrica, expandindo as possibilidades de otimização. No presente trabalho foi desenvolvida, em uma etapa inicial, uma metodologia computacional para análise óptica de módulos fotovoltaicos, para então, em uma segunda etapa, serem realizados estudos do desempenho de diferentes materiais inseridos no conjunto de camadas que compõe os módulos, através da metodologia. O modelo óptico que embasa o método tem como foco os módulos de silício monocristalino. Esses módulos agregam de três a quatro camadas transparentes sobre as células fotovoltaicas. Ao incidir nesse conjunto de camadas radiação é submetida a diferentes eventos de extinção, como função do comprimento de onda da radiação e ângulo de incidência, que devem ser previstos em um modelo de forma a obter-se resultados válidos de transmissividade.

A metodologia propõe a realização de uma análise aprofundada dos fenômenos ópticos que ocorrem mediante a incidência de radiação em um módulo fotovoltaico de modo a auxiliar na análise da adequação e desempenho de diferentes materiais ao sistema óptico formado. A otimização da transmissão de radiação em um módulo fotovoltaico tem uma influência direta e significativa sobre a eficiência de tais dispositivos, justificando sua importância. A validação do modelo foi realizada através da literatura, em partes, e apresentou coerência com os resultados de referência.

Foram produzidos na segunda etapa estudos de desempenho de materiais ou propriedades isoladamente. No primeiro estudo foram analisados três materiais para aplicação como filme de passivação sobre a célula, sendo eles  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , e  $\text{TiO}_2$ ; o filme de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  apresentou o melhor desempenho. O segundo estudo, de avaliação da influência do índice de refração do encapsulante na transmissividade do sistema, demonstrou que a variação desse parâmetro tem muito pouca influência. No terceiro estudo foi analisado o potencial dos materiais PDMS e  $\text{TiO}_2$  como filmes anti-reflexo sobre vidro. O PDMS gerou melhores resultados de transmissividade. Por fim um estudo de desempenho de um conjunto de materiais frente à mudança do espectro incidente foi realizado. Foi utilizado até então o espectro de referência, que foi então comparado a um espectro médio de um dia de equinócio da cidade de Porto Alegre. O desempenho do sistema foi em torno de 3% inferior em incidência normal.

Palavras-chave: Energia Solar. Módulo Fotovoltaico. Transmissão de Radiação. Seleção de Materiais. Propriedades Ópticas. Modelo Óptico.

## ABSTRACT

Computational tools raise the possibility of studying and understanding systems under different conditions in a faster and less resource and time consuming way. The optical modeling of photovoltaic devices is a very developed issue, and paperworks and projects in different scopes e levels of detail were produced, providing a better understanding of the different steps of converting light into electricity, expanding optimization possibilities. For this project a computational methodology was developed, as an initial step, for the optical assessment of the transmission of radiation in photovoltaic modules. In a second step, studies were performed using the method as a tool for analyzing the system formed by the layers covering the cells embedded in modules. The optical model describes monocrystalline silicon modules, which are constituted by three to four layers covering the cell. Once it penetrates the set of layers, incident light suffers different extinction phenomena, which are predicted in this model in order to generate valid results. It's a function of wavelength and incidence angle of the incoming radiation.

The model presented aims to deeply analyse and understand the optical phenomena light undergoes through its way from the external environment to the interior of the cell, supporting the process of observing the performance and adequacy of different materials as the referred layers. Optimizing transmission of radiation in a photovoltaic device plays a main role in increasing the efficiency of the energy conversion process, which is why it's so important. The model was validated by literature in parts, and showed coherence within reference results.

Studies were produced in a second step of this work, using the method, concerning optical issues, for the thin film on top of the cell, the refractive index of the encapsulating material, and the optical effect of coating the outer glass surface. In the first study  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  were analyzed; the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  film produced the best results. The second study, concerning encapsulant's refractive index, demonstrates this parameter has a very weak influence in the system's transmission. The third one observed the performance of two materials, PDMS and  $\text{TiO}_2$ , as AR coating,. The PDMS film produced a better effect. At last, the best performance set of layers was analyzed under a representative spectral distribution of an equinox day of the city of Porto Alegre, considering so far it was used the standard. The transmission suffered a slight decrease, around 3%.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Module. Materials Selection. Optical Properties. Optical Model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Capacidade de geração fotovoltaica instalada mundialmente acumulada. *APAC exclui China [Solar Power Europe, 2016].	2
Figura 1.2 - Parcela de contribuição em potência total instalada por país ao final de 2015 [Solar Power Europe, 2016].	2
Figura 2.1 - Ângulos de elevação e desvio azimutal do sol sobre uma superfície horizontal, determinados a partir de dados de latitude, longitude e dia do ano e horário. [Pinho e Galdino, 2014].	8
Figura 2.2 - Acima: Espectro solar terrestre de Referência sobre um plano inclinado (incidência normal) definido pela norma ASTM G173; Abaixo: Espectro de um dia médio, de equinócio, em Porto Alegre, ao meio dia, sobre um plano com inclinação igual à latitude local (Incidência normal) gerado no Programa Espectro.	10
Figura 2.3 - Silício p, dopado por átomos de Boro (Esquerda) e silício n, dopado por átomos de Fósforo (Direita). [Kano, 1998].	11
Figura 2.4 - Diagrama de bandas do material tipo p (esquerda) e tipo n (direita); $E_c$ - limite inferior da BC; $E_v$ - limite superior da BV; $E_f$ - Energia do nível de Fermi; $E_a$ - Energia do nível gerado pelo Boro; $E_d$ - Energia do nível gerado pelo fósforo [Kano, 1998].	11
Figura 2.5 - Formação de uma junção p-n; (a) concentração de carga em cada região; (b) Campo elétrico formado; (c) Potencial resultante. $qN_D$ - Carga região N; $qN_A$ - Carga total região P; $\epsilon$ - Campo elétrico; $V_{bi}$ - Potencial da junção [Kano, 1998].	12
Figura 2.6 - Níveis de energia em uma junção p-n, e correntes de deriva de elétrons e de lacunas, e correntes de difusão, de elétrons e lacunas. $\epsilon$ - Campo elétrico; $E_c$ - limite inferior da banda de condução; $E_v$ - Limite superior da banda de valência; $E_f$ - Nível de Fermi [Kano, 1998].	13
Figura 2.7 - Absorção de radiação por uma célula e geração de corrente [Krauter, 2006].	14
Figura 2.8 - Resposta Espectral do Si-m, teórica e real [Solar Cell Operation PVEDUCATION].	15
Figura 2.9 - Curva I-V de um dispositivo fotovoltaico [Pinho e Galdino, 2014].	16
Figura 2.10 - Circuito equivalente de uma célula - Modelo de um diodo [Pinho e Galdino, 2014].	18
Figura 2.11 - Influência da irradiância e da temperatura sobre a curva IV e os valores de ISC e VOC [Krauter, 2006].	19
Figura 2.12 - Imagens de MEV da superfície de uma lâmina de Si-m (Esquerda) após texturização por ataque químico em solução básica e da superfície de uma lâmina de Si-p (Direita) após texturização por ataque em solução ácida [Markvart, 2005].	20

Figura 2.13 - Índices de refração do silício, EVA, e de materiais empregados no filme sobre a célula: Nitreto de silício, óxido de silício e óxido de titânio, na faixa de $\lambda$ do espectro solar.....	22
Figura 2.14 - Célula de si-m em corte para visualização de todos os elementos que a compõem[Pinho e Galdino, 2014].....	22
Figura 2.15 - Camadas e elementos construtivos de um módulo fotovoltaico de Si-m. Adaptado de [DUPONT-What makes up a solar panel?]......	23
Figura 2.16 - Tabela de propriedades das marcas EVA 9110T e EVA 9120B de encapsulante da empresa 3M, retirada da folha de dados técnicos [3M EVA9110T EVA9120B]. .....	25
Figura 2.17 - Tabela de propriedades da marca PV5400 de encapsulante da empresa DuPont, retirada da folha de dados técnicos do produto [PV5400-DuPont]. .....	25
Figura 2.18 - Folha de polímero encapsulante, forma como é comercializado [PV5400-DuPont].....	26
Figura 2.19 - Transmissividade de radiação de amostras de vidro float padrão e com baixo teor de ferro nas apresentações comerciais Solite e Solite Plus (com filme AR) da fabricante AGC Solar [AGC Solar].....	27
Figura 2.20 - Parcela real dos índices de refração do vidro, de dois materiais aplicáveis a filmes AR, PDMS e TiO <sub>2</sub> , e do meio externo.....	28
Figura 3.1 - Visão geral de modelagens ópticas e estudos computacionais existentes de estudo de células e módulos fotovoltaicos.....	30
Figura 3.2 - Visão geral do modelo desenvolvido por [Krauter e Grunow, 2006], na qual são apresentados três grandes elementos do sistema: Radiação incidente, transmissividade do sistema óptico e conversão da radiação pela célula.....	32
Figura 3.3 - Gráficos de curvas de nível representando a transmissividade total do sistema óptico de um módulo para as combinações de índice de refração do vidro ( $n_1$ ) e do encapsulante ( $n_2$ ), para o espectro padrão; incidência normal à esquerda e a 80° à direita. Resultados apresentados em [Krauter e Grunow,2006]. .....	32
Figura 3.4 - Representação do modelo desenvolvido em [Krauter, 2006].....	33
Figura 3.5 - Diagrama dos elementos do modelo OPTOS e somatórios das parcelas totais de radiação transmitida e refletida para produzir a equivalência da interface efetiva. R - Matriz de redistribuição da radiação refletida; T - Matriz de redistribuição da radiação transmitida; D - Matriz de propagação (interior dos materiais) [Tucher e Eisenlohr, 2016].....	35
Figura 3.6 - Resultados de redistribuição da radiação refletida. (a) representação das interfaces; (b) resultado de reflexão da interface ar-EVA, (c) resultado de reflexão da interface EVA-Si, com textura de micropirâmides; (c) resultado de reflexão da superfície equivalente [Tucher e Eisenlohr, 2016]. .....	36
Figura 3.7 - Texturas analisadas e faixas de ângulo de incidência da radiação utilizadas (esquerda) e resultados de número médio de incidências de um feixe, e	

refletância em $\lambda=700$ nm, para a textura piramidal simples (direita), apresentados em [Magnin e Harari, 2014].	38
4.1 - Visão geral do modelo desenvolvido.	39
Figura 4.2 - Sistema óptico formado sobre a célula e eventos que ocorrem desde a incidência da radiação na interface superior até a entrada da radiação na célula.	41
Figura 4.3 - Representação esquemática de interferência em um filme fino, para interferência 100% construtiva, e reflexão máxima (Esquerda), e para interferência 100% destrutiva, situação em que obtém-se mínima reflexão (Direita).	44
Figura 4.4 - Modelo da textura composta por pirâmides e vetores de face e de direção da radiação.	45
Figura 4.5 - Obtenção de fatores de visão da radiação refletida após incidência a $25^\circ$ , e abaixo fatores de visão da radiação refletida após incidência a $25^\circ$ , nessa face.	46
Figura 4.6 - Resposta Espectral interna de uma célula de alta qualidade gerada no programa PC1D.	48
Figura 4.7 - Refletância da radiação monocromática a 700 nm da superfície do silício para incidência de 0 a $90^\circ$ , e orientação azimutal de 0 a $45^\circ$ , proposto por [Magnin e Harari, 2014].	51
Figura 4.8 - Refletividade da radiação monocromática de 700 nm da superfície texturizada do silício – dados de referência, extraídos da figura 4.7 e dados gerados pelo modelo proposto.	52
Figura 5.1 - Densidade de corrente de curto-circuito do sistema (Acima) e de uma célula não encapsulada (Abaixo) com filmes de $\text{Si}_3\text{N}_4$ , para uma faixa de espessuras de 10 a 150 nm.	56
Figura 5.2 - Densidade de corrente de curto-circuito do sistema (Acima) e de uma célula não encapsulada (Abaixo) com filmes de $\text{SiO}_2$ , para uma faixa de espessuras de 10 a 250 nm.	57
Figura 5.3 - Densidade de corrente de curto-circuito do sistema (Acima) e de uma célula não encapsulada (Abaixo) com filmes de $\text{TiO}_2$ , para uma faixa de espessuras de 10 a 150 nm.	58
Figura 5.4 - Ampliações dos gráficos das Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente, para os filmes encapsulados.	59
Figura 5.5 - $J_{sc}$ produzida em função da espessura para filmes de $\text{Si}_3\text{N}_4$ , com e sem encapsulamento (SE).	60
Figura 5.6 - $J_{sc}$ produzida em função da espessura para filmes de $\text{SiO}_2$ , com e sem encapsulamento (SE).	60
Figura 5.7 - $J_{sc}$ produzida em função da espessura para filmes de $\text{TiO}_2$ , com e sem encapsulamento (SE).	61
Figura 5.8 - Reflexão nas interfaces superior e inferior ao filme de $\text{Si}_3\text{N}_4$ , e reflexão final, após interferência, para algumas espessuras do filme, apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.	62

Figura 5.9 - Reflexão nas interfaces superior, inferior, e final (após interferência) na espessura ideal, para o filme de $\text{Si}_3\text{N}_4$ , com e sem encapsulamento. Apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.....	62
Figura 5.10 - Reflexão nas interfaces superior, inferior, e final (após interferência) na espessura ideal, para o filme de $\text{SiO}_2$ , com e sem encapsulamento. Apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.....	63
Figura 5.11 - Reflexão nas interfaces superior, inferior, e final (após interferência) na espessura ideal, para o filme de $\text{TiO}_2$ , com e sem encapsulamento. Apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.....	63
Figura 5.12 - $J_{sc}$ relativa à espessura de melhor desempenho para cada material estudado, com e sem encapsulamento.....	64
Figura 5.13 - $J_{sc}$ gerada por sistemas com os mesmos filmes da figura 5.12, porém com índice de refração do encapsulante de 1,51, e não mais de 1,49. ....	65
Figura 5.14 - $J_{sc}$ gerada em função do ângulo de incidência para alguns índices de refração do encapsulante. ....	66
Figura 5.15 - $J_{sc}$ gerada em função do índice de refração do encapsulante, para alguns ângulos de incidência, à esquerda, e mesmo gráfico com ampliação da região de $J_{sc}$ de 30 a 36 $\text{mA}/\text{cm}^2$ , à direita.....	66
Figura 5.16 - Transmissividade ponderada nas interfaces ar-vidro (T1), vidro-encapsulante (T3), encapsulante-Silício (TSi) e resultante do sistema (Ttotal) para alguns índices de refração do encapsulante. Abaixo, uma ampliação do mesmo gráfico no eixo da transmissividade.....	67
Figura 5.17- $J_{sc}$ em função de $\lambda$ para algumas espessuras de filme de PDMS, acima, e de $\text{TiO}_2$ , abaixo, além das curvas, presentes em ambos, de $J_{sc}$ ideal e $J_{sc}$ do sistema sem filme.....	68
Figura 5.18 - $J_{sc}$ em função da espessura de filme para ângulos de $0^\circ$ a $60^\circ$ , para o PDMS, à esquerda, e $\text{TiO}_2$ , à direita.....	69
Figura 5.19 - Transmissividade Ponderada do sistema (Ttot) e da interface ar-vidro (T1) contendo filmes de PDMS em três espessuras, da interface vidro-encapsulante (T3), e da interface encapsulante-Si (TSi).....	70
Figura 5.20 - Transmissividade Ponderada do sistema (Ttot) e da interface ar-vidro (T1) contendo filmes de PDMS em três espessuras, da interface vidro-encapsulante (T3), e da interface encapsulante-Si (TSi).....	70
Figura 5.21 - Curvas da espessura de máxima $J_{sc}$ dos filmes de PDMS e $\text{TiO}_2$ e curvas de $J_{sc}$ do sistema sem filme e $J_{sc}$ Ideal. ....	71
Figura 5.22 - $J_{sc}$ ideal e após perdas por transmissão pelo sistema óptico, com dados do espectro padrão, e dados do espectro PA. ....	72
Figura 5.23 - Parcelas diretas normalizadas sobrepostas dos dois espectros em questão, acima, e parcelas difusas na mesma condição, abaixo. ....	72
Figura 5.24 - Transmissividade ponderada da radiação no sistema óptico de melhor desempenho para o espectro de referência e para o Espectro PA.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Dados de entrada do programa relativos às camadas e materiais. ....	41
Tabela 4-2 - Argumentos da equação de transmissividade total do sistema. ....	48
Tabela 5-1 - Relação entre o ângulo de incidência e o ângulo que a radiação assume no interior do material para diferentes comprimentos de onda. ....	54
Tabela 5-2 - Valores máximos e mínimos de $J_{sc}$ para os três filmes encapsulados e não encapsulados, espessura de ocorrência e relação com $J_{sc}$ ideal. ....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

Si-c	Silício Cristalino
Si-m	Silício monocristalino
Si-p	Silício Policristalino
$\lambda$	Comprimento de Onda [nm]
$E_g$	Amplitude Energética da Banda Proibida [eV]
$E_c$	Limite Energético Inferior da Banda de Condução [eV]
$E_v$	Limite Energético Superior da Banda de Valência [eV]
$E_f$	Energia de um Fóton [eV]
$E_{fe}$	Energia do nível de Fermi [eV]
$V_{bi}$	Potencial de uma Junção p-n [V]
FF	Fator de Preenchimento
EQI	Eficiência Quântica Interna [e <sup>-</sup> /fóton]
EQE	Eficiência Quântica Externa [e <sup>-</sup> /fóton]
REI	Resposta Espectral Interna [A/W]
REE	Resposta Espectral Externa [A/W]
$j_{FG}$	Densidade de Corrente Fotogerada [mA/nm.cm <sup>2</sup> ]
$J_{FG}$	Densidade total de Corrente Fotogerada [mA/cm <sup>2</sup> ]
$J_{SC}$	Densidade de Corrente de Curto-circuito [mA/cm <sup>2</sup> ]
$V_{OC}$	Tensão de Circuito Aberto [V]
$P_{MP}$	Potência no Ponto de Máxima Potência [W]
$R_S$	Resistência Interna em Série [Ohm]
$R_P$	Resistência Interna em Paralelo [Ohm]
D	Corrente de Difusão Interna
$\theta$	Ângulo da Radiação Relativo ao Plano da Célula [°]

$\alpha$	Ângulo da Radiação Relativo às Faces da Textura da Célula [°]
r	Refletividade de uma interface
t	Transmissividade de uma Interface
g	Espectro [mW/nm.cm <sup>2</sup> ]
G	Intensidade total de um Espectro [mW/cm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\text{sistema}}$	Transmissividade do Sistema [ $\lambda^{-1}$ ]
$T_{\text{pond}}$	Transmissividade Ponderada do Sistema
UV	Radiação na faixa do ultravioleta
IV	Radiação na faixa do infravermelho

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.	MOTIVAÇÃO.....	4
1.2.	OBJETIVOS.....	4
1.3.	ESCOPO DO TRABALHO.....	4
<b>2.</b>	<b>ENERGIA SOLAR E CONVERSÃO FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>7</b>
2.1.	O RECURSO SOLAR.....	7
2.2.	O DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO .....	9
2.2.1.	<b>Os Materiais Semicondutores</b> .....	9
2.2.2.	<b>Semicondutores Extrínsecos</b> .....	10
2.2.3.	<b>A Junção p-n</b> .....	12
2.2.4.	<b>O Dispositivo Fotovoltaico</b> .....	13
2.2.5.	<b>Eficiência Quântica e Resposta Espectral</b> .....	14
2.2.6.	<b>Características elétricas</b> .....	16
2.3.	CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO .....	19
2.3.1.	<b>Características Construtivas da Célula</b> .....	19
2.3.2.	<b>Características Construtivas do Módulo</b> .....	23
<b>3.</b>	<b>MODELAGEM ÓPTICA E ESTUDO COMPUTACIONAL DE CÉLULAS E MÓDULOS</b> <b>29</b>	
<b>4.</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO</b> .....	<b>39</b>
4.1.	DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO .....	42
4.1.1.	<b>Transmissividade nas interfaces</b> .....	42
4.1.2.	<b>Transmissão Pós-absorção no Interior das Camadas</b> .....	43
4.1.3.	<b>Redução da Reflexão por Mecanismo de Interferência da Radiação</b> .....	43
4.1.4.	<b>Modelo da Textura na Superfície do Silício</b> .....	44
4.1.5.	<b>Transmissividade total do Sistema</b> .....	47
4.2.	MODELO DA CÉLULA .....	48
4.3.	MODELO DA RADIAÇÃO INCIDENTE .....	49
4.4.	INFORMAÇÕES OBTIDAS A PARTIR DA TRANSMISSIVIDADE TOTAL DO SISTEMA, ESPECTRO INCIDENTE E RESPOSTA ESPECTRAL.....	49
4.5.	VALIDAÇÃO DO MODELO ÓPTICO .....	51
<b>5.</b>	<b>ESTUDOS REALIZADOS A PARTIR DO MODELO</b> .....	<b>53</b>
5.1.	ANÁLISE DE MATERIAIS EMPREGADOS NO FILME DE PASSIVAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA E INFLUÊNCIA DA ESPESSURA .....	54

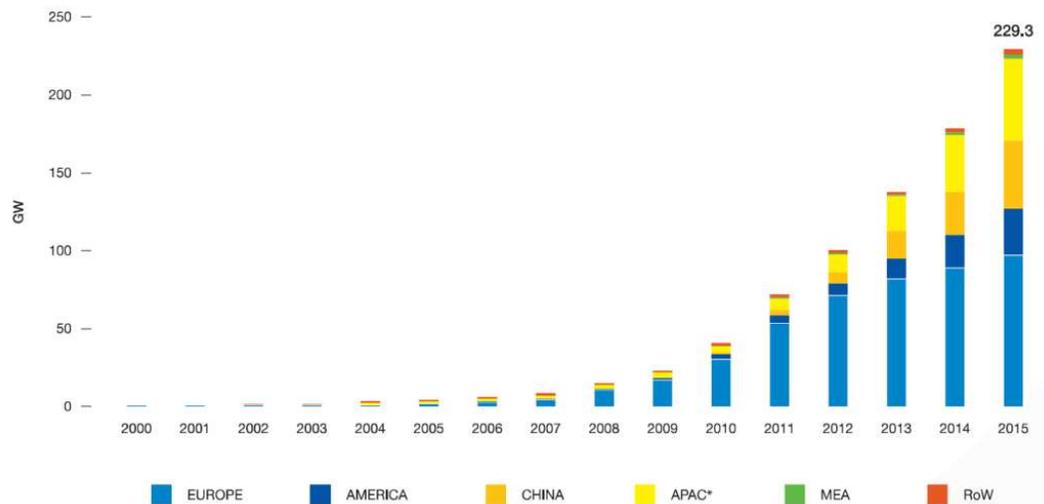
5.2.	INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO ENCAPSULANTE NA TRANSMISSIVIDADE DO SISTEMA.....	64
5.3.	EFEITO ÓPTICO DE UM FILME SOBRE O VIDRO E INFLUÊNCIA DA ESPESSURA.....	67
5.4.	COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE MAIS ELEVADA TRANSMISSIVIDADE PARA O ESPECTRO PADRÃO, E PARA UM ESPECTRO MÉDIO DE UM DIA DE EQUINÓCIO EM PORTO ALEGRE.....	71
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

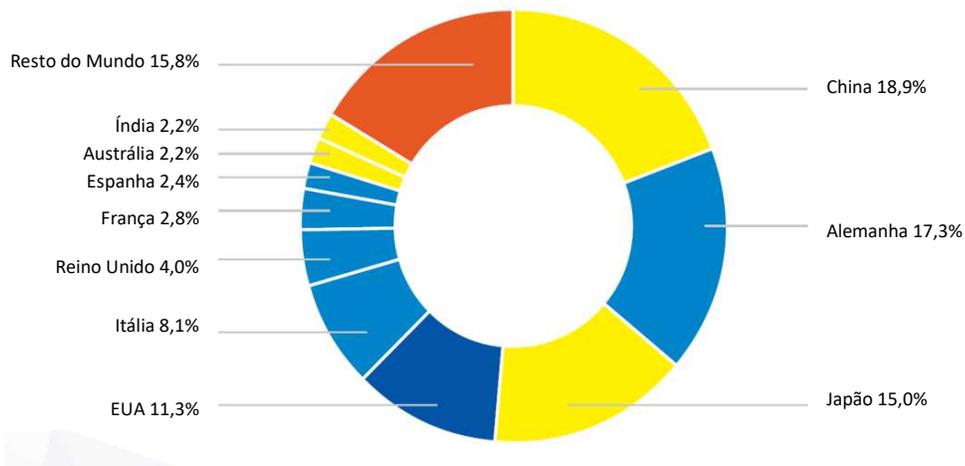
A pesquisa em geração de energia elétrica de origem fotovoltaica teve início na década de 50, sendo no início do seu desenvolvimento voltada a pesquisas e aplicações espaciais somente, até que na década de oitenta passou a ser tratada como uma alternativa de geração de energia elétrica terrestre, conforme [Krauter, 2006]. Desde então passa por um lento processo de viabilização comercial, por meio de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. Desde 2005 observa-se uma rápida aceleração industrial e comercial do mercado fotovoltaico, incentivada por questões sociais e ambientais, como a crescente conscientização da população, governos e empresas com impactos ambientais causados pelo homem, bem como crise de combustíveis fósseis, e conhecimento sobre os impactos causados pelas formas convencionais de geração de energia (hidrelétrica, termoelétrica por meio da queima de combustíveis ou nuclear).

Conforme dados de maio de 2017 do Ministério de Minas e Energia [MME, 2017] mais de 70% da energia elétrica gerada pelas concessionárias é proveniente de hidrelétricas. Apesar de a energia hídrica ser considerada limpa, exige grandes modificações no ambiente, e é produzida de forma altamente centralizada, sendo associada a significativas perdas em transmissão. Ainda segundo a fonte, a geração térmica representa 21,6% da matriz elétrica atualmente, e também representa centralização e perdas significativas em transmissão. Além disso, a queima de combustíveis fósseis também é responsável pela emissão de CO<sub>2</sub> e poluentes. A energia eólica ganhou espaço através de políticas públicas e teve rápido crescimento nos últimos anos; representa hoje 6% da produção de energia elétrica no país. A geração de energia solar e eólica tem muito potencial no país por serem renováveis, limpas, e apresentarem grande disponibilidade da fonte em seu território, em especial, a energia solar (em regiões amazônicas, a eólica não é adequada), segundo [Pereira, 2017]. Além disso, a geração de energia solar tem total flexibilidade quando à descentralização, podendo ser aproveitada em sistemas individuais, domésticos, sem excluir a possibilidade de ser gerada em grandes usinas, quando necessário e mais adequado. Ainda representa menos de 0,1% da matriz elétrica do país, mas seu crescimento é rápido.

A capacidade mundial de geração de energia solar instalada tem apresentado, desde 2000, um crescimento muito rápido; de 2005 a 2015 houve um aumento de 145 vezes em tal valor. Na figura 1.1 é apresentada a potência instalada acumulada mundial, na qual é possível visualizar a magnitude desse crescimento. No início do período o país com maior taxa de crescimento foi Alemanha, sendo depois ultrapassada por China e Japão; os países com maior potência instalada tem sua parcela de contribuição apresentada na figura 1.2. Até 2020 está prevista a potência instalada acumulada, no pior cenário, de 489 GW e, no melhor cenário, de 719 GW, sendo os países com mais rápido crescimento previsto China, Estados Unidos e Índia, segundo o estudo realizado pela *Solar Power Europe (2016)*.



**Figura 1.1 - Capacidade de geração fotovoltaica instalada mundialmente acumulada. \*APAC exclui China [Solar Power Europe, 2016].**



**Figura 1.2 - Parcela de contribuição em potência total instalada por país ao final de 2015 [Solar Power Europe, 2016].**

No Brasil, considerado um mercado em ascensão, junto com México e Emirados Árabes, é previsto, no melhor cenário, um aumento de 9,5 GW de potência instalada até 2020, e, no pior cenário, de 4,6GW, sendo que até 2015 eram 70MW de potência instalada no país, segundo o mesmo estudo. O segmento de mercado em rápido desenvolvimento é o de projeto e instalação de sistemas, mediante compra dos equipamentos, sendo em sua maioria produzidos por empresas brasileiras, com exceção dos módulos, cuja produção no país ainda é muito incipiente, e se dá em sua maioria por empresas estrangeiras. A potência instalada no país é em sua maior parte composta por módulos importados.

Sendo a fonte da energia fotovoltaica o Sol, não há como alterar e manipular a fonte, de modo que as pesquisas e o desenvolvimento na área são voltadas a otimizar sua coleta. Nesse sentido, existem estudos em todos os âmbitos do processo de conversão da energia radiativa em energia elétrica, desde a capacidade de penetração da radiação nas camadas dos materiais que compõem os dispositivos, com mínima perda por reflexão, à eficiência da geração de cargas, na região ativa do dispositivo, e sua coleta por um circuito elétrico e utilização eficiente.

Na construção de um módulo fotovoltaico de qualquer tipo são inseridas sobre a célula (ou material ativo) camadas de proteção de diferentes tipos, constituídas por materiais idealmente de alta transparência. Assim, forma-se um sistema óptico composto por todas as camadas e interfaces através das quais a radiação deve ser transmitida, desde o ar até atingir a região ativa das células. A análise óptica desses sistemas, de modo que se possa obter informações da quantidade de radiação que uma célula realmente recebe a partir de um espectro incidente, é fundamental na determinação da qualidade e eficiência do módulo como um todo.

A primeira tecnologia fotovoltaica desenvolvida foi a do silício cristalino (Si-c); inicialmente em células de silício monocristalino (Si-m) e, em seguida, policristalino (Si-p). As células e módulos de Si-m e Si-p são classificados como a primeira geração de dispositivos fotovoltaicos. A segunda geração refere-se aos módulos de filmes finos, que são produzidos por deposição química ou física a vapor, camada a camada. Por isso, há uma maior liberdade quanto ao formato, e os módulos dessa tecnologia são contínuos em toda a sua superfície. As camadas são amorfas, e apresentam alta absorvidade, por isso podem ter espessuras muito inferiores aos *waffers* de silício cristalino. Os principais tipos são os módulos CIS e CIGS (Disseleneto de cobre e índio e disseleneto de cobre índio e galio), de CdTe (Telureto de cádmio), e silício amorfo. Apesar de sua fabricação consumir menos energia e menos material do que a produção dos módulos Si-c, apresentam eficiências inferiores e utilizam, em alguns casos, materiais com reservas escassas.

Existem ainda as tecnologias de células sensibilizadas por corantes (DSSC), e as orgânicas. São mais recentes e estão em um momento mais inicial de seu desenvolvimento. Tem muito pouca expressão comercial e apresentam baixas eficiências. As células poliméricas podem, através do aprimoramento das tecnologias, ganhar grande espaço no futuro, pois são produzidas por processos simples (deposição das camadas por impressão) a temperaturas que não ultrapassam 300 °C, e em menos etapas, além de consumirem muito menos material e serem flexíveis, e facilmente instaladas e transportadas. As células DSSC apresentam problemas de estabilidade e difícil aplicação real; por seu princípio de funcionamento são na verdade células fotoeletroquímicas, e não fotovoltaicas (sua região ativa é diferente de uma junção p-n).

Os dispositivos fotovoltaicos mais difundidos, de tecnologia mais bem estabelecida e mais elevada eficiência de conversão, em torno de 20% para Si-m, e 17% para Si-p, são, nesse momento, ainda, os módulos compostos por células de Si-c; correspondem a mais de 90% dos módulos em funcionamento atualmente. Existem poucos outros materiais, a

exemplo do arsenieto de gálio (GaAs), que produzem células com mais elevada eficiência, porém utilizam elementos escassos e de elevado custo, além de seu descarte ser crítico devido à toxicidade do arsênio, não sendo vantajosa sobre o Si sua ampla produção industrial, e só encontram espaço em mercados bem específicos e limitados.

### 1.1. MOTIVAÇÃO

A construção dos módulos de Si-c resulta em um sistema óptico composto por camadas sobre a célula de diferentes materiais, e a transmissão da radiação através desse sistema, desde o ambiente externo até o interior da célula não é uma informação obtida de forma simples e direta, uma vez que os materiais que o compõem possuem diferentes características ópticas e combinados submetem a radiação a uma série de eventos de espalhamento e absorção. A otimização dessas camadas ópticas é um tópico de grande importância no assunto, já que causa um grande impacto na qualidade do dispositivo. Existem múltiplas ferramentas de pesquisa, análise, caracterização e desenvolvimento dos dispositivos fotovoltaicos. Um recurso bastante útil, que permite realizar análises dos sistemas antes de partir para a produção de amostras e protótipos são as metodologias de **modelagem computacional**.

Existem diferentes abordagens, ênfases e graus de detalhamento na construção de tais metodologias computacionais; a metodologia desenvolvida no presente trabalho propõe-se a fornecer uma ferramenta que permite uma análise aprofundada dos materiais empregados em tal sistema óptico, especificamente para módulos de Si-m, mantendo parâmetros periféricos fixos, de modo a mantê-lo enxuto e focado no aspecto óptico dos materiais empregados.

### 1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi propor uma metodologia de análise óptica de módulos fotovoltaicos. O principal objetivo específico foi desenvolver um modelo matemático da transmissão da radiação solar em um módulo fotovoltaico, para compor uma metodologia computacional de avaliação e seleção dos materiais quanto ao aspecto óptico, incluindo na análise dados de aproveitamento da radiação pela célula e de espectro incidente. A partir da metodologia foi atingido o segundo objetivo específico, de análise detalhada de alguns materiais aplicáveis às camadas do sistema, em função das espessuras e propriedades ópticas, para então serem propostas otimizações do sistema quanto à transmissão de radiação aproveitável pela célula.

### 1.3. ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em duas etapas. Na primeira foi desenvolvida uma metodologia computacional de caracterização do sistema óptico formado sobre uma célula de Si-m inserida em um módulo que simula a transmissão da radiação solar, desde o meio externo, até o interior da célula e os processos que ocorrem. A metodologia é baseada em um modelo matemático desenvolvido em *Matlab*, e prevê os principais fenômenos ópticos a que a radiação é submetida no processo.

O modelo tem como entrada as características de espessura, absorção de radiação e índice de refração dos materiais em função do comprimento de onda e do ângulo de incidência. Ele gera diferentes dados para análise da transmissividade do sistema, correspondente a cada combinação de características ópticas dos materiais, permitindo entender como a variação de propriedades ópticas de cada camada altera o comportamento do sistema e impacta no processo, e quais características são mais adequadas em cada contexto. A variação de desempenho em diferentes condições espectrais também pode ser analisada. O modelo da célula é fixo uma vez que o foco é a análise óptica das camadas construtivas do módulo.

A partir de dados de transmissividade combinados ao espectro incidente e resposta espectral da célula obtém-se valores da radiação total transmitida e corrente fotogerada. O cálculo é realizado ao longo de uma faixa espectral de interesse, que engloba mais de 99% do espectro solar, e para uma faixa de ângulos de incidência da radiação.

Por meio do método adotado é possível realizar uma análise preliminar do desempenho óptico ideal de diferentes materiais e características empregados em um dado sistema, e assim saber se é válida sua aplicação antes de partir para produção de amostras e ensaios reais. Diversos trabalhos realizam esse tipo de análise, com diferentes focos e graus de detalhamento. Muitos realizam os cálculos fazendo uma varredura ao longo de uma faixa de comprimentos de onda, porém somente para incidência normal; outros prevêem a variação da transmissão em função do ângulo, porém analisando isoladamente as interfaces, principalmente da superfície da célula, em função das texturas sobre ela produzidas. Há ainda os que baseiam-se em modelos complexos com elevado controle de parâmetros, podendo adequar-se a diferentes tecnologias e características geométricas de interfaces. Neste estudo procura-se estudar um tipo específico de dispositivo e um sistema com pouca variabilidade geométrica, mas buscando descrever de forma completa uma situação bastante delimitada, colocando o enfoque nos materiais e analisando de forma detalhada os eventos envolvidos na interação de tais camadas com a radiação incidente em função de suas propriedades.

Na etapa seguinte do trabalho foram realizadas as análises de desempenho de sistemas ópticos a partir da metodologia desenvolvida. Foi observada a transmissividade do sistema frente à variação de propriedades ópticas e espessura das camadas do encapsulante e do filme de passivação do silício, e foi observada a diferença de transmissividade de um mesmo sistema exposto a um espectro diferente do padrão, e mais próximo à realidade local.

Na apresentação da dissertação, a revisão bibliográfica está dividida entre os capítulos 2 e 3, sendo que o primeiro contém uma rápida revisão das características da radiação solar e da conversão de radiação em eletricidade, e o segundo apresenta uma revisão dos modelos ópticos desenvolvidos anteriormente.

No capítulo 4 é descrita a metodologia desenvolvida, e no capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos nos estudos realizados empregando a metodologia.

## 2. ENERGIA SOLAR E CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

### 2.1. O RECURSO SOLAR

A energia radiativa emitida pelo Sol é proveniente de reações termonucleares que ocorrem em seu interior, consumindo hidrogênio e produzindo elementos mais pesados. A radiação produzida por essas reações sofre absorções e reemissões à medida que a radiação é emitida para camadas mais externas, provocadas por diferentes elementos presentes na composição solar. A radiação resultante tem espectro semelhante ao da emissão de um corpo negro a uma temperatura em torno de 5800 K. A constante solar, definida como intensidade da radiação solar que chega à Terra, observada acima da atmosfera, já foi medida diversas vezes por diferentes entidades e, atualmente, é definida e aceita como  $1367 \text{ W/m}^2$  (varia  $\pm 1.1 \text{ W/m}^2$  em torno desse valor ao longo do ano) pela ASTM [Haag, 2012].

Quando a radiação atravessa a atmosfera, sofre extinção de diferentes origens, e em diferentes faixas de comprimento de onda. A atmosfera é constituída por uma mistura de gases, umidade e aerossóis. A mistura de gases corresponde à maior parte do volume, e é constituída 78% em fração molar por gás nitrogênio, 21% por gás oxigênio, e 1% por uma mistura de diversos outros gases. Os aerossóis são partículas sólidas e líquidas em suspensão nesse meio gasoso, provenientes de processos naturais, como erosão do solo por ventos, e de processos antropogênicos, como subprodutos de queima incompleta de combustíveis fósseis. O vapor d'água presente na atmosfera tem concentração bastante variável e é proveniente da evaporação de rios, lagos e oceanos, e da transpiração de florestas.

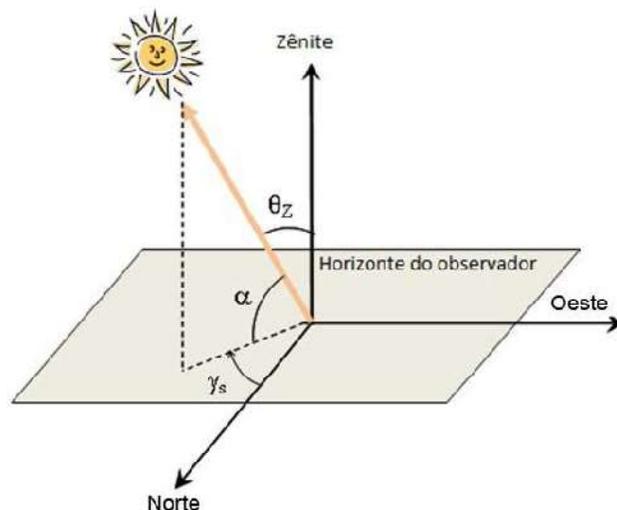
Todos esses componentes da atmosfera contribuem para a atenuação da radiação por diferentes mecanismos e em diferentes faixas e intensidades. As moléculas de gases puros e secos provocam o espalhamento Rayleigh, que aumenta quanto menor o comprimento de onda, por um fator de  $\lambda^{-4}$ , e é praticamente inexistente para  $\lambda > 1000 \text{ nm}$ . O ozônio é responsável pela extinção da radiação abaixo de 300 nm, a qual ele absorve em sua totalidade. O dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), de concentração muito baixa, e variável, também apresenta absorções menos significativas em  $\lambda$  específicos. A mistura uniforme dos gases que compões a atmosfera, principalmente o  $\text{O}_2$  e o  $\text{CO}_2$  tem uma significativa absorção na faixa do IR, em torno de 760 nm. O vapor d'água apresenta absorção em diferentes comprimentos de onda no intervalo de 700 a 1200 nm, correspondente aos modos de vibração de suas moléculas. Umidade e aerossóis produzem também espalhamentos por reflexão e refração. A radiação absorvida é termalizada, e a radiação espalhada produz a componente difusa da radiação solar terrestre [Haag, 2007].

Além disso, a inclinação com que a radiação atravessa a atmosfera também determina o grau de extinção da radiação e a intensidade final em função do comprimento de onda, pois determina a distância percorrida pela radiação através da atmosfera, chamada de massa óptica de ar (AM); a radiação acima da atmosfera corresponde a AM0, para a radiação que chega ao solo ao nível do mar, para incidência normal, tem-se AM1 e, se a incidência for

à inclinação de  $37^\circ$  em relação à normal, tem-se AM1,5. Assim, a radiação solar tem intensidade e espectro variáveis conforme a localidade, dia do ano e horário, além de ser afetada por variações diárias de temperatura, umidade e pressão atmosférica.

Para obter o espectro incidente em um local e data específicos pode-se realizar medidas em campo, diretamente, pode-se utilizar dados de irradiância de estações solarimétricas, e então fazer um procedimento de interpolação, ou é possível, ainda, obter um espectro teórico através de modelos computacionais de transferência radiativa, a exemplo dos programas SMARTS2 e Modelo Brasil-SR, utilizado na geração dos dados apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar [Pereira, 2016], que calculam a extinção a que a radiação extraterrestre é submetida ao atravessar a atmosfera, através de dados da composição atmosférica. O Programa Espectro (Desenvolvido no LABSOL - UFRGS) utiliza um modelo semelhante associado a um modelo de cálculo do posicionamento solar, gerando uma irradiância espectral em função de dados de local (altitude, latitude e longitude), data e horário, além de umidade relativa, albedo e visibilidade.

Para determinação teórica do ângulo e intensidade total e/ou característica espectral da irradiância incidente sobre uma superfície são necessários dados de latitude, altitude, longitude, dia e horário, de modo a determinar-se o posicionamento solar (elevação  $\alpha$  e ângulo azimutal  $\gamma_s$  – figura 2.1) e a massa de ar. É necessário conhecer também a condição atmosférica. A radiação global terrestre é composta por parcelas de radiação direta e difusa, e para superfícies inclinadas, também pela radiação refletida pelo solo, chamada de albedo (depende da intensidade da radiação incidente e do tipo de solo).



**Figura 2.1 - Ângulos de elevação e desvio azimutal do sol sobre uma superfície horizontal, determinados a partir de dados de latitude, longitude e dia do ano e horário. [Pinho e Galdino, 2014].**

Para fins de teste, comparação e padronização foi estabelecido um espectro padrão, presente na norma ASTM G173, que define radiação extraterrestre, direta + circunsolar e difusa para AM1,5 [ASTMG173-03, 2012]. Os simuladores solares utilizados para caracterização de módulos devem ter seu espectro o mais próximo possível desse espectro

padrão, havendo classificações de qualidade relativas a isso para simuladores. Esse espectro porém, foi definido nos Estados Unidos, e corresponde a uma condição climática bastante específica encontrada em uma região desértica do seu território, de modo que, apesar de fundamental para padronização e comparação de dispositivos, produz uma informação deficiente no que se refere à previsão da eficiência de um módulo em campo em países como o Brasil, por exemplo, que apresenta características atmosféricas diferentes daquelas que produziram tal espectro.

Na figura **2.2** são apresentados os espectros da radiação direta para incidência normal, difusa e global (direta+difusa) definidos pela norma ASTM G173, e de um dia médio em Porto Alegre para incidência normal (sobre uma superfície com inclinação igual à latitude local) obtido através do Programa Espectro, para o dia de equinócio de primavera (21 de setembro) ao meio dia, com dados de entrada retirados do BDMEP – INMET (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia) e do Atlas Brasileiro de Energia Solar (albedo e visibilidade em médias anuais). A intensidade total (global) do espectro de referência é de **1000 W/m<sup>2</sup>**, enquanto a obtida para Porto Alegre nas condições descritas é de **675 W/m<sup>2</sup>**.

## 2.2. O DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo que converte radiação solar em energia elétrica; a região ativa da célula é a junção p-n, obtida pela adição seletiva de impurezas em um material cristalino semicondutor, chamada de dopagem.

### 2.2.1. Os Materiais Semicondutores

A característica de condutividade em materiais cristalinos está relacionada à estrutura das bandas de energia. A banda de valência (BV) representa a camada mais externa de elétrons fixos aos núcleos, e formando ligações, e a banda de condução (BC), na qual estão os elétrons livres para conduzir corrente elétrica, são as bandas permitidas. Elas podem ser sobrepostas, como em materiais metálicos, em que os elétrons tem energia para circular, e apresentam alta condutividade, ou pode haver uma banda proibida (BP), onde não existem níveis de energia que possam ser ocupados, separando-as. Essa banda representa a energia ( $E_g$ ) que as cargas precisam absorver ou emitir para realizarem saltos/decaimentos entre a BV e a BC. Materiais isolantes apresentam BP com energias em torno de 9 eV. Os semicondutores, também apresentam uma BP, porém com um salto energético em geral abaixo de 3 eV, fazendo com que sejam capazes de absorver radiação na faixa visível, ultravioleta (UV) próximo, e infravermelho (IV) próximo, e excitar elétrons à banda de condução.

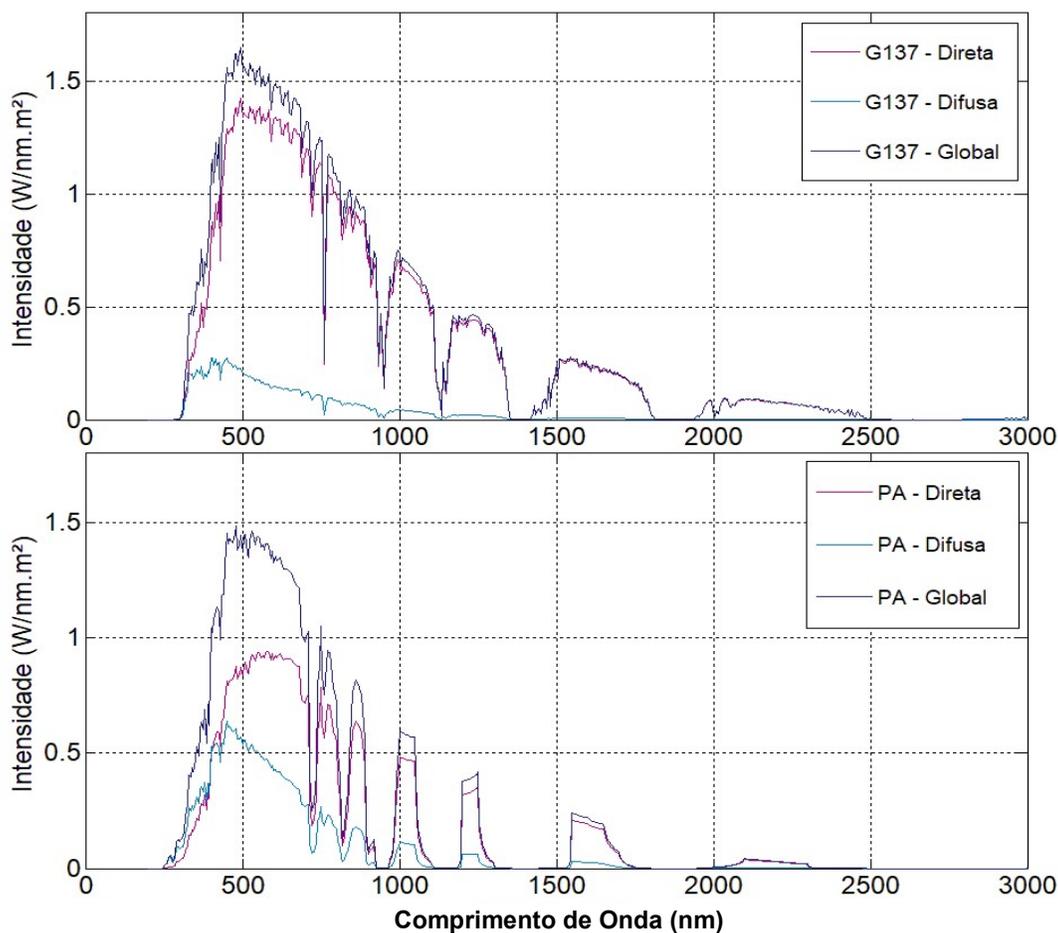


Figura 2.2 - Acima: Espectro solar terrestre de Referência sobre um plano inclinado (incidência normal) definido pela norma ASTM G173; Abaixo: Espectro de um dia médio, de equinócio, em Porto Alegre, ao meio dia, sobre um plano com inclinação igual à latitude local (Incidência normal) gerado no Programa Espectro.

### 2.2.2. Semicondutores Extrínsecos

O silício cristalino, principal e mais utilizado material na fabricação de células fotovoltaicas atualmente, tem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Os átomos que participam dessa estrutura têm geometria tetraédrica, e formam quatro ligações. O material puro, dito intrínseco, apresenta condutividade elétrica muito baixa, pois as únicas cargas livres presentes são os elétrons excitados termicamente, em uma concentração muito pequena à temperatura ambiente. Através da dopagem obtém-se o material extrínseco, cuja condutividade é superior à do material intrínseco em diversas ordens de grandeza.

Na dopagem para formação de uma região negativa, é inserido fósforo na estrutura do silício. O fósforo assume posições substitucionais ao silício na rede cristalina e, como possui 5 elétrons na BV, após formar quatro ligações covalentes há um excedente de um elétron, que não participa de ligações, e ocupa um nível específico característico do elemento, localizado na BP, muito próximo à BC. Para formar uma região positiva, são adicionados

átomos de boro à estrutura do silício, que possuem três elétrons em sua BV e, ao entrar em posições substitucionais ao silício, deixam uma ligação deficiente em um elétron. Essa deficiência forma uma lacuna positiva em um nível de energia localizado na BP ligeiramente acima do limite superior da BV.

Acima de  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , as regiões dopadas podem ser consideradas como estando 100% ionizadas, ou seja, os elétrons em excesso da região n tem energia suficiente para circular na banda de condução, e deixam os átomos de fósforo descobertos, que se tornam portanto cargas fixas positivas. Da mesma forma, elétrons da banda de valência tem energia para preencher as lacunas criadas pelo boro que, ionizado, torna-se uma carga fixa negativa, e lacunas podem circular na banda de valência através de sucessivos saltos de elétrons adjacentes, funcionando como portadores de carga positiva (Figura 2.3). Desse modo a região n apresenta elétrons livres, e cargas positivas fixas, e a região p, lacunas livres e cargas negativas fixas. Os diagramas das bandas de energia dos materiais p e n são apresentados na figura 2.4. No total, as regiões mantêm-se neutras.

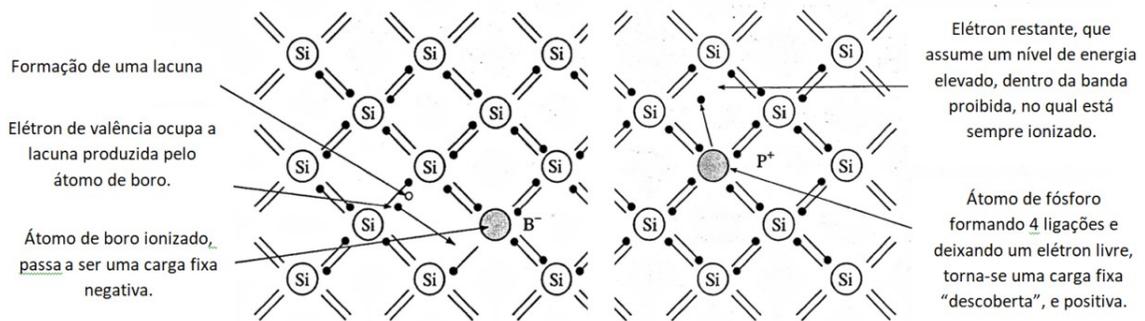


Figura 2.3 - Silício p, dopado por átomos de Boro (Esquerda) e silício n, dopado por átomos de Fósforo (Direita). [Kano, 1998].

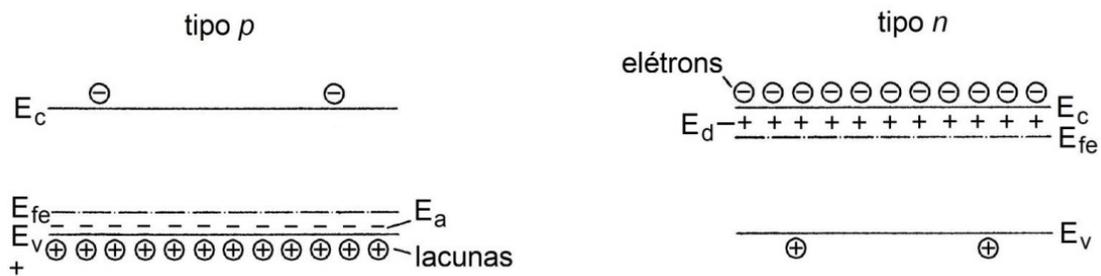


Figura 2.4 - Diagrama de bandas do material tipo p (esquerda) e tipo n (direita);  $E_c$  - limite inferior da BC;  $E_v$  - limite superior da BV;  $E_{fe}$  - Energia do nível de Fermi;  $E_a$  - Energia do nível gerado pelo Boro;  $E_d$  - Energia do nível gerado pelo fósforo [Kano, 1998].

### 2.2.3. A Junção p-n

A região ativa de diodos e **células solares** é a interface entre as regiões p e n, que forma a **junção p-n**. Na região positiva as lacunas estão presentes em grande concentração, e são as cargas majoritárias; os elétrons, presentes em baixíssima concentração, são as cargas minoritárias. Na região negativa é o oposto, elétrons são cargas majoritárias, e lacunas, cargas minoritárias. Devido às diferenças de concentração das cargas livres nas duas regiões, quando a junção é formada difundem-se elétrons da região n para a região p, e o mesmo ocorre com as lacunas, no sentido oposto. Ao encontrarem-se, lacunas e elétrons sofrem recombinação e anulam-se, de modo que não restam portadores de carga livres nesse volume afetado, e assim forma-se a zona de depleção (ZD) ou zona de carga espacial. As regiões passam a ter uma carga total diferente de zero: negativa do lado p da junção, com concentração  $qN_A$ , e positiva do lado n, com concentração  $qN_D$ , sendo  $N_A$  e  $N_D$  as concentrações de dopagem e  $q$ , a carga do elétron. Dessa forma surge na região um campo elétrico  $\mathcal{E}$  com intensidade definida pela carga total contida na ZD, e um potencial  $V_{bi}$  intrínseco à junção, conforme diagramas da figura 2.5. Para a junção formada por dopagem com boro e fósforo em silício, nas concentrações padrão, a  $V_{bi}$  é de 0,7V.

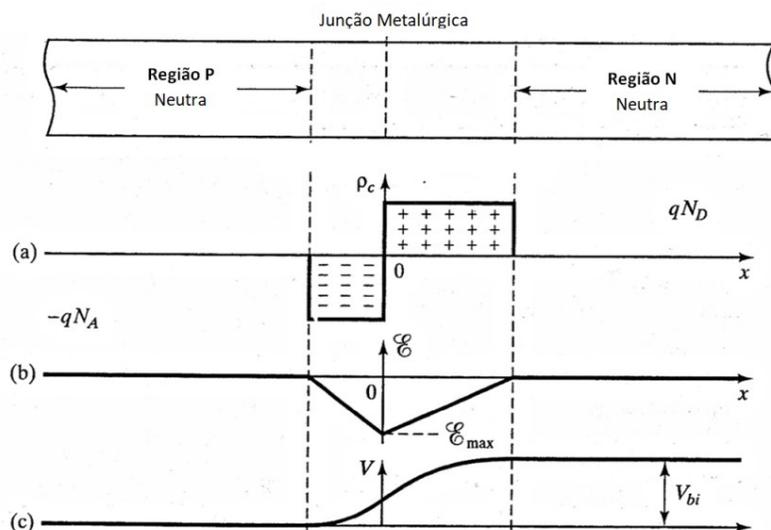


Figura 2.5 - Formação de uma junção p-n; (a) concentração de carga em cada região; (b) Campo elétrico formado; (c) Potencial resultante.  $qN_D$  – Carga região N;  $qN_A$  – Carga total região P;  $\mathcal{E}$  – Campo elétrico;  $V_{bi}$  – Potencial da junção [Kano, 1998].

Uma vez formada a ZD estabelece-se um equilíbrio dinâmico. Existe uma **corrente de deriva**, composta pelas cargas positivas e negativas excitadas termicamente submetidas ao campo, e existe uma **corrente de difusão** de igual valor no sentido oposto, responsável pela manutenção do equilíbrio de concentrações, conforme ilustrado no diagrama energético da figura 2.6. O módulo das correntes de difusão e deriva no equilíbrio é chamada de corrente

de diodo no escuro. Com a existência do campo, é como se as energias  $E_c$  e  $E_v$  fossem mais elevadas na **região P** para os **elétrons**, o que representa o salto energético para um elétron difundir-se através da ZD na banda de condução até a região P. O mesmo ocorre em sentido oposto para as lacunas, é como se as energias  $E_c$  e  $E_v$  fossem mais elevadas na **região N** para cargas **positivas**, que precisam então do mesmo salto energético para difundir-se através da ZD para a região N dentro da banda de valência.

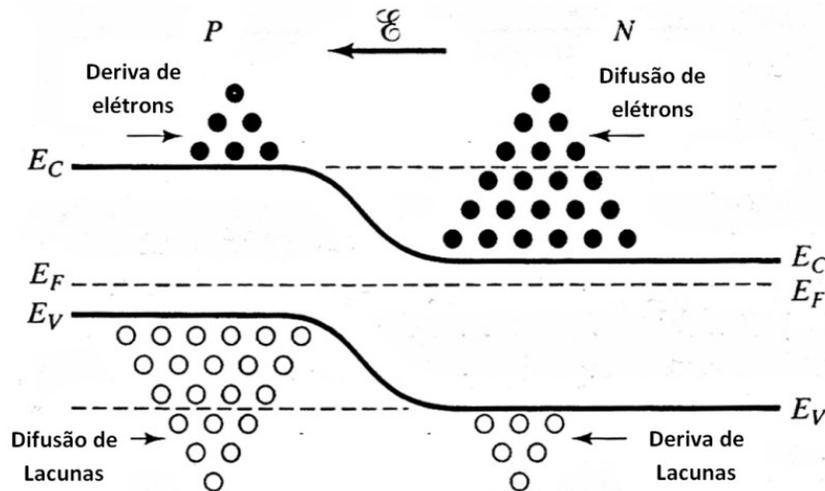


Figura 2.6 - Níveis de energia em uma junção p-n, e correntes de deriva de elétrons e de lacunas, e correntes de difusão, de elétrons e lacunas.  $\mathcal{E}$  - Campo elétrico;  $E_c$  - limite inferior da banda de condução;  $E_v$  - Limite superior da banda de valência;  $E_f$  - Nível de Fermi [Kano, 1998].

#### 2.2.4. O Dispositivo Fotovoltaico

Quando radiação com fótons de energia igual ou superior à  $E_g$  do material incide sobre a célula, são formados pares elétron-lacuna. Os pares formados no interior do campo elétrico e as cargas minoritárias que se difundem até ele são aceleradas e produzem um fluxo de cargas, a corrente foto gerada ( $I_{FG}$ ), que é a corrente de cargas submetidas ao campo, portanto é uma corrente de deriva. Assim, surge uma tensão  $V$  entre os terminais elétricos das regiões p e n da célula, e quando uma carga  $R$  é aplicada, corrente flui através dela. As cargas não coletadas a tempo pelo campo elétrico sofrem recombinação e voltam ao estado fundamental, reemitindo parte da energia (aprox.  $E_g$ ) anteriormente absorvida. O processo é apresentado na figura 2.7.

Quando exposta à radiação solar, uma célula não é capaz de converter toda a radiação em energia elétrica devido a:

- Perdas ópticas, por reflexão na superfície frontal, sombreamento pelas linhas de metalização do contato frontal da célula, e incapacidade de absorção dos fótons com energia inferior ao  $E_g$  do material da célula;
- Baixa probabilidade de coleta de cargas geradas fora da ZD e recombinação;

- Perdas ôhmicas por resistências em série internas do dispositivo, do material e dos contatos, que representam dissipação da energia produzida;
- Perdas ôhmicas por resistências paralelas internas do dispositivo, que representam correntes de fuga e portanto perda de potência.

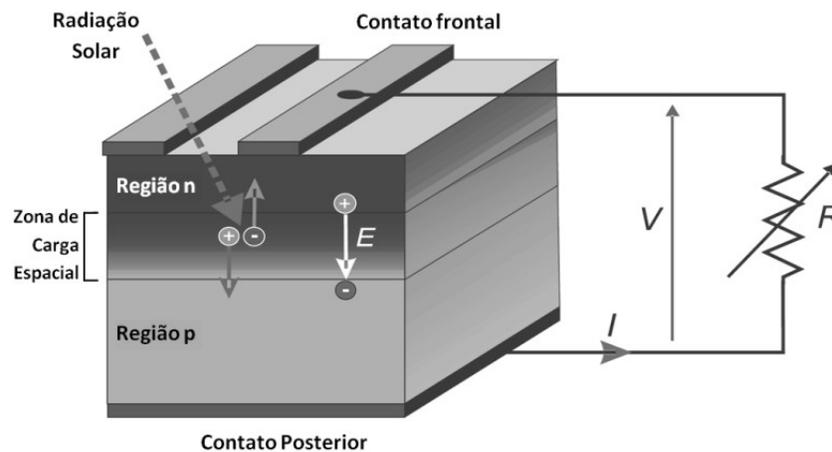


Figura 2.7 - Absorção de radiação por uma célula e geração de corrente [Krauter, 2006].

### 2.2.5. Eficiência Quântica e Resposta Espectral

A habilidade de uma célula em converter um fóton incidente, de um comprimento de onda ( $\lambda$ ) específico, em um par elétron-lacuna e coletar a carga minoritária gerada é chamada de Eficiência Quântica (EQ). É medida pela razão entre fótons incidentes e cargas geradas e aceleradas pelo campo. A EQ interna (EQI) desconsidera as perdas ópticas na superfície da célula, enquanto a EQ externa (EQE), as inclui.

A partir da EQE é obtida, através da relação apresentada pela equação (2.1), a resposta espectral (RE) de uma célula ou módulo, definida pela relação entre a produção de corrente elétrica e a entrada de energia na forma de radiação solar em um dispositivo (Ampère gerado por Watt incidente – A/W). Enquanto a energia dos fótons aumenta com a frequência, a energia necessária para gerar o par ( $E_g$ ) é constante. Fótons com energia superior ao  $E_g$  tem o excedente de energia dissipado no processo de absorção. Assim, fótons com energia próxima ao  $E_g$ , tem elevada RE e, à medida que a energia dos fótons aumenta, o excedente dissipado aumenta, e a RE diminui. As perdas por recombinação também são mais elevadas para energias mais elevadas da radiação, o que está relacionado à região da célula em que os pares são gerados, mais superficial quanto mais elevada a energia, o que dificulta a coleta das cargas. Para radiação de energia inferior ao  $E_g$ , a RE é zero.

$$RE(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} EQE(\lambda) \quad (2.1)$$

onde:

$q$  – carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$h$  – Constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34}$  J.s);

$c$  – Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s).

Lembrando que  $hc/\lambda$  é a energia de um fóton -  $E_f(\lambda)$ .

A  $E_g$  do silício é de 1,12 eV, que corresponde à energia da radiação de  $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$  aproximadamente. Assim, o silício é capaz de absorver radiação com  $\lambda$  igual a esse ou inferior, tendo melhor RE em  $\lambda$  próximos a tal valor. Na figura 2.8 é apresentada a RE teórica (ideal), e a RE típica de uma célula de Si-m de alta qualidade.

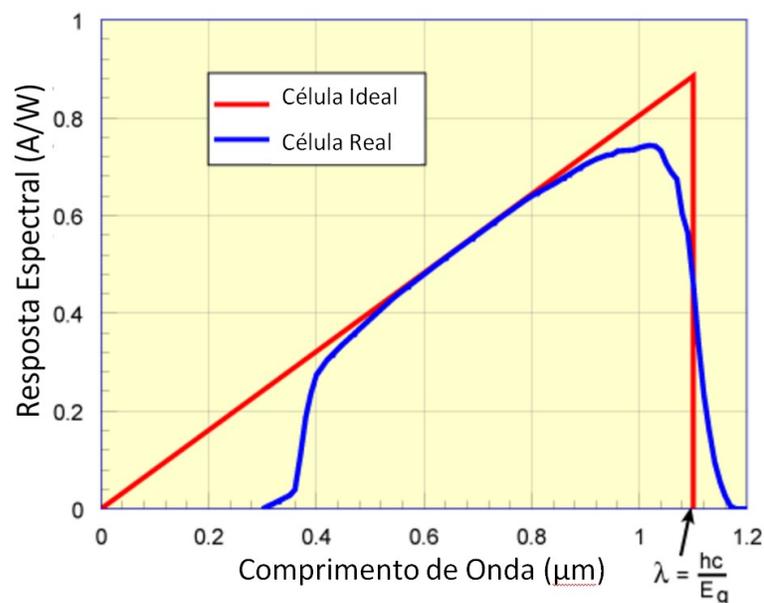


Figura 2.8 - Resposta Espectral do Si-m, teórica e real [Solar Cell Operation PV EDUCATION].

Conhecendo-se a resposta espectral de uma célula é possível calcular o valor teórico da  $I_{FG}$  total para um dado espectro solar, através da integração das parcelas de corrente geradas, por  $\lambda$ , para a faixa de 200 a 3000 nm, correspondente ao espectro solar, através da equação (2.2).

$$I_{FGtotal} = A \int_0^{\infty} RE(\lambda)g(\lambda)d\lambda \quad (2.2)$$

onde  $g(\lambda)$  é a intensidade do espectro incidente a cada comprimento de onda, em  $[\text{W}/\text{nm} \cdot \text{m}^2]$ , e  $A$  é a área da célula em  $[\text{m}^2]$  [Krauter, 2006].

### 2.2.6. Características elétricas

O comportamento elétrico de um dispositivo fotovoltaico é representado pela curva I-V, descrita pela variação de resistência da carga ligada à célula, para uma dada radiação incidente (Figura 2.9), em geral o espectro padrão. Pode ser traçada experimentalmente aplicando-se à célula uma resistência variável, enquanto exposta à radiação de um simulador solar ou natural por poucos milissegundos (a radiação deve ser constante ou muito próxima dessa condição). Inicia-se em curto-circuito, obtendo-se a máxima corrente,  $I_{SC}$  (V nula); a resistência é então elevada gradualmente até a máxima tensão,  $V_{OC}$ , na qual não há passagem de corrente.

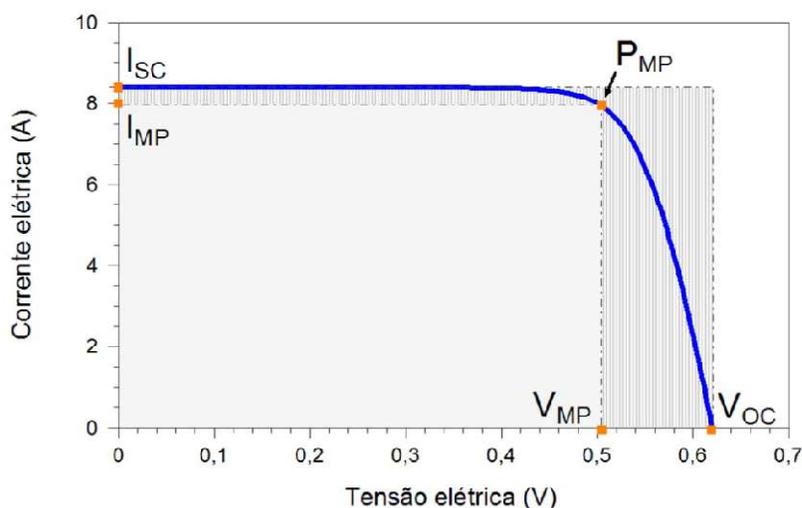


Figura 2.9 - Curva I-V de um dispositivo fotovoltaico [Pinho e Galdino, 2014].

A equação (2.3) descreve esse comportamento matematicamente para uma célula ideal (com resistência interna em série nula e resistência interna paralela infinita). É uma equação derivada da equação do diodo ideal de Shockley, uma vez que uma célula fotovoltaica no escuro é um diodo de grandes proporções, e quando iluminada, apresenta uma corrente reversa à corrente de funcionamento de um diodo.

$$I = I_{FG} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

onde:

$I$  - corrente extraída da célula;

$I_{FG}$  - corrente fotogerada;

$I_0$  - corrente de saturação reversa do diodo;

$q$  - carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$V$  - tensão produzida pela célula;

$n$  – fator de idealidade;

$k$  - constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  - temperatura absoluta, em K.

A corrente de saturação reversa do diodo ( $I_0$ ) é um valor que está relacionado às características construtivas de uma junção p-n, como as concentrações de dopagem, qualidade do cristal e outros fatores. É uma característica fixa de um dispositivo e determina a corrente interna de fuga para cada condição, e deve ser o menor possível, de modo a dissipar o mínimo da energia produzida. Todo o segundo termo da equação representa a corrente de difusão, que é essa corrente de fuga interna, paralela, e é cada vez maior à medida que a resistência aplicada e a tensão  $V$  são elevadas. Ou seja, a corrente gerada pela radiação é constante, o que varia com a carga é a dissipação interna.

No ponto de  $I_{SC}$  a carga resistiva é nula, bem como a tensão produzida, de modo que o segundo termo da equação (2.3) torna-se zero e a corrente extraída da célula, a corrente de curto-circuito,  $I_{SC}$ , pode ser assumida como igual à  $I_{FG}$  (Equação 2.4).

$$I_{SC} = I_{FG} \quad (2.4)$$

Nos dois pontos extremos da curva,  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$ , a potência é nula, uma vez que é obtida através do produto  $IV$ , e se  $I$  ou  $V$  forem nulos a potência é também.  $P_{MP}$  é o ponto onde esse produto, e portanto a potência produzida pela célula, tem valor máximo ( $I_{MP}$  e  $V_{MP}$  são os valores de corrente e tensão de máxima potência). A tensão de circuito aberto ocorre com uma carga resistiva com resistência infinita, e não há circulação de corrente. A partir da equação (2.3), definindo-se o valor de  $I$  como 0 obtém-se a equação (2.5), que determina a  $V_{OC}$ .

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{FG}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Os valores de  $V_{MP}$ ,  $I_{MP}$  e  $P_{MP}$  são definidos conforme as equações (2.6), (2.7) e (2.8). A partir da curva  $IV$  pode ser traçada uma curva  $P(V)$ , e o ponto de máxima potência é encontrado no ponto  $dP/dV = 0$ .

$$V_{MP} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{1+(I_L/I_S)}{1+(qV_{MP}/kT)} \right] \quad \text{*função iterativa} \quad (2.6)$$

$$I_{MP} = I_S \left( \frac{qV_{MP}}{kT} \right) e^{\frac{qV_{MP}}{kT}} \quad (2.7)$$

$$P_{MP} = V_{MP} I_{MP} \quad (2.8)$$

A qualidade de uma célula está relacionada ao formato da curva característica, avaliado pelo fator de preenchimento (FF, *fill factor*), que é a razão entre  $P_{MP}$  e o produto entre  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$ , conforme equação (2.9), que descrevem os retângulos ilustrados na figura 2.9. O valor do FF varia entre 0 e 1; quanto mais próximo de 1, mais “retangular” é a curva e melhor é a qualidade da célula. Um elevado FF está relacionado a uma célula com elevada resistência interna paralelo (baixa perda por correntes de fuga) e uma baixa resistência série (pouca dissipação interna de potência).

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} = \frac{P_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (2.9)$$

O cálculo da eficiência ( $\eta$ ) do processo de conversão é realizado dividindo-se a potência máxima produzida por uma célula pela radiação solar total que a célula recebe, conforme equação (2.10):

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{P_{MP}}{A.G} \quad (2.10)$$

onde:

A - área do dispositivo, [m<sup>2</sup>];

G - radiação incidente, [W/m<sup>2</sup>];

\*  $P_{in}$ ; produto dos dois elementos, a potência total de entrada.

Um dispositivo fotovoltaico pode ser representado por um circuito equivalente, onde os fatores de geração e dissipação de energia são representados por elementos e os processos podem ser melhor entendidos. Na figura 2.10 é apresentado o Modelo de Circuito Equivalente de um Diodo.

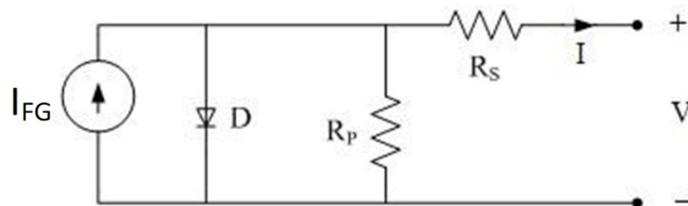


Figura 2.10 - Circuito equivalente de uma célula - Modelo de um diodo [Pinho e Galdino, 2014].

onde:

$I_{FG}$  – Corrente fotogerada;

D – Corrente de diodo (Corrente de difusão interna em sentido oposto, representa dissipação de energia (segundo termo da equação 2.3);

$R_p$  – Resistência em paralelo interna, idealmente infinita;

$R_s$  – Resistência em série interna, idealmente nula.

O ensaio de levantamento da curva IV é realizado para a caracterização de módulos fotovoltaicos, e em geral é executado na condição padrão, o que significa a utilização do espectro padrão definido pela norma ASTM-G173, apresentado na seção 2, com temperatura do módulo de 25 °C. Outra padronização de teste menos comum é utilizar as condições nominais de operação, que correspondem a um espectro de 800 W/m<sup>2</sup>, temperatura nominal de operação do módulo (NOCT, temperatura de equilíbrio do módulo em operação nessas condições) e vento de 1 m/s (um módulo pode apresentar valores para as duas condições).

A curva característica varia com a intensidade total da irradiância de forma **linear** para a  $I_{SC}$ , e de forma **logarítmica** para a  $V_{OC}$ . A  $V_{OC}$  de um dispositivo tem um valor limite, independente da irradiância, igual ao potencial da junção p-n, a  $V_{bi}$  (Figura 2.5). Na prática, a  $V_{OC}$  não atinge tal valor. A  $V_{bi}$  de uma junção p-n depende da concentração de dopagem; no silício, para as dopagens utilizadas, tem valor em torno de 0,7 V, porém a  $V_{OC}$  máxima que uma célula Si-c costuma atingir é de 0,6 V a 25 °C. A temperatura em que o módulo se encontra também tem influência sobre a curva. A corrente sofre um pequeno aumento com o aumento da temperatura, e a tensão sofre uma queda, e tem efeito preponderante, o que significa que a potência sofre redução com aumento de temperatura. Na figura 2.11 são demonstradas em gráficos as influências de tais parâmetros sobre curvas IV.

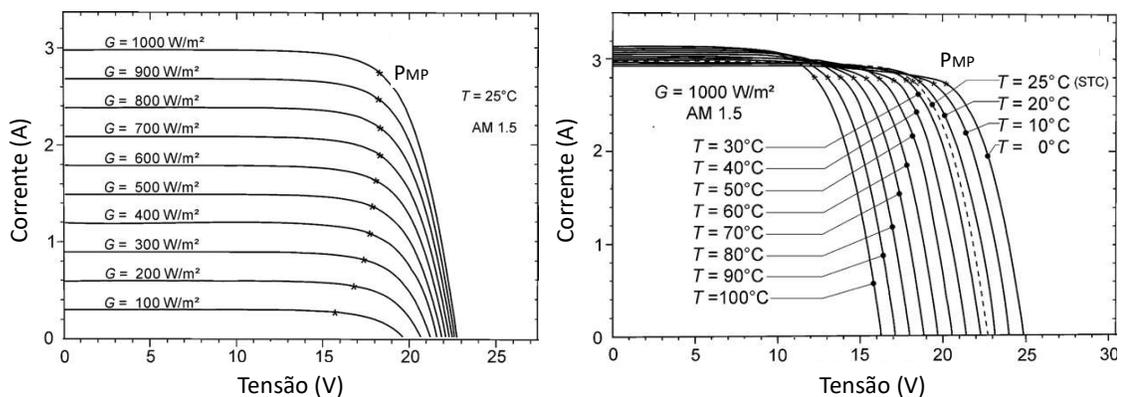


Figura 2.11 - Influência da irradiância e da temperatura sobre a curva IV e os valores de ISC e VOC [Krauter, 2006].

### 2.3. CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO

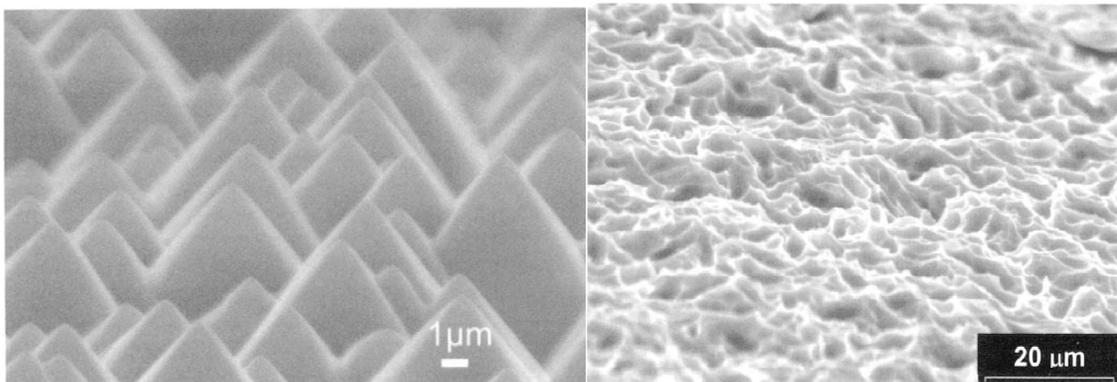
#### 2.3.1. Características Construtivas da Célula

As células fotovoltaicas de silício cristalino têm como substrato *waffers* de silício monocristalino (Si-m) ou policristalino (Si-p), produzidos a partir de lingotes de material de elevada pureza e cortados em lâminas com espessura em torno de 200 µm e 12 a 16 cm de lado. A produção do Si-p demanda uma menor quantidade de energia (e tem, por isso,

menor custo), porém as células de Si-m apresentam uma eficiência ligeiramente superior. A junção p-n é formada no interior do material através de processos de difusão controlada dos elementos dopantes a altas temperaturas.

Antes da dopagem é produzida uma textura na superfície frontal dos *waffers*, com o objetivo de gerar um efeito de aprisionamento da luz, ou *light trapping*, no qual parte da radiação refletida incide novamente na superfície do material, em função dos ângulos de reflexão formados. Esse recurso é capaz de reduzir a reflexão de valores em torno de 30% para valores próximos a 11%. Na superfície posterior também é produzida uma texturização, acompanhada de um revestimento altamente refletivo com a função de produzir uma reflexão interna dos raios não absorvidos, que atravessariam a célula, aumentando a trajetória da radiação de comprimentos de onda elevados, que apresentam baixa absorção.

Para o Si-m o principal e mais utilizado processo de texturização é o ataque químico em uma solução básica de hidróxido de sódio ou potássio (KOH ou NaOH), que apresenta corrosão preferencial ao longo dos planos cristalográficos [1 1 1], sendo que as faces das lâminas apresentam orientação cristalográfica [1 0 0]. Dessa forma, o resultado é uma textura composta por micropirâmides de alturas entre 3 e 10  $\mu\text{m}$ , cujas faces tem sempre orientação [1 1 1] e inclinação em torno de  $54,74^\circ$ , apesar da irregularidade de tamanhos (Figura 2.12, à esquerda). Em *waffers* de Si-p o processo mais utilizado é a texturização por ataque em solução de ácido nítrico ou fluorídrico ( $\text{HNO}_3$  ou HF), que produz uma textura irregular e um menor efeito de redução da reflexão (Figura 2.12, à direita).



**Figura 2.12 - Imagens de MEV da superfície de uma lâmina de Si-m (Esquerda) após texturização por ataque químico em solução básica e da superfície de uma lâmina de Si-p (Direita) após texturização por ataque em solução ácida [Markvart, 2005].**

Texturização mecânica também é empregada na texturização das superfícies de células. Existem pesquisas sobre a utilização de outras morfologias de textura, obtidas por outros processos, para o mesmo fim. Estudos propõem a texturização a laser, por desgaste mecânico ou utilizando fotolitografia, que permitem a manipulação da morfologia da textura; outros propõem a mesma texturização alcalina, utilizada em células de Si-m, para células de Si-p, de modo a produzir uma textura de pirâmides inclinadas em todas as direções conforme a orientação dos grãos, apresentando bons resultados. Essas técnicas são, porém, pouco difundidas e podem ser consideradas como ainda em etapa de pesquisa.

As superfícies de uma célula apresentam muitos níveis de energia relativos a ligações partidas, o que eleva a velocidade de recombinação das cargas, reduzindo seu tempo de vida, e probabilidade de coleta. Isso causa uma redução da  $I_{FG}$  e da  $V_{OC}$  do dispositivo. Através de passivação dessas ligações esse efeito é controlado. Para isso pode ser crescido termicamente ou depositado sobre a superfície frontal (já texturizada) da célula um filme inorgânico dielétrico, com baixíssima ou nenhuma absorção de radiação. Esses filmes também são, em geral, amorfos, para evitar espalhamento da luz por contornos de grão.

Esse filme tem também a função de produzir o efeito anti-reflexo (AR), que é reduzir a reflexão na interface através do mecanismo de interferência da radiação. Para isso, as principais características a serem adequadas são o índice de refração ( $n$ ) e a espessura. Os filmes têm, em geral, entre 50 e 150 nm de espessura. No início do desenvolvimento das células de silício era utilizado o óxido de silício ( $SiO_2$ ) crescido termicamente, mas apesar de produzir uma boa passivação da superfície e da elevada transparência, apresenta  $n$  em torno de 1,45, baixo, se comparado ao silício, e muito próximo ao  $n$  do ar e do encapsulante. Assim, tem boa transmissão da radiação, mas produz fracamente o efeito de interferência, uma vez que é a reflexão na interface inferior é muito mais elevada. Deve haver um compromisso entre tais aspectos.

Atualmente é muito utilizado o nitreto de silício puro ou hidrogenado ( $Si_3N_4$ ;  $Si_3N_{4-x}H_x$ ) depositado por reação química a vapor (Plasma enhanced chemical vapor deposition – PECVD), capaz de passivar a superfície e produzir o efeito AR, pois seu  $n$  está na faixa de 1,9-2,4. Outros materiais são estudados para a aplicação, como o  $TiO_2$  depositado sobre uma fina camada, de em torno de 10 nm, de  $SiO_2$  crescido termicamente. Assim, a superfície é passivada pela primeira camada, que por ter baixa espessura não interage com a radiação de interesse, e a segunda camada produz o efeito AR. Estudos propõem a utilização de nitreto de boro (BN) para a aplicação; a utilização de sulfeto de zinco (ZnS) e fluoreto de magnésio ( $MgF_2$ ) sobre  $SiO_2$  também já foi relatada. Na figura 2.13 são apresentados os índices de refração reais do silício, do EVA, que é o material mais amplamente utilizado como encapsulante, e dos principais dielétricos de interesse,  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$  e  $TiO_2$ ; a parcela imaginária é muito pequena na faixa para os materiais em questão.

A última etapa para a formação das células é a deposição de um metal para produzir contatos elétricos nas faces frontal e posterior. Os contatos devem realizar a coleta de cargas de forma satisfatória, porém a área total coberta na face frontal deve ser a menor possível, de modo a obstruir minimamente a incidência de radiação na célula. Por isso, é feito na forma de uma malha composta por filamentos de espessura e afastamento adequados, que recobrem toda a superfície. Deve também apresentar muito boa aderência à superfície do silício e formar um contato ôhmico. Diferentes processos são empregados nessa etapa. Um deles, o mais amplamente utilizado, é a serigrafia, na qual uma pasta de prata e alumínio é depositada em uma geometria pré-definida sobre a superfície, e então curada a altas temperaturas. Os eletrodos podem também ser depositados por evaporação dos metais (PVD) associando-se ao processo uma etapa de fotolitografia.

A espessura dos *wafers*, os parâmetros utilizados para a dopagem, que definem profundidade da junção e densidades de dopagem, a espessura do filme de passivação/efeito AR e material utilizado, a texturização das superfícies, e a geometria e processo utilizado na produção dos contatos elétricos são temas de pesquisa e projeto e variam conforme o dispositivo.

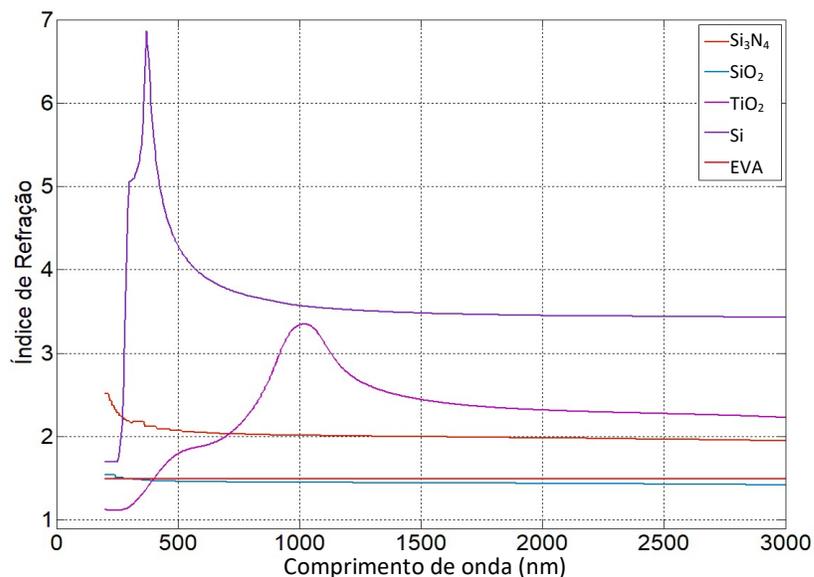


Figura 2.13 - Índices de refração real do silício, EVA, e de materiais empregados no filme sobre a célula:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  e  $\text{TiO}_2$ , na faixa de comprimento de onda do espectro solar.

Na figura 2.14 está ilustrada esquematicamente uma célula de m-si tradicional em corte para visualização das camadas.

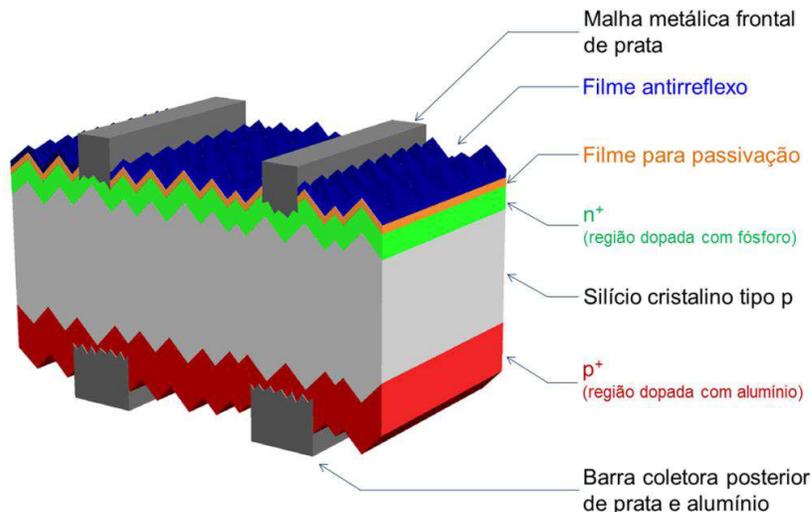


Figura 2.14 - Célula de si-m em corte para visualização de todos os elementos que a compõem [Pinho e Galdino, 2014].

### 2.3.2. Características Construtivas do Módulo Fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos de Si-c são construídos de modo a obter-se um dispositivo com dimensões e resistência mecânica mais adequados ao manuseio, instalação, e exposição a intempéries. Além disso, as células em um módulo são associadas em série e paralelo, conforme a demanda, para produzir tensões e correntes mais elevadas do que as de uma única célula.

Na construção do módulo são normalmente empregadas 60 ou 72 células, para produção de módulos de diferentes dimensões e valores potência máxima (Potência pico). Depois de montado o arranjo de células com corrente e tensão adequadas, e soldagem dos contatos elétricos, é feito a montagem por encapsulamento. Nesse processo as diferentes camadas que compõem o módulo são sobrepostas e levadas a uma prensa térmica, sendo laminadas a temperaturas em torno de 150 °C, o que produz aderência entre as camadas. Com isso forma-se um **sistema óptico** sobre a célula composto por 3 ou 4 camadas. Depois disso pode ser colocada uma moldura de alumínio, ou feita uma selagem das extremidades com uma resina, e é instalada uma caixa elétrica na parte traseira. Na figura 2.15 são apresentados as camadas e elementos construtivos de um módulo de Si-c em uma vista explodida.

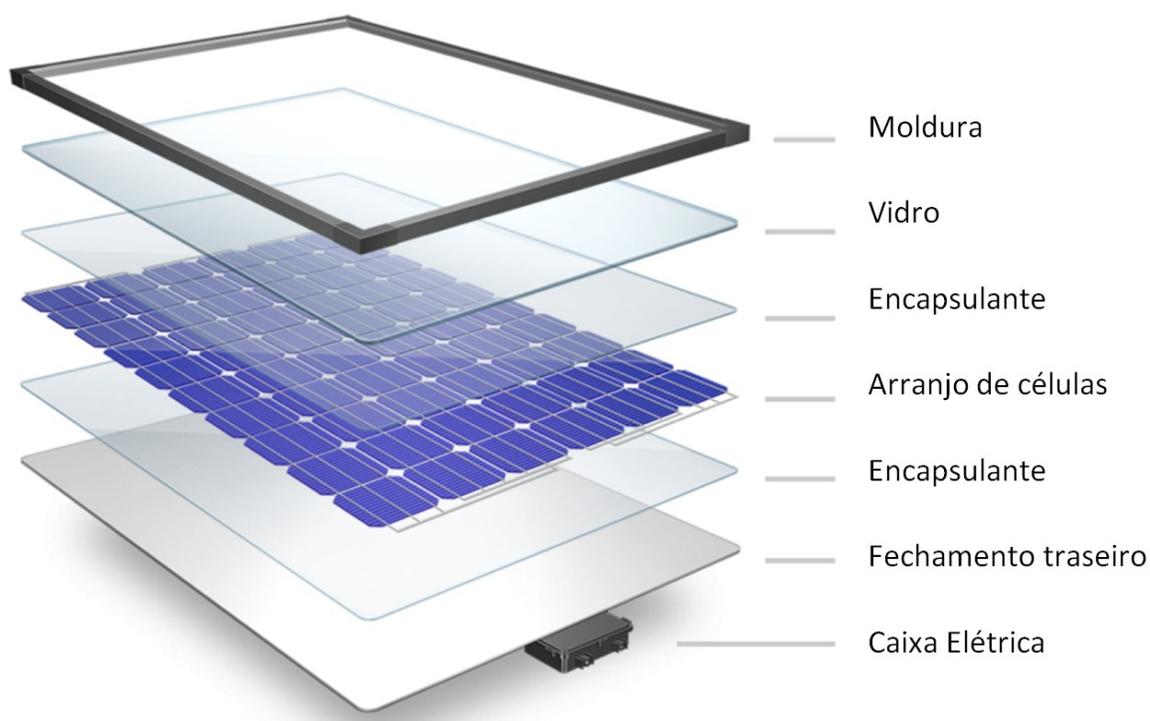


Figura 2.15 - Camadas e elementos construtivos de um módulo fotovoltaico de Si-m. Adaptado de [DUPONT-What makes up a solar panel?].

### Camadas do Módulo:

- Isolamento Traseiro

O fechamento traseiro é feito por uma folha polimérica com bom isolamento à umidade e resistência mecânica. Polifluoreto de vinila (PVF) e polietileno tereftalado (PET) são comumente utilizados, pois bloqueiam de forma satisfatória a passagem de gases e umidade. O material mais amplamente utilizado é o Tedlar (DuPont), apresentação comercial do PVF para a aplicação.

- Encapsulante

Diretamente acima e abaixo das células são introduzidas folhas do material encapsulante, um polímero de elevada transparência e que deve tornar-se borrachoso durante a laminação, de modo a aderir às camadas adjacentes e isolar as células completamente do ambiente, inclusive funcionando como uma camada de absorção de choques mecânicos. Deve ainda apresentar elevada resistência à radiação, elevada resistividade elétrica, e durabilidade (equivalente à dos módulos), suas propriedades devem manter-se quase ou plenamente inalteradas. São utilizados, entre outros materiais, o etileno-acetato de vinila (EVA), o polivinil butiral (PVB) e poliolefinas; mais recentemente tem sido estudado o emprego de polidimetilsiloxano (PDMS) na fabricação de encapsulantes.

Todos esses polímeros apresentam muito baixa absorção de radiação acima de 300 nm, em torno de  $10^{-3} \text{ m}^{-1}$  e, para as espessuras utilizadas, é negligenciável. Abaixo desse valor de  $\lambda$  são opacos. Nas figuras **2.16** e **2.17** são exibidas as propriedades de duas apresentações comerciais de encapsulantes, em tabelas retiradas das especificações técnicas, nas quais pode-se entender quais propriedades devem ser controladas em tal componente. A primeira apresenta o *EVA9110T* e o *EVA9120B*, compostos por EVA, da marca 3M, e a segunda refere-se ao *PV5400 Ionomer-Based*, da marca DuPont, que não informa a composição. Pode-se observar o índice de refração dos materiais, de 1.49 e 1.51, que são os valores comumente encontrados e, assim como para polímeros não condutores em geral, tem valor aproximadamente constante na faixa de comprimentos de onda de interesse (variação inferior a 0,01). Além das propriedades ópticas, pode-se observar todas as outras propriedades necessárias ao adequado desempenho do material, físicas, químicas, mecânicas e térmicas, com as quais é preciso haver um compromisso na busca pela transmissividade e índice de refração ideais.

São produzidos e comercializados no formato de folhas flexíveis com espessuras entre 0,3 e 0,6mm, conforme mostrado na figura **2.18**.

	Itens	Método de Ensaio	Unidades	Valores Típicos	
				EVA9110T	EVA9120B
Prop. Físicas	Espessura	ASTM F2251	mm	0.4-0.65	
	Densidade (Não curado)	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	0.92	
	Tensão (Curado)	MD	MPa	18	
	*MD – ruptura; TD - Escoamento	TD	MPa	16	
	Elongação	MD	%	960	
	*MD – ruptura; TD - Escoamento	TD	%	810	
	Aderência ao Vidro	ASTM D903	N/cm	100	
Absorção de Água (Curado)	ASTM D570	wt%	0.12		
Prop. Elétricas	Resistividade (Curado)	ASTM D257	Ω·cm	1.1 × 10 <sup>15</sup>	
Prop. Ópticas	Índice de Refração (Curado)	ASTM D542	–	1.49	
	Transmitância (Curado)	ASTM D1003	%	92	91
	λ de corte UV (Curado)	–	nm	310	390
Prop. Térmicas	CTE (Curado)	ASTM E831	µm/m°C	280	
Durabilidade	Resistência UV (32 kWh/m <sup>2</sup> )	Δb*	–	1.4	0.5
	Resistência UV (32 kWh/m <sup>2</sup> )	ΔT%	–	2.0	1.0
	Resistência aquecimento	Δb*	–	0.6	0.6
	(85% RH, 85°C 1000h)	ΔT%	–	1.5	1.5

Figura 2.16 - Tabela de propriedades das marcas EVA 9110T e EVA 9120B de encapsulante da empresa 3M, retirada da folha de dados técnicos [3M EVA9110T EVA9120B].

Propriedade	Método de Ensaio	Condições do Ensaio	Unidades	Valores
<b>Propriedades Físicas</b>				
Peso Específico	ASTM D792	23°C		0.95
<b>Propriedades Mecânicas</b>				
Tensão Máxima	ASTM D882	23°C / 50% RH	Mpa kpsi	24.1 3.5
Elongação de Ruptura	ASTM D882	23°C / 50% RH	%	357
Módulo de Elasticidade	ASTM D882	23°C / 50% RH	Mpa kpsi	394 57.2
Módulo na tensão máxima	ASTM D882	23°C / 50% RH	Mpa kpsi	291 42.3
Dureza Shore D	ASTM D2240			60
<b>Propriedades de absorção de umidade</b>				
Umidade Max equilíbrio a 85°C / 85% RH		2000 hrs 0.38 mm	%	.27
Taxa de Transmissão de vapor d'água	ASTM F1249	38°C / 100% RH	g mm / m <sup>2</sup> -day	0.66
<b>Propriedades Ópticas</b>				
Índice de Refração	ASTM D542	23°C		1.49
Índice de Amarelamento - 15 mil/0,38 mm	ASTM E313			1.9
Transmitância - 15 mil/0,38 mm	ASTM D1003		%	93.4
Opacidade	ASTM D1003		%	2-3
<b>Propriedades Térmicas</b>				
Coefficiente de Expansão Térmica	ASTM D696	-20 to +32°C	10 <sup>-5</sup> cm / cm-°C	15-18
Ponto de Amolecimento (DSC - pico de entalpia)	ASTM D3418		°C	87.8
Taxa de escoamento	ASTM D1238	190°C / 2160 g	g / 10 min	25
<b>Propriedades Elétricas</b>				
Resistividade de superfície	ASTM D257	23°C / 25% RH	Ohms	3 x 10 <sup>16</sup>
Resistividade	ASTM D257	23°C / 25% RH	Ohm-cm	6 x 10 <sup>15</sup>

Figura 2.17 - Tabela de propriedades da marca PV5400 de encapsulante da empresa DuPont, retirada da folha de dados técnicos do produto [PV5400-DuPont].



Figura 2.18 - Folha de polímero encapsulante, forma como é comercializado [PV5400-DuPont].

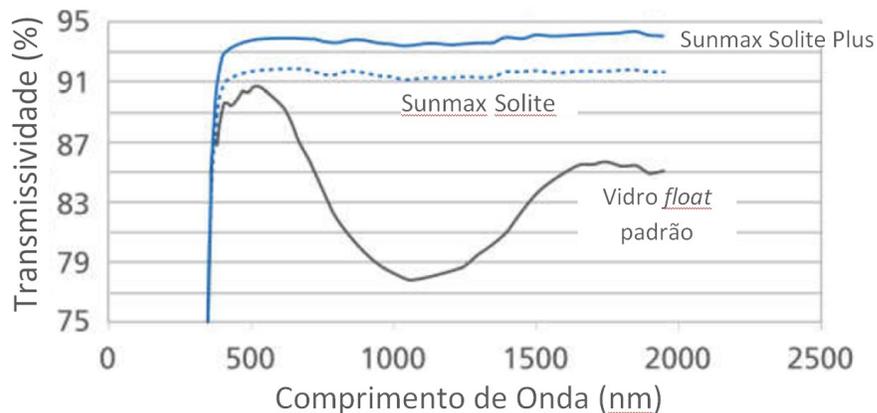
- Vidro

A camada mais externa do sistema é um vidro soda-cálcico com baixo teor de ferro. O vidro soda-cálcico produzido pelo método *float* é utilizado em construção civil em geral, e em sua fabricação tem adição de FeO como agente de controle da viscosidade. Na fabricação de vidros para produção de módulos fotovoltaicos utiliza-se o mesmo processo porém tal óxido não é acrescentado, pois eleva a absorvência de radiação pelo vidro dentro da faixa de interesse, e reduz a transmissão total de radiação através do material.

A transmissividade dos vidros *float* é elevada na faixa de 300 a 3000 nm. Acima de 3000 nm (e com baixo teor de ferro) cai para 20%, e, fora da faixa de 300 a 5000 nm, a transmissividade de radiação é nula (100% da radiação é refletida/absorvida). O índice de refração real dos vidros soda-cálcicos é aproximadamente constante até 3000 nm, variando menos de 1% em torno do valor de 1,5, e não é alterado por essa variação de composição (concentração FeO). A parte imaginária do índice de refração é negligenciável nesses intervalos pois a absorvência é muito baixa.

A transmissividade dos vidros utilizados na construção de módulos também pode ser aumentada pela deposição de um filme anti-reflexo (AR) sobre a superfície. No gráfico da figura 2.19 podem ser visualizadas as transmissividades de um vidro *float* padrão, de uma versão comercial de vidro float com baixo índice de ferro, o Solite, e de uma versão de mesma composição mas com filme AR, Solite Plus, da fabricante de vidros especiais para aplicação fotovoltaica AGC Solar.

A deposição de filmes sobre vidro para aplicação em módulos fotovoltaicos pode ter também a função de produzir uma superfície auto-limpante, de modo que não se formem depósitos de poeira e outros resíduos sobre os módulos, e sua eficiência não seja comprometida.



**Figura 2.19 - Transmissividade de amostras de vidro *float* padrão e com baixo teor de ferro nas apresentações comerciais Solite e Solite Plus (com filme AR) da fabricante AGC Solar [AGC Solar].**

Estudos de diferentes materiais para aplicação em filmes finos para vidros destinados à aplicação fotovoltaica já foram realizados. Em [Mehmood, 2016] foi feita uma revisão de materiais para efeito auto-limpante, e foi relatada a produção de filmes transparentes, constituídos de diversos materiais, entre eles, de polidimetilsiloxano (PDMS) e de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ).

O PDMS é um polímero com elevada resistência química e térmica, elevada transparência (pode ter, com os parâmetros de fabricação corretos), e possui baixa energia de superfície, o que, associado a uma micro/nano rugosidade, produz o efeito de super-hidrofobicidade, que faz com que mesmo em pequenas inclinações a água seja eliminada da superfície e arraste com ela depósitos de material. A rugosidade deve ter suas características controladas de modo que não provoque espalhamento da radiação de interesse. O índice de refração do material é aproximadamente constante em 1.4 na faixa de trabalho, inferior ao do vidro e é transparente, então tem potencial para funcionar como AR.

O  $\text{TiO}_2$  produz um efeito auto-limpante por outros mecanismos. O material é hidrofílico, e depósitos de água formam filmes e impedem a aderência de resíduos diversos. Além disso, o material é fotocatalizador e oxida detritos orgânicos, convertendo-os em moléculas orgânicas simples. O material absorve radiação na faixa do UV, mas é predominantemente transparente acima de 300 nm. Seu índice de refração na faixa de interesse é superior ao do vidro, mas, sendo diferente, produz efeito de interferência e pode funcionar como AR. Na figura 2.20 são apresentados os índices de refração do vidro, do  $\text{TiO}_2$  novamente, do PDMS, e do meio externo (ar), pois compõe uma interface.

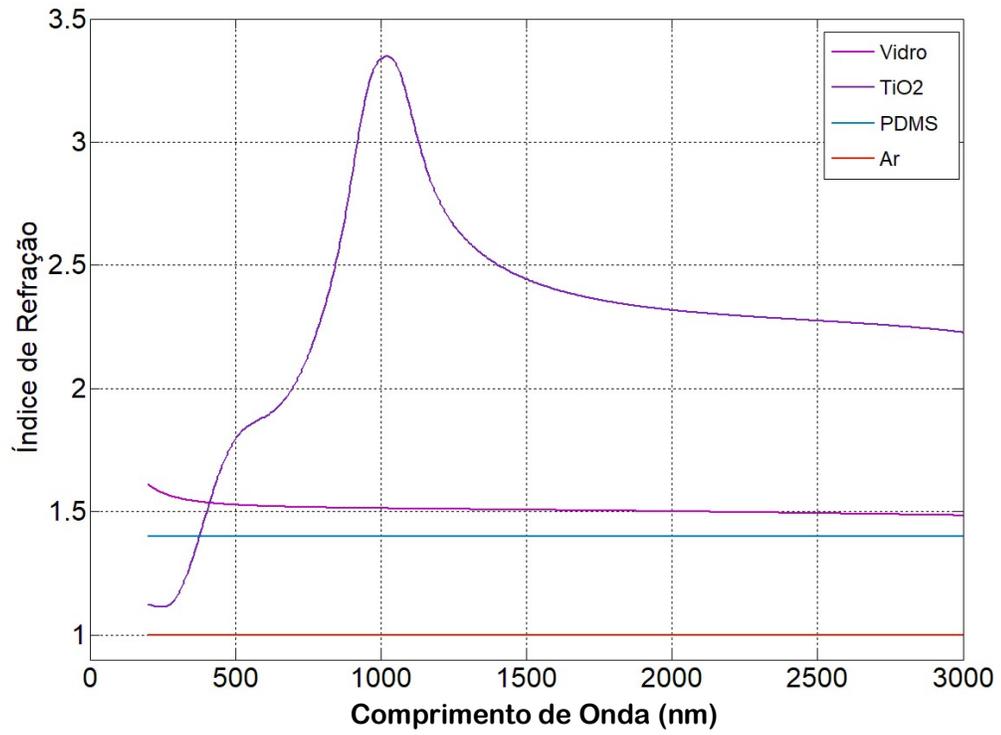


Figura 2.20 – Parcela real dos índices de refração do vidro, de dois materiais aplicáveis a filmes AR, PDMS e TiO<sub>2</sub>, e do meio externo.

### 3. MODELAGEM ÓPTICA E ESTUDO COMPUTACIONAL DE CÉLULAS E MÓDULOS

As células e os módulos solares são projetados em geral para sua melhor performance nas condições padrão de ensaio em laboratório, que são temperatura de 25 °C e irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> com espectro AM1,5 e incidência normal da radiação, condições nas quais são ensaiados as células após a fabricação, e os módulos após o encapsulamento. Essas condições, porém, não descrevem a situação real a que são submetidos em funcionamento, e só permitem uma análise incompleta do desempenho óptico dos materiais envolvidos.

Modelos ópticos para análise da interação da radiação com as camadas ópticas do módulo podem partir de uma abordagem termodinâmica, onde são feitos balanços energéticos, ou de abordagens puramente ópticas, através de diferentes técnicas. Um método muito difundido é o *Ray Tracing*, na qual a trajetória da radiação é mapeada, e os eventos a que é submetida são modelados de diferentes formas. Existem *softwares* que utilizam essas técnicas e englobam diferentes escopos de análise. O programa PC1D, desenvolvido na UNSW (Universidade de Nova Gales do Sul, Austrália), por exemplo, possui um modelo computacional complexo de células fotovoltaicas cristalinas e, para modelagem do dispositivo como um todo, apresenta um modelo simples das camadas ópticas com poucos parâmetros de ajuste, e uma simplificada análise dos eventos ópticos. Por outro lado, programas cujo foco principal é o sistema óptico também já foram desenvolvidos, e podem apresentar elevado detalhamento das características geométricas e dos materiais empregados. Um exemplo é o simulador CROWM (desenvolvido no Laboratório de Optoeletrônica da Universidade de Ljubjana – Eslovênia). O programa é uma ferramenta de simulação bastante complexa, alimentada por um grande número de dados de entrada e versátil, para diferentes tecnologias fotovoltaicas e texturas presentes. Para isso utiliza uma técnica chamada OPTOS, baseada em matrizes de redistribuição, o que faz com que possa reproduzir uma gama de diferentes configurações de sistemas, mas também o torna pesado e com maior complexidade de operação. A figura 3.1 apresenta uma visão geral dos modelos computacionais existentes.

A plataforma online *PVlighthouse* é também um recurso computacional para estudo de células, módulos e radiação solar. Nela são reunidos diferentes programas e métodos, bibliotecas de dados e informações, porém é acessado somente por assinatura.

Uma análise mais completa e aprofundada do comportamento de transmissão da radiação para diferentes conjuntos de materiais, submetidos a diferentes condições de radiação, é útil para entender os processos que ocorrem e levar a diferentes formas de otimização, podendo ser uma ferramenta de seleção de materiais. A utilização de técnicas computacionais para criação de modelos ópticos permite analisar a situação com liberdade em relação aos parâmetros dos materiais e de radiação, permitindo simular diversas situações, e observar o processo etapa a etapa, através da geração de dados (variáveis) de controle. Além disso, a transmissão de radiação para o interior das células pode ser significativamente aumentada pela inserção de camadas sobre a célula na construção de módulos, o que torna os estudos desses sistemas ópticos ainda mais importantes.



**Figura 3.1 – Visão geral de modelagens ópticas e estudos computacionais existentes de estudo de células e módulos fotovoltaicos**

Em [Krauter, 1996], foi elaborado um modelo com razoável detalhamento de cada um dos elementos, radiação incidente, transmissão da radiação e absorção pela célula, para demonstrar a magnitude da perda de eficiência se comparamos condições de laboratório e condições reais. Foram consideradas 3 camadas de encapsulamento planas (sem textura) e foi feito um *Ray tracing* para descrever as múltiplas reflexões internas do sistema, camada a camada. Ou seja, todas as reflexões internas e toda a transmissão, inclusive após absorção pelo material, para cada camada em sequência. Esse modelo, entretanto, negligencia algumas componentes de baixa intensidade. São utilizadas as equações de Snell, para determinação do ângulo da radiação refratada, e de Fresnell, para encontrar o fator de reflexão das interfaces. O cálculo foi realizado separadamente para os dois planos de polarização e um modelo complexo de descrição da polarização da radiação difusa foi empregado. Para a radiação direta foi utilizado o espectro definido pela norma IEC para diferentes massas de ar, de modo a simular a radiação ao longo de um dia. O modelo emprega um razoável detalhamento da célula, prevendo inclusive variação da temperatura na célula (e para isso realiza uma análise termodinâmica do processo) e influência sobre a eficiência do módulo.

Em um novo trabalho apresentado dez anos depois pelo mesmo autor [Krauter e Grunow, 2006], é apresentado um modelo semelhante ao anterior porém com diversas alterações e ampliações, propondo-se a fornecer uma ferramenta para análise do rendimento real de um módulo exposto a condições reais, considerando parâmetros elétricos, ópticos e térmicos. Na figura **3.2** é apresentada de forma esquemática a estrutura do modelo.

Neste trabalho são consideradas novamente as reflexões nas interfaces e absorção nas camadas mais espessas, e múltiplas reflexões internas entre as camadas. Não há informação, porém, sobre ter sido inserido um modelo de textura, nem de interferência da radiação no filme AR sobre a célula. O modelo é demonstrado através de alguns estudos, entre eles, da relação entre os índices de refração das duas camadas mais externas do sistema para faixas de  $n$  de 1,0 a 1,9 para o vidro, e de 1,2 a 2,2 para o encapsulante. Os resultados são apresentados através dos gráficos da figura **3.3**. O ensaio produz um material de estudo interessante porém desconexo com os materiais de que se dispõe atualmente para tais camadas. O modelo produz resultados para diferentes ângulos de incidência, e esse estudo é apresentado para incidência entre  $0^\circ$  e  $80^\circ$ . É apresentado também um gráfico da relação entre as eficiências de conversão para diferentes massas de ar e para AM1,5/espectro padrão, trazendo a possibilidade de utilizar o modelo para observar o comportamento dos materiais em diferentes espectros. Esses resultados são algumas das diferentes relações e informações que se pode extrair de um modelo computacional.

O modelo do encapsulamento utilizado para avaliar a transmissão da radiação do meio externo à célula é detalhado no livro do mesmo autor [Krauter, 2006]. Na figura **3.4** um esquema representando as camadas e trajetórias da radiação é apresentado. São novamente utilizadas as equações de Snell, e de Fresnell para definir as reflexões de cada interface. A partir da primeira incidência, na interface superior, a reflexão polariza a radiação, e as componentes paralela e perpendicular ao plano de reflexão passam a ser tratadas separadamente. O modelo assume que a cada incidência em uma interface um feixe é dividido em uma porção refratada para a camada adjacente e uma porção refletida para o interior da mesma camada. Esse processo ocorre infinitamente, com intensidades de reflexão cada vez menores e sucessivas parcelas sendo refletidas de volta para o meio externo (perdidas), e transmitidas para a célula. São somadas então todas as parcelas transmitidas interface a interface, utilizando o cálculo anterior (da interface superior) para o próximo cálculo, até chegar ao somatório das parcelas transmitidas à célula, incluindo também termos de atenuação por absorção. O cálculo torna-se extenso mas pode ser utilizado para infinitas camadas.

## Estrutura do Programa de Simulação

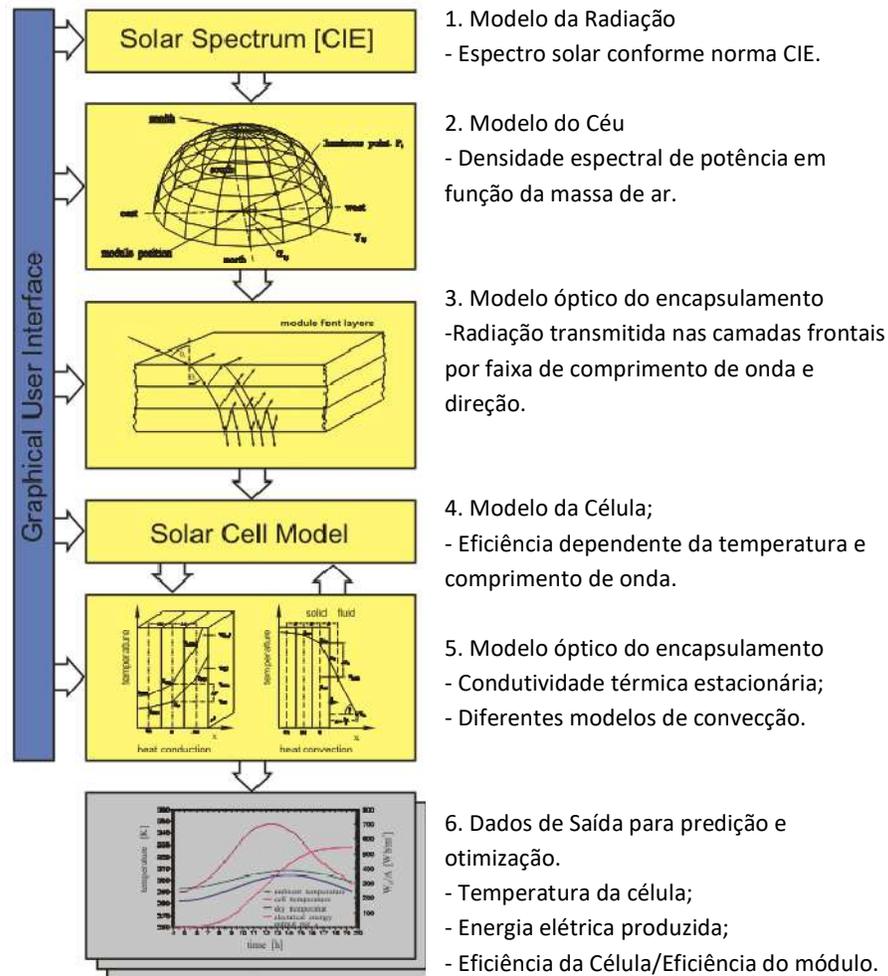


Figura 3.2 - Visão geral do modelo desenvolvido por [Krauter e Grunow, 2006], na qual são apresentados três grandes elementos do sistema: Radiação incidente, transmissão pelo sistema óptico, absorção/conversão da radiação pela célula.

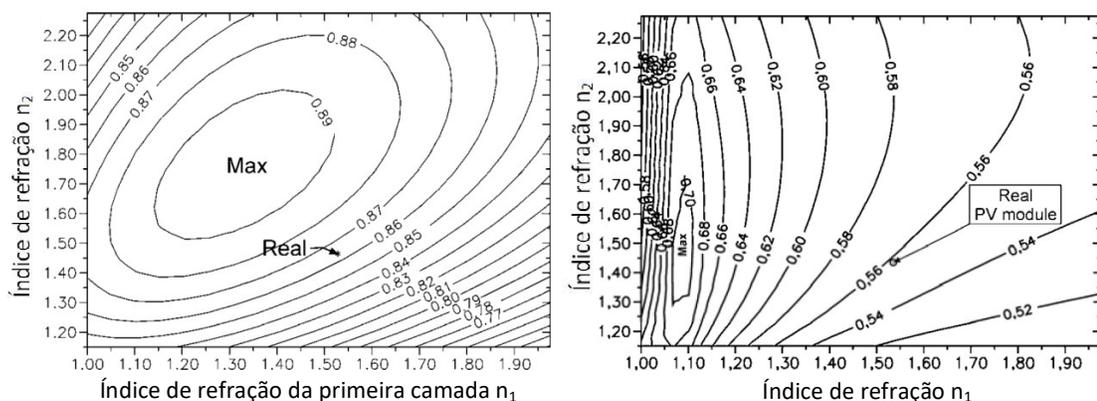


Figura 3.3 - Gráficos de curvas de nível representando a transmissividade total do sistema óptico de um módulo para as combinações de índice de refração do vidro ( $n_1$ ) e do encapsulante ( $n_2$ ), para o espectro

padrão; incidência normal à esquerda e a 80° à direita. Resultados apresentados em [Krauter e Grunow,2006].

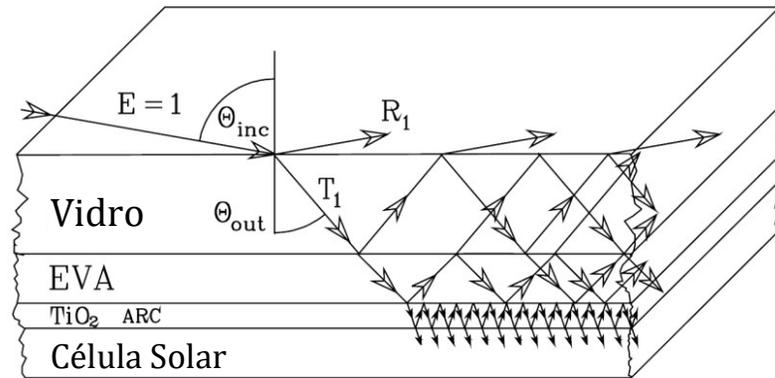


Figura 3.4 - Representação do modelo desenvolvido em [Krauter, 2006].

Para um sistema de duas camadas (vidro e EVA) e três interfaces, como o apresentado na figura 3.4, e lembrando que filmes finos são tratados nessa etapa de definição da transmissividade total como interfaces, o cálculo é realizado através das equações de (3.1) a (3.4). Conforme descrito, são realizados cálculos iniciais das transmissividades totais parciais nas duas camadas, refletividade total parcial na segunda (EVA), e refletividade total parcial da radiação proveniente do interior do material na primeira (radiação proveniente do vidro que incide na interface vidro-ar), e esses valores são entrada para o cálculo da transmissividade **total** do sistema, na equação (3.1). A dedução pode ser encontrada no livro referência.

$$\tau_{12} = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - R_{12} R_{10} \exp(\rho_2 - R_{12}) \rho_{1-int}} \quad (3.1)$$

onde:

$\tau_{12}$ : Transmissividade total do sistema;

$\tau_1$ : Transmissividade total através da camada 1, calculada pela equação (3.2);

$\tau_2$ : Transmissividade total através da camada 2, análogo a  $\tau_1$ ;

$R_{12}$ : Refletividade na interface entre as camadas 1 e 2;

$R_{10}$ : Refletividade da interface entre as camadas 1 e 0;

$P_2$ : Refletividade total na camada 2, calculada pela equação (3.3);

$P_{1-int}$ : Refletividade total na camada 1, da radiação proveniente do interior do material, calculada pela equação (3.4).

$$\tau_1 = \frac{T_{01} T_{12} \exp\left(\frac{-\alpha_1 d_1}{\cos \theta_1}\right)}{1 - R_{12} R_{10} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos \theta_1}\right)} \quad (3.2)$$

$$\rho_2 = R_{12} \frac{T_{12} T_2 \exp\left(\frac{-2\alpha_2 d_2}{\cos\theta_2}\right)}{1 - R_{12} R_2 \exp\left(\frac{-2\alpha_2 d_2}{\cos\theta_2}\right)} \quad (3.3)$$

$$\rho_{1-int} = \frac{R_{10} T_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)}{1 - R_{12} R_{10} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)} \quad (3.4)$$

onde:

T: Transmissividade nas interfaces, definidas pelos índices da mesma forma que R;

$\alpha$ : Coeficiente de absorção da camada definida pelo índice;

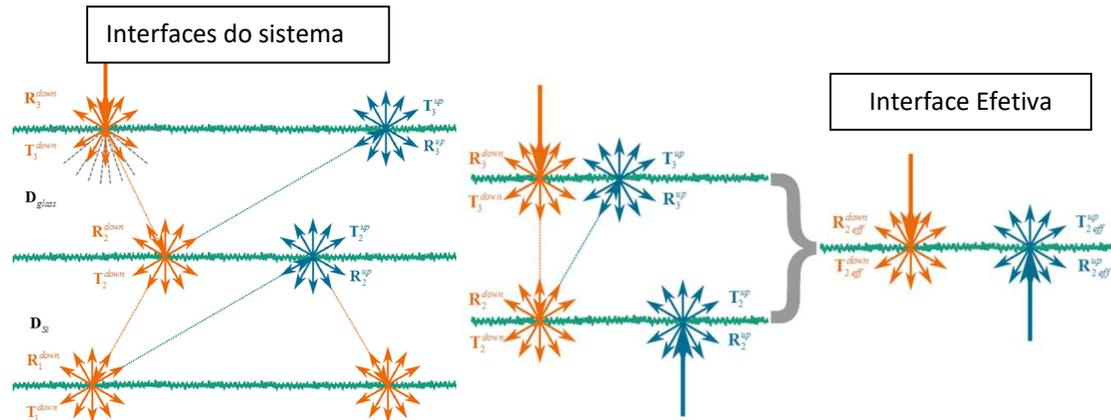
$\theta$ : Ângulo de transmissão na camada definida pelo índice.

Em [Yamada e Nakamura, 2001] o modelo desenvolvido é semelhante, porém simplificado. Utiliza as equações de Snell e Fresnel para definir o fator de reflexão das interfaces, e parte da idéia de que a radiação divide-se em uma parcela refletida e uma parcela transmitida a cada incidência em uma interface, e faz um somatório das parcelas até a camada do encapsulante, realizando então um novo cálculo simples da reflexão na interface EVA-Célula (o filme AR é considerado uma interface). Não é feita nenhuma consideração sobre aproveitamento dessa radiação refletida pela célula. O modelo considera ainda o índice de refração das camadas constante, e absorção de radiação pelo vidro somente. No final do trabalho é feita uma validação prática com um ensaio de um módulo equivalente na condição STC e os resultados, apresentados de forma gráfica, são próximos.

Em [Tucher e Eisenlohr, 2016] é utilizado o método OPTOS, também utilizado no Simulador CROWM citado anteriormente nesse mesmo capítulo. É um método mais complexo do que o *Ray tracing*, utilizado nos trabalhos descritos até o momento. Nesse método os padrões de transmissão da radiação das interfaces são gerados por matrizes de vetores. Cada interface tem quatro matrizes que a representam, uma para a radiação transmitida, e outra para a radiação refletida, para cada um dos lados da interface. Essas matrizes que representam as interfaces são compostas por vetores de potência que contém uma entrada de ângulo e polarização da radiação incidente, que deve ser fornecida no formato de uma matriz. A semi-esfera que contém a radiação incidente é dividida em áreas relativas a ângulos e os valores fornecidos são discretizados. A partir dessas matrizes de redistribuição das interfaces são geradas as matrizes de radiação transmitida e refletida, que contém informação de direção e intensidade. Nesse método podem haver  $n$  interfaces, e elas podem ser texturizadas. Os interiores dos materiais também apresentam matrizes de propagação, relativas à transmissão da radiação através do interior dos materiais, que devem entrar nos cálculos. As interações são repetidas sucessivas vezes, simulando as múltiplas reflexões no interior de um sistema, e ao final, componentes (no formato de matrizes) são somadas para obter-se a parcela total da radiação transmitida.

O artigo define o que é chamado de uma interface efetiva, que é uma matriz que representa uma interface de efeito equivalente sobre a radiação transmitida a todas as interfaces de um sistema. Na figura 3.5 estão o diagrama de um sistema com duas camadas

e três interfaces definidas pelas matrizes R e T, que representam as parcelas de radiação refletidas e transmitidas em cada direção, e outro ilustrando o conceito de interface efetiva. Abaixo na figura estão as equações correspondentes. Depois de cálculos análogos para absorvidade dos materiais (através das matrizes de propagação) são obtidas matrizes com os valores finais de refletividade e transmissividade.



$$R_{2,eff}^{down} = R_3^{down} + T_3^{up} \left[ \sum_{i=0}^{\infty} (D_{glass} R_2^{down} D_{glass} R_3^{up})^i \right] D_{glass} R_2^{down} D_{glass} T_3^{down}$$

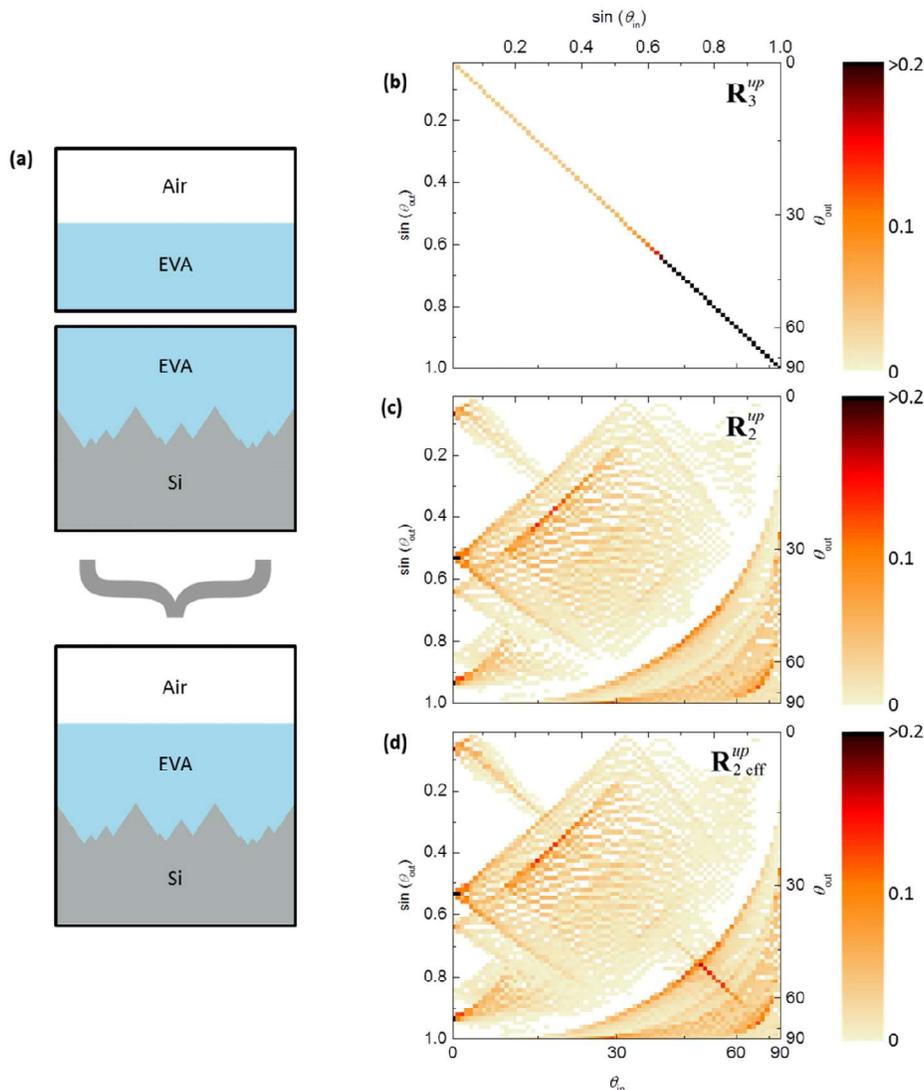
$$T_{2,eff}^{down} = T_2^{down} \left[ \sum_{i=0}^{\infty} (D_{glass} R_3^{up} D_{glass} R_2^{down})^i \right] D_{glass} T_3^{down}$$

**Figura 3.5 - Diagrama dos elementos do modelo OPTOS e somatórios das parcelas totais de radiação transmitida e refletida para produzir a equivalência da interface efetiva. R – Matriz de redistribuição da radiação refletida; T – Matriz de redistribuição da radiação transmitida; D – Matriz de propagação (interior dos materiais) [Tucher e Eisenlohr, 2016].**

Nesse modelo é necessário gerar separadamente uma matriz de redistribuição referente a cada textura de superfície a ser estudada utilizando-se outras ferramentas. Na figura 3.6 estão ilustrados resultados da aplicação de matrizes de redistribuição de reflexão para um módulo de silício mono-cristalino com texturização piramidal da superfície das células. Essas matrizes foram geradas pela ferramenta de *Ray tracing* produzida no mesmo laboratório, chamada *Raytracer 3D*. Nos gráficos que expõe os resultados (b, c, e d) as cores representam a intensidade da reflexão em cada ângulo de transmissão (eixo  $\sin\theta_{out}$ ), para cada ângulo de incidência ( $\theta_{in}$ ). É possível observar por esses gráficos o efeito de uma textura ao perceber que, no primeiro gráfico, de uma superfície não texturizada com reflexão especular, a radiação incidente apresenta somente reflexão em um ângulo, enquanto nos gráficos que descrevem uma superfície texturizada, uma mesma condição de incidência produz parcelas de radiação refletida em diferentes ângulos, correspondes à geometria da

superfície. Somando-se as colunas desses gráficos (todas as parcelas de reflexão) obtém-se a reflexão total para um dado ângulo de incidência.

Estudos de comparação e validação da metodologia OPTOS com métodos que utilizam puramente métodos de *raytracing* mostram coerência entre os resultados.



**Figura 3.6 - Resultados de redistribuição da radiação refletida. (a) representação das interfaces; (b) resultado de reflexão da interface ar-EVA, (c) resultado de reflexão da interface EVA-Si, com textura de micropirâmides; (d) resultado de reflexão da superfície equivalente [Tucher e Eisenlohr, 2016].**

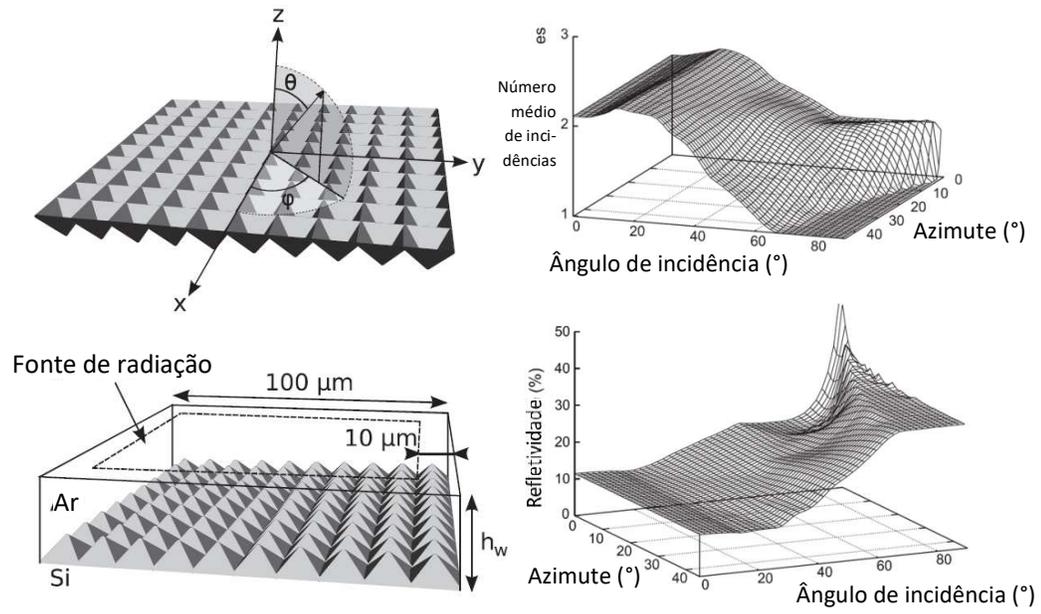
Em [Magnin e Harari, 2014] foi estudada a isoladamente a refletância direcional-hemisférica (uma direção de incidência definida com contabilização de todas as parcelas refletidas) da superfície do silício nas duas principais texturas utilizadas, em faixas de ângulo zenital ( $\theta$ ) de 0 a 90° e azimutal ( $\varphi$ ) de 0 a 45°. As texturas em questão têm geometria de pirâmides simples com distribuição aleatória, produzida por ataque químico, e de pirâmides invertidas com um padrão de repetição organizado, produzida por uma série de etapas de preparação, seguida de ataque químico (figura 3.7 à esquerda). A textura de pirâmides

aleatórias em geral é modelada como se também fosse organizada, pois a redistribuição da radiação por uma superfície de silício texturizada é aproximadamente igual nos dois casos, pois ao considerarmos um grande número de pirâmides em uma área de controle, a área total relativa de cada orientação de faces converge para o mesmo valor, e portanto as parcelas de radiação a sofrer os correspondentes desvios também.

Nesse trabalho foi desenvolvido em linguagem Fortran um método de *Ray tracing* 3D baseado em fundamentos de óptica geométrica com observação da polarização da radiação. As superfícies foram construídas com uma função de duas variáveis --  $z=f(x,y)$ , e a radiação é definida por vetores unitários com base em suas coordenadas esféricas e a interface considerada, quanto às características ópticas dos meios, é de ar-silício. O programa simula uma superfície texturizada e uma fonte de radiação plana infinita, com uma grande quantidade de feixes sendo emitidos e, incidindo sobre a superfície, e tendo a sua trajetória traçada individualmente. Assim, os resultados dos ensaios são estatísticos. O modelo foi validado através de resultados da literatura e experimentais para o comprimento de onda de 700 nm, e apresentou resultados muito próximos aos valores de referência, com variações de até 0,5% nos valores de refletância. O tempo de processamento do programa é de em torno de quatro dias em um computador pessoal, segundo os autores.

Foram apresentados os resultados de refletância e número médio de incidências de um feixe na superfície em função dos ângulos de zênite e azimute, simultaneamente. Tais resultados são apresentados para a textura de pirâmides simples na figura 3.7 à direita. O número médio de incidências por feixe é uma demonstração da relação entre as parcelas de radiação que sofrem uma, duas ou três incidências.

As abordagens e grau de detalhamento dos modelos variam, porém devem buscar reproduzir adequadamente o sistema em estudo frente aos objetivos específicos do seu contexto, para de fato operar como uma ferramenta funcional, com compromisso entre complexidade, agilidade e geração de informações válidas e confiáveis.



**Figura 3.7 - Texturas analisadas e faixas de ângulo de incidência da radiação utilizadas (esquerda) e resultados de número médio de incidências de um feixe, e refletância em  $\lambda=700 \text{ nm}$ , para a textura piramidal simples (direita), apresentados em [Magnin e Harari, 2014].**

#### 4. DESCRIÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO

Foi desenvolvido um modelo matemático de análise do sistema óptico formado pelas camadas sobre uma célula de Si-m inserida em um módulo. O modelo contempla um conjunto de 3 a 4 camadas (4 se houver um filme AR/auto-limpante sobre o vidro) composto por vidro, encapsulante e filme AR/passivante sobre a célula. O modelo tem abordagem puramente óptica, o que significa que aspectos termodinâmicos do processo não são previstos e todos os fenômenos e eventos são descritos para a temperatura de 25°C, pois variações de temperatura pouco afetam a transmissão da radiação pelas camadas existentes sobre a célula. No diagrama da figura 4.1 é apresentada uma visão geral do modelo.



4.1 - Visão geral do modelo desenvolvido.

O método prevê absorção da radiação pelos materiais, geração de uma parcela refletida e uma parcela transmitida a cada incidência em uma interface, efeito de *light trapping* produzido pela textura na superfície do silício, efeitos de interferência da radiação nos filmes e múltiplas reflexões internas no sistema, conforme ilustração do sistema óptico exposto na figura 4.2. São inicialmente calculados os resultados dos processos de interação da radiação com camadas isoladamente, sendo eles: absorções pelos materiais, reflexões

geradas pela incidência nas interfaces, efeito de *light trapping* e interferência nos filmes finos. São estabelecidas então as trajetórias da radiação, descritas pelos sucessivos eventos de transmissão e reflexão a que um feixe é submetido, para então ser feito um somatório de todas as trajetórias possíveis desde a incidência na primeira interface, até ser transmitida ao interior da célula.

A metodologia possui dados fixos de descrição da célula fotovoltaica e dados de característica espectral da radiação incidente, que podem ser alterados. É feita no modelo uma abstração da geometria e construção do módulo e da célula. Ou seja, a área do conjunto de camadas, bem como a fonte de radiação podem ser entendidas como elementos de área infinita com características e propriedades idênticas em toda a sua extensão. Assim, não são feitas considerações sobre a área dos dispositivos nem sobre contatos elétricos depositados na superfície da célula. Os cálculos são feitos sempre em paralelo para o sistema óptico e para a mesma célula sem encapsulamento, somente com filme de passivação, em interface direta com o meio externo.

O ângulo de incidência da radiação é discretizado e é feita uma varredura de  $\theta$  de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  em relação à normal, com um passo de  $5^\circ$ ; o ângulo azimutal é fixo (isso tem significado somente quando tratarmos da textura da superfície da célula). No tratamento da textura na superfície do silício são calculados os ângulos  $\alpha$ , formados entre a radiação incidente e as faces produzidas pela textura, a partir de  $\theta$ . Para cada ângulo de incidência é feita também uma varredura em  $\lambda$  para a faixa de 200 a 3000 nm com passos de 5 nm, de modo que os resultados são gerados ao longo de  $\theta$  e  $\lambda$ . A definição da faixa de  $\lambda$  está relacionada ao espectro solar, que tem mais de 99% de sua intensidade dentro dessa faixa. Apesar de o silício não absorver radiação com comprimento de onda acima de 1200 nm, existem mecanismos de conversão da radiação que a tornam aproveitável acima desse limite, e o método mantém a possibilidade de expansão e inclusão da modelagem desses recursos.

Os dados de entrada são espessura das camadas, absorvidade e índice de refração dos materiais em função de  $\lambda$ , conforme apresentado na tabela 4.1. Somente é considerada a parcela real do índice de refração, tendo em vista que o coeficiente de extinção dos materiais considerados é muito baixo na faixa estudada. Na tabela pode-se observar que são feitas algumas simplificações. A absorção de radiação pelos filmes é negligenciável, por serem dielétricos e pela baixa espessura; as espessuras do vidro e do encapsulante são padronizadas, por isso são fixas também; a absorção dos polímeros utilizados no encapsulamento é muito baixa e aproximadamente constante na faixa de interesse, por isso é tratada como constante em  $\lambda$ . A absorção de radiação pelo silício será tratada no modelo da célula, portanto a espessura não está no escopo do cálculo.

Uma vez realizados os cálculos para um determinado conjunto de entradas, diferentes informações podem ser extraídas - transmissão, absorção e reflexão relativas a camadas e interfaces específicas. Isso permite um melhor entendimento dos eventos que ocorrem, ou do sistema como um todo, tanto para comprimentos de onda específicos quanto para o somatório ou média ponderada dentro da faixa espectral.

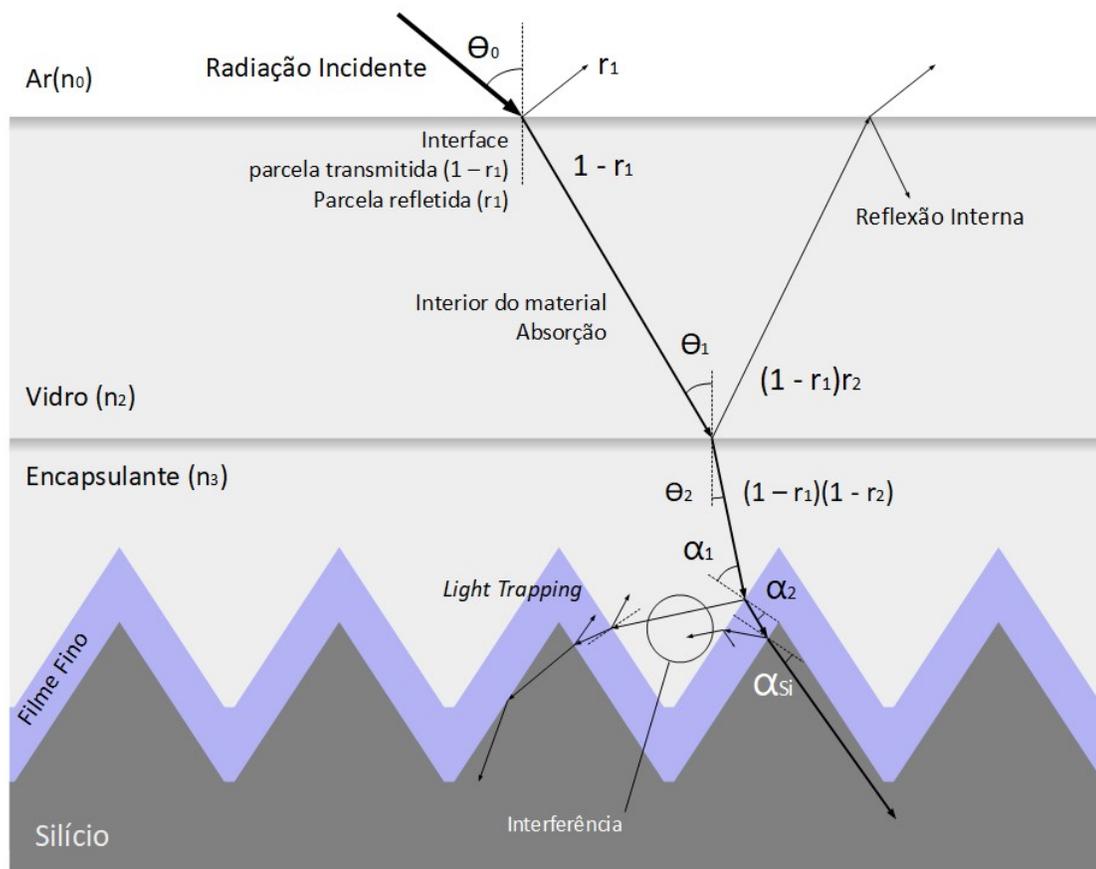


Figura 4.2 - Sistema óptico formado sobre a célula e eventos que ocorrem desde a incidência da radiação na interface superior até a entrada da radiação na célula.

Tabela 4-1 - Dados de entrada do programa relativos às camadas e materiais.

	h (Espessura) mm	n (Índice de refração – parcela real) adimensional	k (Coef. Extinção) $m^{-1}$
Camada 1(filme)	h1	$n_1(\lambda)$	-
Camada 2(vidro)	Cte	$n_2(\lambda)$	$k_2(\lambda)$
Camada 3(Encapsulante)	Cte	$n_3(\lambda)$	$k_3(\lambda)$
Camada 4 (filme)	h4	$n_4(\lambda)$	-
Célula	- *	$n_{Si}(\lambda)$	- *

\*A absorção do silício é abordada dentro do modelo da célula e a espessura está fora do escopo.

Entrando com os dados de espectro e resposta espectral da célula podem ser gerados dados absolutos em função dessas informações, como espectro total transmitido e densidade de corrente fotogerada, como será descrito em detalhe nos capítulos a seguir. Assim, podem ser realizados diferentes estudos do sistema, como comparações entre materiais, estudos de adequação de um sistema a diferentes espectros, estudo de espessuras ideais dos filmes para cada sistema (conjunto de materiais) e estudo de índices de refração ideais para cada camada, entre outras possibilidades.

#### 4.1. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO

##### 4.1.1. Transmissividade nas interfaces

Para o cálculo das parcelas de radiação transmitida e refletida quando da incidência de um feixe em uma interface, é necessário conhecer os ângulos de incidência e transmissão em relação à normal às interfaces, observando que são todas paralelas entre si (ex.:  $\theta_0$  e  $\theta_1$  – ângulos formados entre a radiação incidente (meio 0) e refratada (meio 1) - figura **4.2**); o primeiro ângulo é uma entrada, e o segundo é calculado através da lei de Snell (Equação 4.1), a partir do ângulo de incidência e dos índices de refração dos dois meios.

Para cada ângulo de incidência são calculados os ângulos dos raios refratados camada a camada, até o silício, começando pelo ambiente externo, com ar ( $n_{ar} = 1.0003$ , constante em  $\lambda$ ).

$$n_{ar} \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 \quad (4.1)$$

Utilizando os ângulos resultantes no interior de cada camada, após eventos de incidência e refração a cada interface,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  e  $\theta_{si}$ , calcula-se, através da Lei de Fresnell, as refletividades correspondentes (Equações 4.2, 4.3 e 4.4). A equação 4.2 é uma variação para o cálculo em  $\theta_0 = 0$ , e as equações 4.3 e 4.4 funcionam para  $\theta_0 \neq 0$ , em que ocorre polarização da radiação transmitida e refletida (uma vez que a refletividade é diferente para as duas componentes), e portanto o cálculo é feito em paralelo para as duas componentes, perpendicular ( $\perp$ ) e paralela ( $\parallel$ ) ao plano de reflexão, até a última interface. As equações (4.5) e (4.6) calculam a transmissividade relativa ao mesmo evento.

$$R_1 = \left( \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \quad (4.2)$$

$$R_{\perp 1} = \frac{\text{sen}^2(\theta_1 - \theta_0)}{\text{sen}^2(\theta_1 + \theta_0)} \quad (4.3)$$

$$R_{\parallel 1} = \frac{\text{tan}^2(\theta_1 - \theta_0)}{\text{tan}^2(\theta_1 + \theta_0)} \quad (4.4)$$

$$T_{\perp 1} = 1 - r_{\perp 1} \quad (4.5)$$

$$T_{\parallel 1} = 1 - r_{\parallel 1} \quad (4.6)$$

Assim obtém-se a parcela refletida  $r$  e a parcela transmitida  $t$  da radiação através de cada interface, para as duas componentes de polarização, ao longo das faixas de  $\lambda$  e  $\theta_0$  (ângulo de incidência no sistema) [Hecht, 2002].

Os valores de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$  e  $R_{si}$  obtidos nessa etapa são valores parciais ( $R_1$  e  $R_2$  se houver filme sobre o vidro; senão,  $R_2$  é um valor final da etapa e  $R_1$  não existe); a partir deles são obtidos valores finais de reflexão após interferência que ocorre nos filmes, e *light trapping* na superfície do silício, e esses passam a ser tratados como interfaces representadas por um só valor de reflexão ( $R_{si}$  final engloba os dois efeitos em um valor).

#### 4.1.2. Transmissividade Pós-absorção no Interior das Camadas

Para obtenção desses valores o cálculo é feito através das equações (4.7) e (4.8) (Equação fragmentada pois a distância percorrida é utilizada novamente em outra etapa), utilizando-se os dados de caminho percorrido dentro do material (em função do  $\theta$  correspondente à camada e da espessura  $h$ ) e coeficientes de extinção dos materiais,  $k(\lambda)$ . Os cálculos são demonstrados para a camada 1 [Duffie e Beckman, 2013].

$$\text{Distância percorrida:} \quad l_1 = h_1 / \cos \theta_1 \quad (4.7)$$

$$\text{Parcela transmitida:} \quad T_1 = 10^{-k_1 * l_1} \quad (4.8)$$

#### 4.1.3. Redução da Refletividade por Mecanismo de Interferência

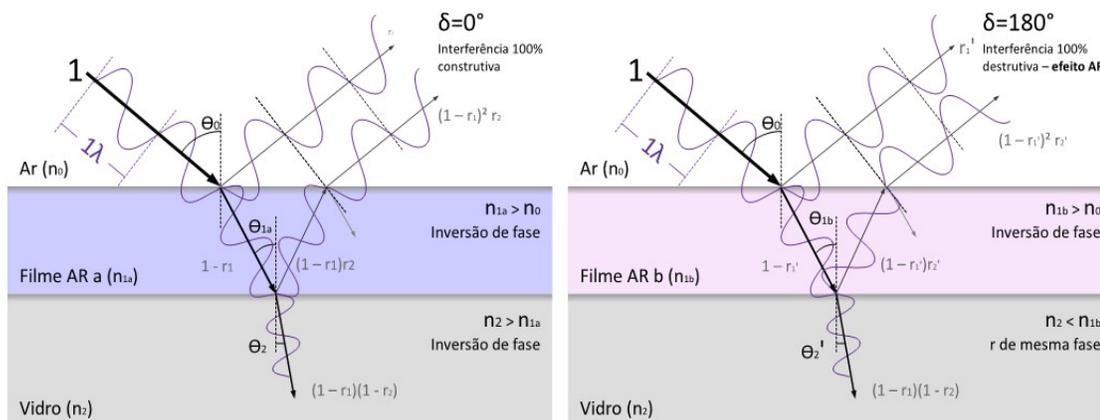
Os eventos de interferência estão relacionados à defasagem  $\delta$  entre duas ondas refletidas de um feixe incidente sobre um filme fino, a onda refletida na interface superior, e a onda transmitida na interface superior, refletida pela interface inferior, e novamente transmitida na interface superior. Essa defasagem define se a radiação sofrerá interferência construtiva ou destrutiva, e em que intensidade. Para o cálculo da defasagem utiliza-se a distância percorrida pelo feixe transmitido no interior do filme (em função de  $h$  e  $\theta$ , conforme equação 4.7) e o comprimento de onda da radiação no interior do material, que depende de  $\lambda_0$  (ambiente externo) e do  $n$  do material; na figura 4.3 é demonstrado o processo de interferência em um filme fino depositado sobre o vidro de um módulo, para dois casos de relação entre os índices de refração, e para as duas situações limite de interferência, máxima e mínima; em  $a_1$  (Equação 4.9) é calculado o número de ciclos de  $\lambda$  que se propaga no interior do filme; se for uma quantia não inteira há defasagem, correspondente a essa parcela decimal. Na Equação (4.10) a defasagem é obtida em radianos.

$$a_1 = \frac{2 * l_1}{\lambda_0 n} \quad (4.9)$$

$$\delta_1 = (a_1 - \text{parcela inteira de } a_1) * 2\pi \quad (4.10)$$

A equação (4.10) é válida para a maioria dos casos, nos quais  $n_0 < n_1 < n_2$ ; se  $n_0 < n_1 > n_2$  deve ser somado um valor corresponde a meio ciclo à defasagem, conforme a equação (4.11). Isso ocorre porque ao incidir em um meio mais denso, a radiação refletida sofre uma inversão de fase, que pode ser tratada como uma defasagem de meio ciclo. Nos casos abrangidos por pela equação (4.10) ocorrem duas inversões de fase, resultando em um deslocamento de um ciclo completo, que é o mesmo que não haver defasagem.

$$\delta_1 = (a_1 - \text{parcela inteira de } a_1 + 0,5) * 2\pi \quad (4.11)$$



**Figura 4.3 - Representação esquemática de interferência em um filme fino, para interferência 100% construtiva, e refletividade máxima (Esquerda), e para interferência 100% destrutiva, situação em que obtém-se mínima refletividade (Direita).**

A situação ideal de interferência corresponde à situação apresentada à Direita na figura 4.2, quando há defasagem de meio ciclo entre os dois feixes refletidos e a interferência é 100% destrutiva, produzindo a máxima transmissividade que pode ser obtida pelo mecanismo. Uma vez obtido o valor da defasagem, é calculado através da equação (4.12) o valor resultante de reflexão no filme como se fosse somente uma interface simples,  $r_{1final}$ , a ser inserida no cálculo de transmissividade do sistema. O cálculo é feito em paralelo para as duas componentes de polarização da radiação.

$$R_{1final} = R_1 + (1 - R_1)^2 * R_2 + 2 * (1 - R) * \sqrt{R_1 * R_2} * \cos \delta_1 \quad (4.12)$$

Os parâmetros  $r_1$  e  $r_2$  são as reflexões simples nas interfaces superior e inferior do filme, com valores obtidos através da equação (4.2) ou (4.3) e (4.4) [Hecht, 2002].

#### 4.1.4. Modelo da Textura na Superfície do Silício

O modelo da interação da radiação com a textura foi construído em duas etapas. Na primeira foi utilizada uma abordagem de álgebra linear, na qual foram gerados vetores em

um espaço  $\{xyz\}$  de radiação incidente, a partir de  $\theta$ , e de orientação das faces, e calculados os vetores da radiação refletida, que pôde sofrer até duas reincidências, de modo que o processo foi repetido até que a radiação fosse perdida. Na figura 4.4 está representada a textura e os vetores que a descrevem, bem como os vetores que descrevem a trajetória da radiação. Através desses vetores de face e de radiação obtém-se os ângulos  $\alpha$ , de cada evento de incidência e reincidência de feixes refletidos com as faces das pirâmides. Para a célula não encapsulada é utilizado  $\theta_0$  ( $\theta$  entre a normal ao plano da célula e radiação no meio externo) na geração do vetor de radiação incidente, e para a célula encapsulada é utilizado  $\theta_3$  ( $\theta$  entre a normal ao plano da célula e a radiação no interior do encapsulante).

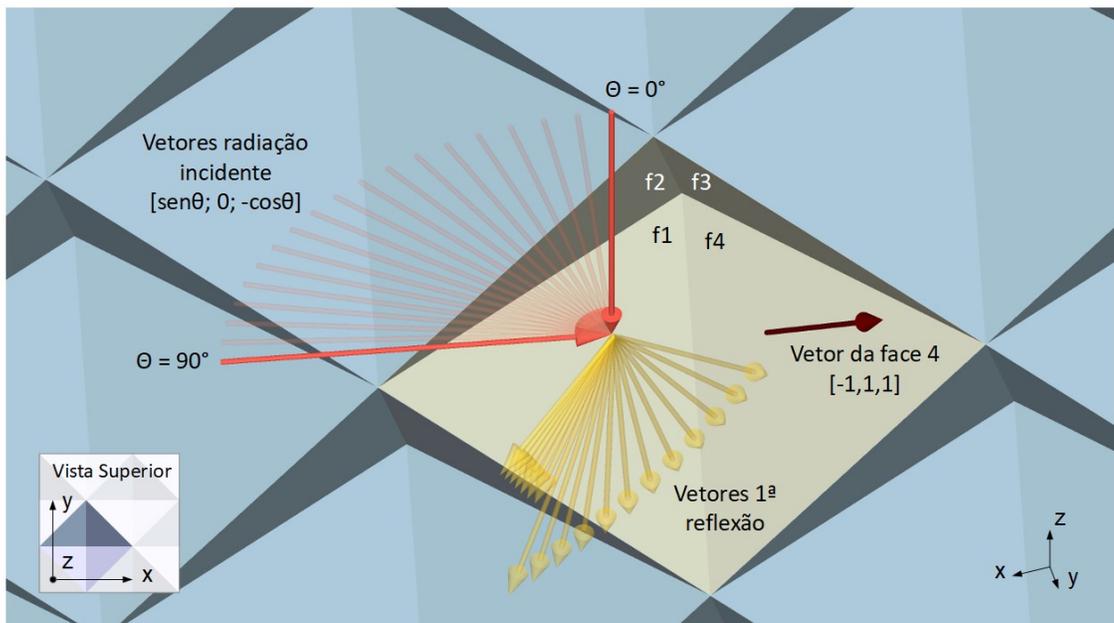


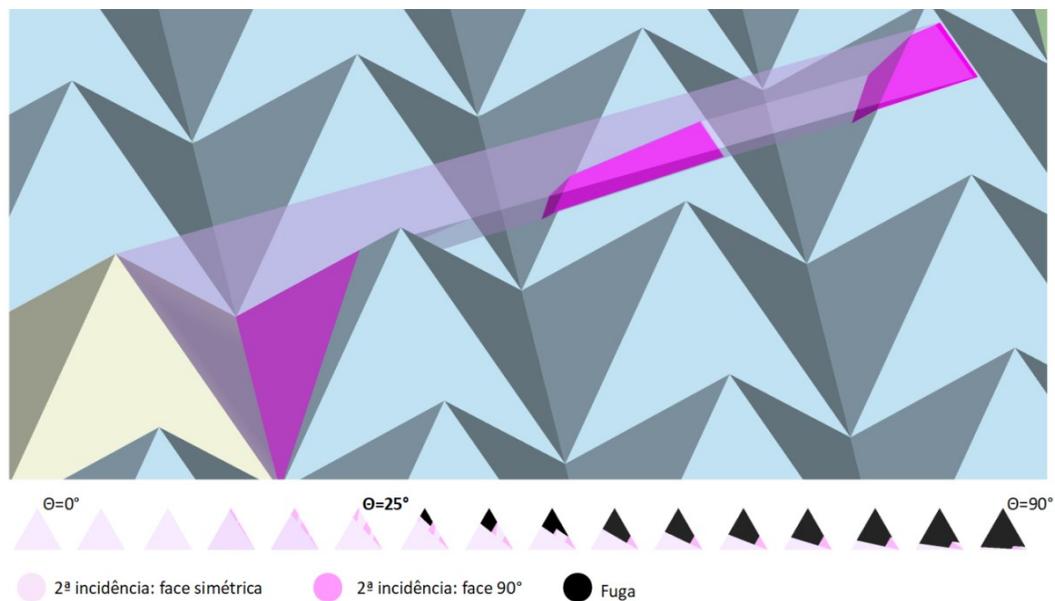
Figura 4.4 - Modelo da textura composta por pirâmides e vetores de face e de direção da radiação.

Conhecendo-se todos os ângulos são calculadas as intensidades de reflexão de cada incidência, englobando o efeito de interferência da radiação por filme fino. Os efeitos de interferência e de *light trapping* ocorrem paralelamente na redução da reflexão da interface, sem influenciar um no efeito do outro, uma vez que a faixa de alturas das pirâmides é em torno de 100 vezes maior do que a faixa de espessuras dos filmes. Além disso, os comprimentos de onda absorvidos pelo silício são muito menores do que as dimensões da textura, de modo que o modelo de *ray tracing* pode ser baseado em óptica geométrica convencional.

Na segunda etapa foram definidos fatores de visão da radiação em relação às orientações de face produzidas pela textura, para cada evento de incidência e reincidência pós-reflexão, com o auxílio do software de modelagem 3D *Sketchup*. A partir de um modelo em 3D da textura, construída com pirâmides regulares, foram feitas as projeções da radiação ao longo das trajetórias recém traçadas, cuja proporção entre áreas produziu os fatores de

visão; na figura 4.5 é exposto o processo de geração dos fatores de visão da radiação refletida após incidência com  $\theta_0$  de  $25^\circ$ , e abaixo a proporção gráfica entre os fatores de visão desse evento de reincidência para todos os valores que os ângulos  $\theta$  podem assumir, que vão de  $0$  a  $90^\circ$ , com passo de  $5^\circ$ . Os valores obtidos foram então associados a cada ângulo  $\theta$  de incidência, e mantidos fixos, uma vez que ângulos de reflexão são iguais aos de incidência, e independente das propriedades dos materiais envolvidos e espessura do filme de passivação. Na primeira incidência a radiação se distribui em quatro trajetórias diferentes, em função da orientação das faces das pirâmides, porém por simetria são geradas somente duas sequências de fatores de visão. A partir disso podem ocorrer até mais duas reincidências; para cada incidência e reincidência há um *string* de fatores de visão.

Os ângulos que  $\theta_3$  assume são resultado de um cálculo e portanto podem assumir qualquer valor, diferente de  $\theta_0$ , que assume valores dados como entrada ( $0$  a  $90^\circ$ , de  $5$  em  $5^\circ$ ), por isso são feitas aproximações e o ângulo em questão assume o valor mais próximo que seja múltiplo de  $5$ .



**Figura 4.5 - Obtenção de fatores de visão da radiação refletida após incidência a  $25^\circ$ , e abaixo fatores de visão da radiação refletida após incidência a  $25^\circ$ , nessa face.**

O plano  $\{xz\}$  contém a faixa de ângulos  $\theta$ , e a textura é orientada em um ângulo azimutal fixo de  $45^\circ$  se considerarmos as arestas das bases das pirâmides em relação aos eixos. Isso pode ser visto no canto inferior esquerdo da figura 4.4. Essa orientação entre o plano da faixa de ângulos da radiação incidente e a textura é uma abstração da situação de um módulo em uso, em função do posicionamento das células em um módulo, e da orientação da textura nas faces, que são sempre iguais, e do posicionamento usual dos

módulos em relação ao plano da trajetória solar, que oscila em torno dessa situação aqui fixada.

A transmissividade final na superfície do silício é obtida através da equação (4.13), que combina as reflexões calculadas para cada conjunto de entradas dos materiais,  $\lambda$  e  $\theta$ , e insere nos argumentos dos fatores de visão os valores correspondentes, por  $\theta$ . O cálculo é repetido para as reflexões do silício encapsulado e não encapsulado, utilizando reflexões calculadas para cada situação.

$$\begin{aligned}
 T_{si} = & f v_{ri-f1} * \left( 1 - R_{i-f1} + R_{i-f1} \left( f v_{f1-f2} (1 - R_{f1-f2}) + f v_{f1-f4} (1 - R_{f1-f4}) \right) \right) \\
 & + f v_{ri-f3} \left( (1 - R_{i-f3}) \right. \\
 & \left. + R_{i-f3} \left( f v_{f3-f2} ((1 - R_{f3-f2}) + R_{f3-f2} (f v_{f3f2-f3} (1 - R_{f3f2-f3}))) \right) \right)
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

Os termos  $fv$  da equação representam os fatores de visão; a primeira parte do índice, a origem da radiação, e a segunda parte o evento de incidência, por exemplo,  $fv_{f1-f2}$  é o fator de visão da radiação proveniente da reflexão na face 1, que incide na face 2. O índice  $ri$  significa radiação incidente. Os termos  $R$  representam as refletividades; os termos  $(1-R)$  representam a transmissividade de um mesmo evento. O índice  $i$  em  $r$  ( $R_i$ ) representa refletividade da radiação incidente, e os índices de face funcionam da mesma forma.

A partir dos vetores da radiação que escapa do sistema, com intensidade definida pelas sucessivas reflexões, que pode ser obtida a partir da equação acima, é calculada a refletividade interna na superfície do vidro e recuperação dessa radiação, repetindo-se o procedimento descrito de forma simplificada (trata-se de uma parcela muito pequena de radiação e o erro associado às simplificações é muito menor). Essa recuperação contribui e é somada à transmissividade na superfície do silício  $T_{si}$ .

#### 4.1.5. Transmissividade total do Sistema

Até esse ponto foram calculados os valores finais de refletividade/transmissividade em cada interface e camada assumida como interface (filme fino) do silício encapsulado e não encapsulado, e absorções pelos materiais. A transmissividade na superfície do silício não encapsulado já é o valor final; para o cálculo de transmissividade total do sistema encapsulado,  $\tau_{\text{sistema}}(\lambda)$ , após múltiplas reflexões internas é aplicada a equação (4.14), que realiza o somatório infinito de todas as parcelas de radiação, definidas por sua trajetória (sucessão de transmissões/reflexões), e que chegam até o interior da célula, conforme descrito anteriormente. Cada conjunto de índices **a**, **b** e **c** dos somatórios define uma trajetória. Os argumentos estão identificados na tabela 4.2.

Tabela 4-2 - Argumentos da equação de transmissividade total do sistema.

	Refl interface	Transm interface	Transmissão pós abs.
Interface 0-1(ar-vidro)	$R_1$	$(1 - R_1)$	-
Camada 1(vidro)	-	-	$T_1$
Interface 1-2(vidro-encapsulante)	$R_2$	$(1 - R_2)$	-
Camada 2 (encapsulante)	-	-	$T_2$
Interface 2-Si (Encapsulante-silíc)	$R_{si}$	$(1 - R_{si})$	-

$$\tau_{sistema}(\lambda) = \sum_{a=0}^{\infty} \sum_{b=0}^{\infty} \sum_{c=0}^{\infty} T_1^{1+2b} * T_2^{1+2c} * (1 - R_1) * (1 - R_2)^{1+2a} * (1 - R_{si}) * (R_1 * R_{si})^a * (R_1 * R_2)^b * (R_2 * R_{si})^c \quad (4.14)$$

O cálculo produz um *string* de valores em função de  $\lambda$ , para cada  $\theta$  de radiação direta e um para a transmissividade de radiação difusa; o cálculo de transmissividade de radiação difusa é realizado como se toda a radiação incidisse em um único ângulo de  $60^\circ$ , que é uma aproximação proposta e validada em [Duffie, 2013].

#### 4.2. MODELO DA CÉLULA

Foi gerada no programa PC1D a EQI de uma célula de Si-m de alta qualidade, e a partir dela uma “RE interna”, exposta no gráfico da figura 4.6, como se 100% da radiação penetrasse no silício; os efeitos de perda por reflexão são definidos pelo modelo. A equação (4.15) é uma variação da equação (2.2), para cálculo da **densidade** total de corrente fotogerada ( $J_{SC}$ ).

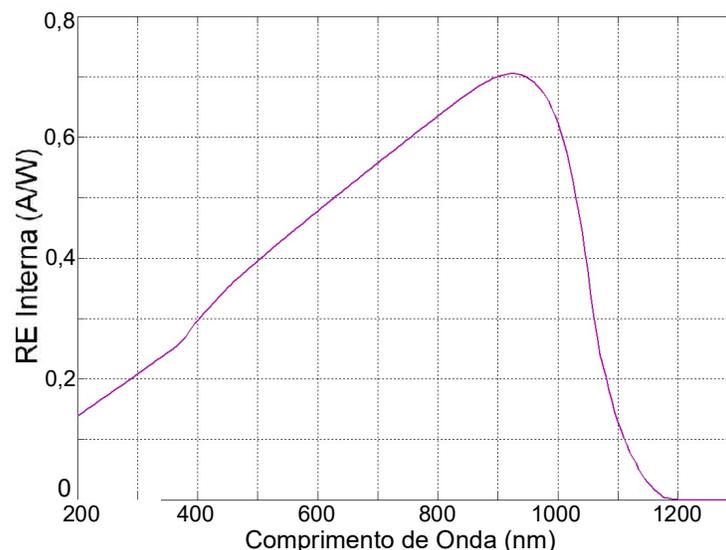


Figura 4.6 - Resposta Espectral interna de uma célula de alta qualidade gerada no programa PC1D.

$$J_{SC} = \int_0^{\infty} J_{FG}(\lambda) = \int_0^{\infty} REi(\lambda)g(\lambda)d\lambda \quad (4.15)$$

#### 4.3. MODELO DA RADIAÇÃO INCIDENTE

A radiação incidente é definida por um espectro de entrada, com uma componente direta e uma componente difusa, e pelos ângulos de incidência. Em relação à radiação direta, o ângulo  $\theta$  de incidência é variado de 0 a 90° em relação à normal, e a transmissividade de radiação difusa é calculada com o ângulo de incidência de 60°, conforme descrito anteriormente. Os dados espectrais de entrada são fixos para o espectro padrão G173 (Figura 2.2), mas podem ser alterados para análise de comportamento de um sistema sob diferentes espectros.

A radiação sofre uma redução de intensidade proporcional ao cosseno do ângulo de incidência, relativa à distorção da projeção de um feixe sobre uma superfície inclinada, conforme a equação (4.16). A massa de ar e espectro são mantidos constantes, de modo que não pode ser considerado como a simulação do comportamento de um sistema ao longo de um dia de exposição à radiação solar natural. A análise limita-se a considerar o comportamento do sistema óptico em diferentes ângulos de incidência para um dado espectro e pode **comparar** o desempenho para diferentes espectros e localidades.

$$I = I_0 \cos \theta \quad (4.16)$$

onde:

I – Intensidade da radiação incidindo com um ângulo  $\theta$ ;

$I_0$  – Intensidade inicial da radiação.

#### 4.4. INFORMAÇÕES OBTIDAS A PARTIR DA TRANSMISSIVIDADE TOTAL DO SISTEMA, ESPECTRO INCIDENTE E RESPOSTA ESPECTRAL

Uma vez calculada a transmissividade total do sistema, os dados resultantes podem ser cruzados com um espectro incidente e a resposta espectral interna; com essas informações podem ser calculados a resposta espectral do sistema (Equação 4.17), a transmissão do sistema para um espectro específico (Equação 4.18) e a corrente fotogerada/de curto-circuito (Equação 4.20). A corrente de curto-circuito ideal (Equação 4.21), que representa uma situação ideal e inatingível em que 100% da radiação é transmitida ao interior da célula é calculada em paralelo, para fins de comparação e para o cálculo da transmissividade ponderada (Equação 4.22)

- Resposta Espectral do sistema:

$$REe(\lambda) = REi(\lambda)\tau_{\text{sistema}}(\lambda) \quad (4.17)$$

onde:

$REe(\lambda)$  – Resposta espectral do sistema [mA/mW.λ];

$REi(\lambda)$  – RE da célula - como se 100% da radiação atingisse o interior da célula [mA/mW.λ];

$\tau_{sistema}(\lambda)$  = transmissividade do sistema, valor entre 0 e 1 [ $\lambda^{-1}$ ].

- Transmissão de um espectro específico:

$$G_{célula} = \int g(\lambda) * \tau_{sistema}(\lambda) d\lambda \quad (4.18)$$

$$G = \int g(\lambda)d\lambda \quad (4.19)$$

onde:

$G/G_{célula}$  - intensidade total da radiação incidente/que penetra na célula [mW/cm<sup>2</sup>];

$g(\lambda)$  – espectro da radiação incidente [mW/cm<sup>2</sup>.λ];

- Densidade total de corrente gerada no sistema para um espectro  $g(\lambda)$ :

$$J_{SC} = \int J_{FG} = \int_0^{\infty} REe(\lambda)g(\lambda)d\lambda \quad (4.20)$$

$$J_{SCideal} = \int_0^{\infty} REi(\lambda)g(\lambda)d\lambda \quad (4.21)$$

onde:

$J_{SC}$  – Corrente fotogerada/de curto-circuito [mA];

$J_{SCideal}$  – Corrente de curto-circuito idealizada, como se toda a radiação fosse aproveitada[mA];

- Transmissividade ponderada para o espectro incidente e para a RE:

Efetuando-se a divisão da  $J_{SC}$  de um dado sistema pela  $J_{SC}$  ideal obtém-se uma transmissividade do sistema a um espectro e RE específicos, o que demonstra a adequação a um contexto de radiação incidente e célula utilizada.

$$T_{pond} = \frac{J_{SC}}{J_{SCideal}} = \frac{\int_0^{\infty} REi(\lambda)\tau_{sistema}(\lambda)g(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} REi(\lambda)g(\lambda)d\lambda}$$

(4.22)

onde:

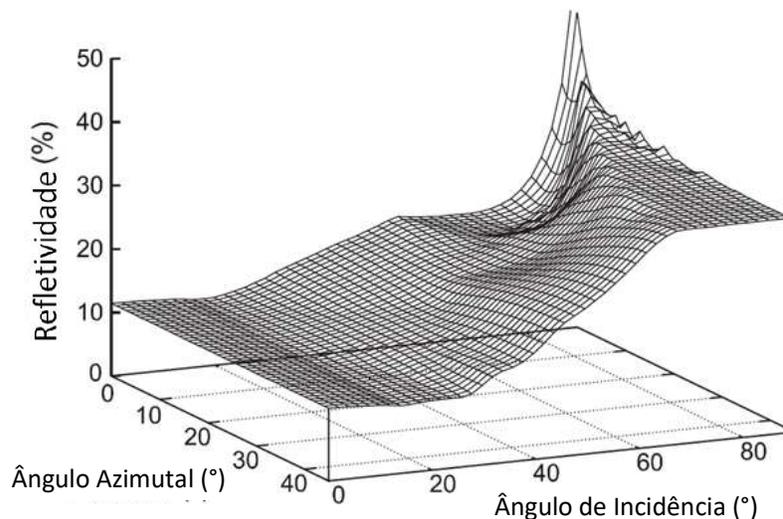
$T_{pond}$  – Transmissividade ponderada; adimensional, [0-1].

Além dessas informações a transmissividade do sistema óptico pode ser analisada de forma detalhada, interface a interface e ao longo de  $\lambda$  e  $\theta$ , para diferentes propriedades ópticas e materiais, para melhor entendimento de como ocorrem as perdas na transmissão.

#### 4.5. VALIDAÇÃO DO MODELO ÓPTICO

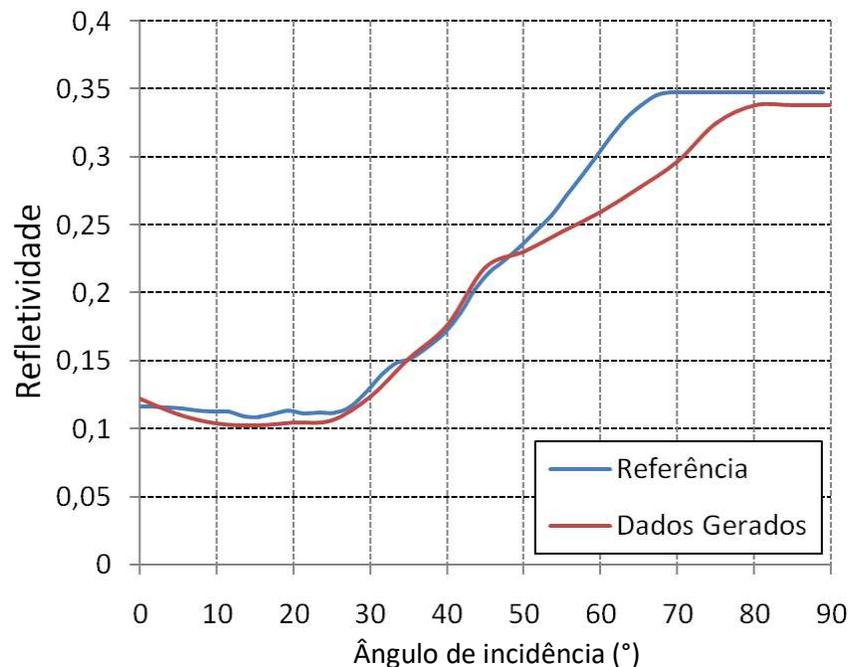
O modelo óptico desenvolvido foi, exceto por duas etapas, construído por uma concatenação de fórmulas e conceitos físicos e matemáticos já estabelecidos. Somente a descrição matemática da interação da radiação com a superfície texturizada do silício e das múltiplas reflexões que a radiação sofre ao incidir no sistema foram desenvolvidas para o modelo. Para esses dois trechos de modelagem foi realizada uma validação por literatura, sendo utilizadas como referências modelos confiáveis, validados por ensaios reais.

A descrição da forma como a transmissão de radiação na superfície do silício é alterada pela presença da textura piramidal foi comparada ao modelo proposto em [Magnin e Harari, 2014]. O modelo, descrito mais detalhadamente no capítulo 3, apresenta um algoritmo de cálculo da transmissividade para uma radiação monocromática em  $\lambda=700$  nm, e para a interface ar-silício isoladamente, portanto o modelo aqui proposto foi isolado e uma curva resultante foi gerada para o mesmo  $\lambda$ . No trabalho referência foi prevista a interação para faixas de ângulos zenitais e azimutais, enquanto no presente trabalho foi feita uma varredura somente em relação ao ângulo zenital, e o ângulo azimutal foi fixado na orientação definida como  $45^\circ$  azimute na referência. Na figura 4.7 está ilustrado o resultado do modelo referência; a curva definida em azimute de  $45^\circ$  foi sobreposta à curva gerada pelo modelo aqui proposto, conforme apresentado na figura 4.8.



**Figura 4.7 - Refletância da radiação monocromática a 700 nm da superfície do silício para incidência de 0 a  $90^\circ$ , e orientação azimutal de 0 a  $45^\circ$ , proposto por [Magnin e Harari, 2014].**

Na figura que contém a curva gerada pelo modelo e a curva referência pode-se observar que apresentam valores próximos até em torno de  $45^\circ$ , com diferenças inferiores a 0,01, em valor absoluto. Acima de tal valor tem uma maior divergência. A faixa de maior importância é de 0 a  $40^\circ$ , pois, conforme será descrito em maior detalhe posteriormente, a radiação nunca atinge uma célula encapsulada em um ângulo superior a  $42^\circ$ .



**Figura 4.8 - Refletividade da radiação monocromática de 700 nm da superfície texturizada do silício – dados de referência, extraídos da figura 4.7 e dados gerados pelo modelo proposto.**

Para validação do método de determinação da transmissividade total do sistema, a partir das reflexões de cada interface, já obtidas pelas equações de Snell, e Fresnell, e absorções dos materiais, foi utilizado como referência o método apresentado em [Krauter, 2006], comentado no capítulo 3.

O método aqui proposto tem como entrada duas camadas antecedendo o silício, o vidro e o encapsulante, lembrando que, para os filmes finos são gerados valores equivalentes de reflexão, e nessa etapa são tratados como interfaces. A equação (4.14) proposta, apresentada e descrita no capítulo 4.1.5, é análoga a tal método. Para validação foram gerados valores de transmissividade total de um mesmo sistema através dos dois métodos para incidência a  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $20^\circ$  em relação à normal. Os resultados divergiram menos de 0,1%.

## 5. ESTUDOS REALIZADOS A PARTIR DO MODELO

Estudos realizados a partir do modelo:

- Filme de passivação/AR sobre a célula; espessura e  $n(\lambda)$  para três materiais;
- $n(\lambda)$  encapsulante – Versões comerciais e varredura;
- Filme anti-aderente/AR, sobre o vidro do módulo PV; espessura e  $n(\lambda)$ ;
- Desempenho de um conjunto de materiais para dois espectros diferentes.

Considerações gerais sobre os parâmetros utilizados nas simulações:

- $n(\lambda)$  e  $k(\lambda)$  vidro fixos;
- Ângulo de transmissão no interior do vidro  $< 41,4^\circ$ , sempre;
- RE Si-m;
- Radiação incidente – Espectro de referência.

O primeiro estudo teve o objetivo de determinar a espessura ideal de filme de passivação para os materiais  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{SiO}_2$ , com e sem o sistema de encapsulamento, de modo a buscar também uma relação entre os dois valores, para cada filme. Utilizando o filme de material e espessura com melhor desempenho para o sistema encapsulado foi estudada a influência do índice de refração do encapsulante na transmissividade do sistema, inicialmente para os índices de refração de apresentações comerciais de encapsulantes, e depois ao longo de uma faixa, buscando um valor ideal. Depois foi observado o aspecto óptico da presença de um filme sobre o vidro para dois materiais diferentes cuja principal função não é óptica, mas deve, porém, haver um compromisso entre essa função e seu desempenho óptico; idealmente devem melhorar a transmissividade. Ao final foi observada a diferença de desempenho do sistema com melhores resultados nos estudos anteriores quando exposto a um espectro médio da cidade de Porto Alegre (Figura 2.2), lembrando que até então foi utilizado o espectro padrão.

As características de  $n(\lambda)$ ,  $k(\lambda)$  e espessura do vidro foram mantidas constantes em todos os estudos, para um vidro *float* temperado com baixo teor de ferro (Figura 2.19); entende-se que esse é um elemento do sistema bem resolvido, e bastante limitado à forma como é aplicado atualmente em função de outras questões de projeto (além da característica óptica), como o aspecto mecânico e químico -- o vidro é o material que melhor se adequa à aplicação em função da alta resistência mecânica que fornece ao sistema e da sua inércia química e resistência a intempéries. Entre os vidros disponíveis para uma aplicação de tais dimensões e desempenhando essas funções de forma satisfatória, o vidro sodo-cálcico com baixo teor de ferro é a melhor opção em termos ópticos.

É importante observar que para uma célula encapsulada o ângulo máximo que a radiação atinge no interior do vidro é em torno de  $40^\circ$ , e tende a reduzir a cada interface, em função da diferença de índices de refração a que a radiação é submetida do meio externo para o interior do sistema. Quando o ângulo de incidência é citado ou apresentado

em um contexto, a menos que seja explicitado, trata-se do ângulo de orientação da radiação no meio externo em relação ao plano do sistema óptico,  $\theta_0$ , pois a informação de maior importância é o comportamento do sistema para diferentes ângulos de incidência, e não para os ângulos que a radiação assume no interior dos materiais; esses tem uma função intermediária nos cálculos. Na tabela 5.1 são apresentados os ângulos que a radiação assume no interior do vidro para diferentes ângulos de incidência, para o  $n_{\text{vidro}}$  em  $\lambda$  de 300 nm (1,5788), médio de 300 a 1200 nm (1,5248), e de 1200 nm (1,5112), que correspondem aos extremos e à média no intervalo que contém a RE do Si-m.

**Tabela 5-1 - Relação entre o ângulo de incidência e o ângulo que a radiação assume no interior do material para diferentes comprimentos de onda.**

Meio	Ar( $\theta_0$ )	Vidro ( $\theta_1$ )		
$\lambda$ (nm)	-	300	[300-1200]	1200
n	1,0003	1,5788	1,5248	1,5112
Ângulo $\theta$ (°)	0	0	0	0
	15	9,4	9,8	9,9
	30	18,5	19,1	19,3
	45	26,6	27,6	27,9
	60	33,3	34,6	35,0
	75	37,7	39,3	39,7
	89,9	39,3	41,0	41,4

### 5.1. ANÁLISE DE MATERIAIS EMPREGADOS NO FILME DE PASSIVAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA E INFLUÊNCIA DA ESPESSURA

A transmissividade de uma interface depende da relação entre os índices de refração dos dois materiais que a compõe, chamada de índice de refração relativo – a reflexão aumenta quanto maior for esse valor. Quando tratamos de um filme fino, deve ser considerada a relação entre os dois índices de refração relativos (das interfaces superior e inferior do filme). Para que a interferência auxilie efetivamente em aumentar a transmissividade em uma interface, deve-se buscar uma relação adequada entre os três índices de refração envolvidos, de modo que a reflexão isolada nas duas interfaces seja semelhante. Além disso, existe uma espessura ideal do filme, diferente para cada sistema, na qual ocorre máxima interferência destrutiva em reflexão, e máxima transmissão.

Esse cálculo torna-se extenso se houver interesse nesse comportamento para uma faixa de comprimentos de onda na qual o  $n$  dos materiais não é constante, como ocorre nesse estudo. Além disso, o estudo envolve uma superfície texturizada, e esse efeito ocorre simultaneamente ao efeito de *light trapping*. O vidro tem suas propriedades fixadas conforme descrito no início desse capítulo; o encapsulante no presente estudo tem as propriedades definidas para o material mais amplamente empregado, o EVA, com índice de refração de 1.49, fixo em função de  $\lambda$ .

Os estudos foram realizados para filmes de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{SiO}_2$  com espessuras na faixa 10 a 200 nm e passo de 10 nm. Inicialmente é apresentado o desempenho resultante dos três sistemas através da densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{SC}$ ). Para demonstrar como é o comportamento em função da variação da espessura foram gerados gráficos para cada situação plotando a  $J_{SC}$  em função do ângulo, para algumas espessuras, a de melhor e pior desempenho e algumas dentro desse intervalo, que melhor demonstram a dependência do desempenho à espessura. É sempre apresentada, como referência, a curva da  $J_{SC}$  ideal, que representa a situação em que 100% da radiação penetra na célula. A  $0^\circ$  a  $J_{SC}$  ideal é de **37,38 mA/cm<sup>2</sup>**. É uma situação inatingível, porém o objetivo é aproximar-se ao máximo da curva de  $J_{SC}(\theta)$ . Depois serão apresentados resultados em função da espessura, com curvas referentes aos ângulos e, por fim, observações detalhadas da reflexão em cada interface envolvida, em função de  $\lambda$ .

Na figura 5.1 são apresentados esses resultados para os filmes de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Observa-se que a variação da espessura tem uma influência bem mais expressiva na célula não encapsulada, pela maior diferença entre as curvas. O menor valor de  $J_{SC}$  é de 31,49 mA/cm<sup>2</sup> e ocorre em 10 nm, é a mais elevada  $J_{SC}$  é de 36,84 mA/cm<sup>2</sup> e ocorre em 70 nm. Na célula encapsulada o máximo também ocorre em 70 nm e tem valor de 35,43 mA/cm<sup>2</sup>, e o mínimo em 10 nm, com valor de 33,99 mA/cm<sup>2</sup>, em incidência normal. Isso representa uma variação de 14,29% e de 3,83%, respectivamente. Depois disso a  $J_{SC}$  volta e reduzir, um pouco mais lentamente.

Na figura 5.2 são apresentados os resultados para os filmes de  $\text{SiO}_2$ . Para o sistema encapsulado observa-se que a espessura influencia muito pouco no valor de  $J_{SC}$ , variando entre 33,88 mA/cm<sup>2</sup>, na espessura de 70 nm, e 34,05 mA/cm<sup>2</sup>, na espessura de 10 nm; isso representa menos de 0,05% de variação. Na célula não encapsulada porém há uma alta dispersão dos valores. A  $J_{SC}$  máxima é de 36,93 mA/cm<sup>2</sup>, em 10nm, e a mínima, de 32,75 mA/cm<sup>2</sup>, em 90 nm, uma variação de 11,19%. Isso se deve à proximidade entre o índice de refração do encapsulante e do filme, que enfraquece o efeito de interferência. Um segundo máximo, relativo, ocorre em 240 nm para o sistema encapsulado e para a célula sem encapsulamento, em incidência normal.

Os resultados referentes aos filmes de  $\text{TiO}_2$  são apresentados na figura 5.3. O máximo ocorre em 60 nm, e o mínimo em 10nm, com e sem encapsulamento. A dispersão das curvas no sistema encapsulado é inferior à que ocorre no sistema com filme de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  e superior à observada com o filme de  $\text{SiO}_2$ . Os valores são próximos aos do  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . A  $J_{SC}$  máxima do sistema encapsulado é de 35,06 mA/cm<sup>2</sup> e mínima, de 34,03 mA/cm<sup>2</sup>, uma variação de 2,77%. A  $J_{SC}$  máxima da célula não encapsulada é de 36,33 mA/cm<sup>2</sup> e mínima, de 31,91 mA/cm<sup>2</sup>, uma variação de 11,83%, em incidência normal.

As células sem encapsulamento apresentaram um padrão de variação semelhante ao dos sistemas encapsulados, porém com uma maior dispersão. Além disso, nas células encapsuladas ocorre um máximo local de  $J_{SC}$  em  $10^\circ$ , que não ocorre nas células não encapsuladas; é importante lembrar que, para os sistemas encapsulados, o ângulo da radiação incidente não é o ângulo com o qual a radiação atinge a célula; esse ângulo é

menor, em função das interfaces anteriores que a radiação atravessou (ar-vidro; vidro-encapsulante). Nas células não encapsuladas o ângulo de incidência na superfície é o próprio ângulo  $\theta_0$ . Na figura 5.4 podem ser visualizados lado a lado os resultados para os três filmes encapsulados, apresentados nas figuras 5.2, 5.2 e 5.3.

A tabela 5-2 reúne os valores máximos e mínimos de  $J_{SC}$ , espessura de ocorrência e relação com  $J_{SC}$  ideal para os três filmes, com e sem encapsulamento.

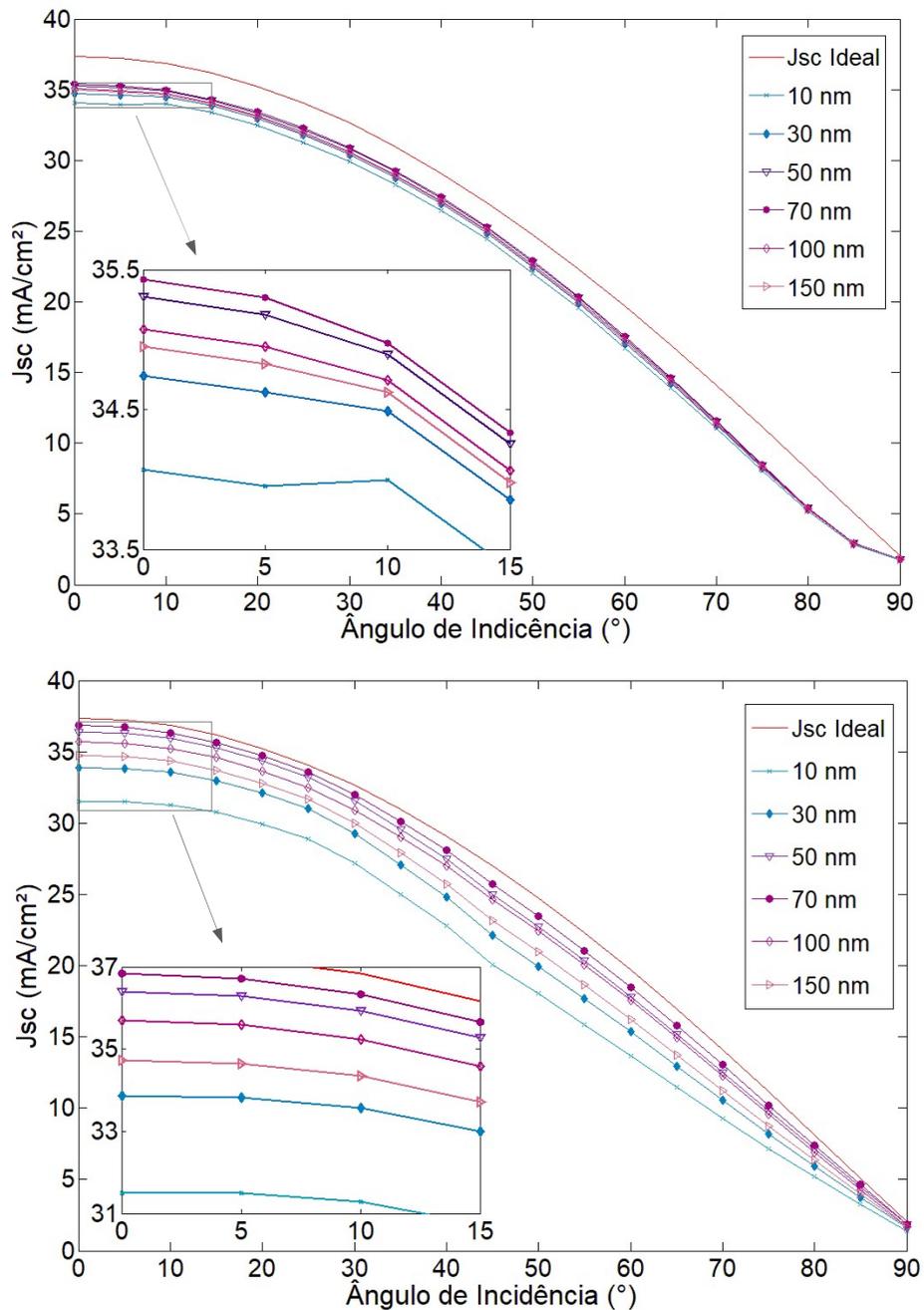
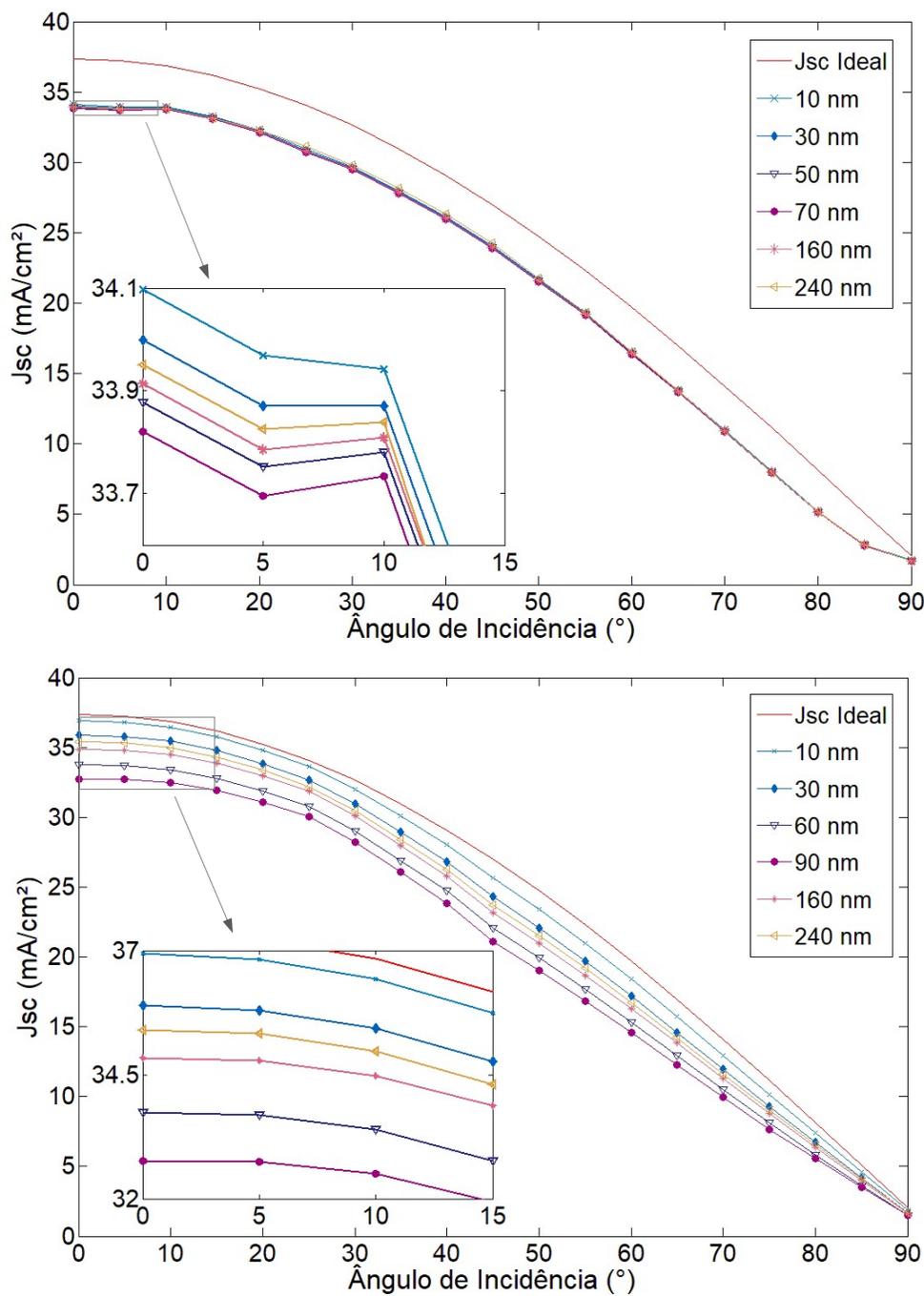


Figura 5.1 - Densidade de corrente de curto-circuito do sistema (Acima) e de uma célula não encapsulada (Abaixo) com filmes de  $Si_3N_4$ , para uma faixa de espessuras de 10 a 150 nm.



**Figura 5.2 - Densidade de corrente de curto-circuito do sistema (Acima) e de uma célula não encapsulada (Abaixo) com filmes de  $\text{SiO}_2$ , para uma faixa de espessuras de 10 a 250 nm.**

Esses comportamentos dos sistemas podem ser observados de outra forma nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7, que apresentam a variação de  $J_{SC}$  em função da espessura dos filmes de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$ , respectivamente, com e sem encapsulamento, sendo as curvas correspondentes a cada ângulo de incidência. Além disso, é possível verificar que a espessura ideal varia em alguns casos. A espessura ideal do filme de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sob o encapsulamento é a mesma para

todos os ângulos de incidência, mas para o filme encapsulado, a espessura ideal sofre um aumento a partir de 40°. Os filmes de SiO<sub>2</sub> mantêm a espessura ideal para todos os ângulos, assim como para o filme de TiO<sub>2</sub> sem encapsulamento. O sistema encapsulado com filme de TiO<sub>2</sub> sofre uma redução da espessura ideal a partir de 10°.

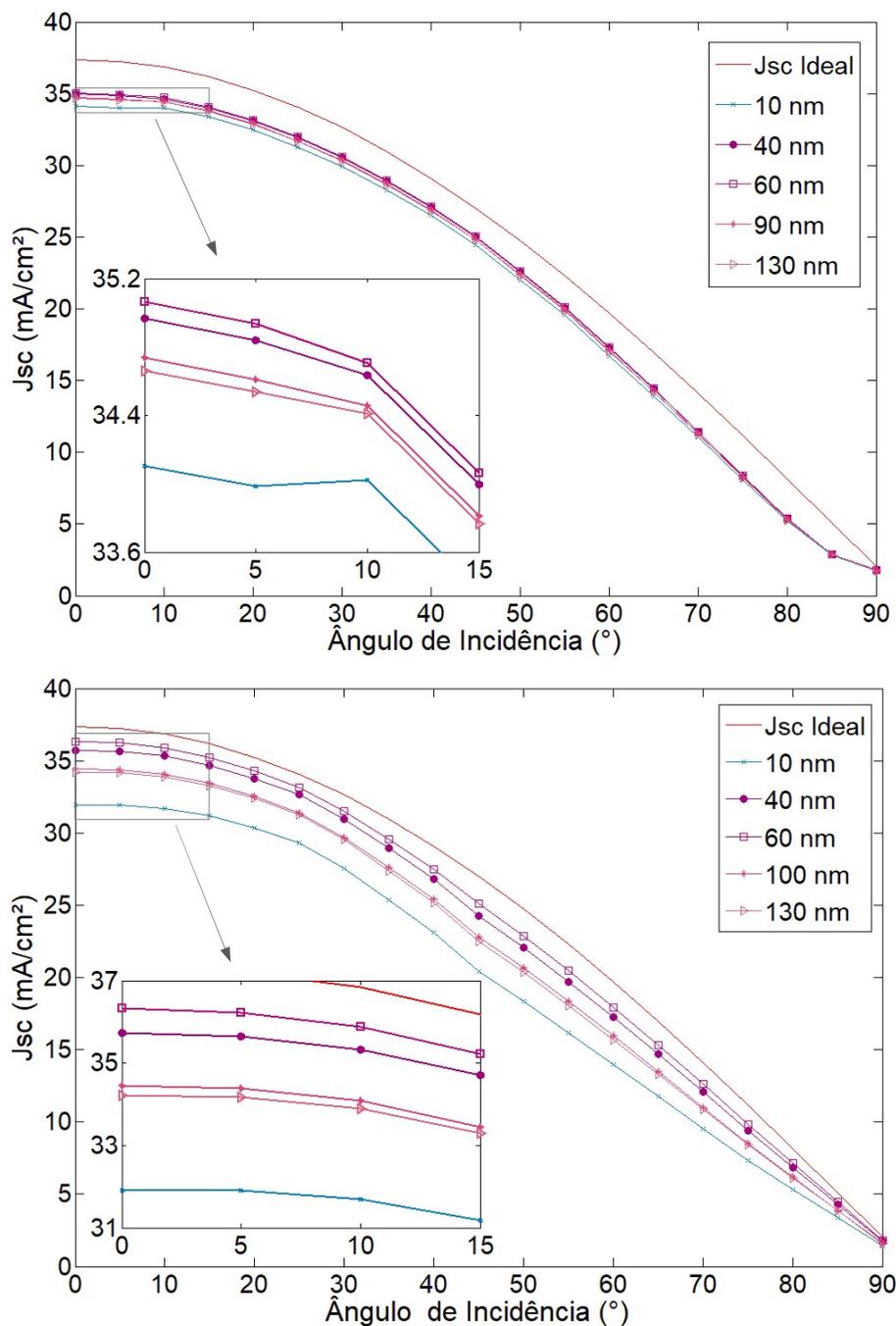


Figura 5.3 - Densidade de corrente de curto-circuito do sistema (Acima) e de uma célula não encapsulada (Abaixo) com filmes de TiO<sub>2</sub>, para uma faixa de espessuras de 10 a 150 nm.

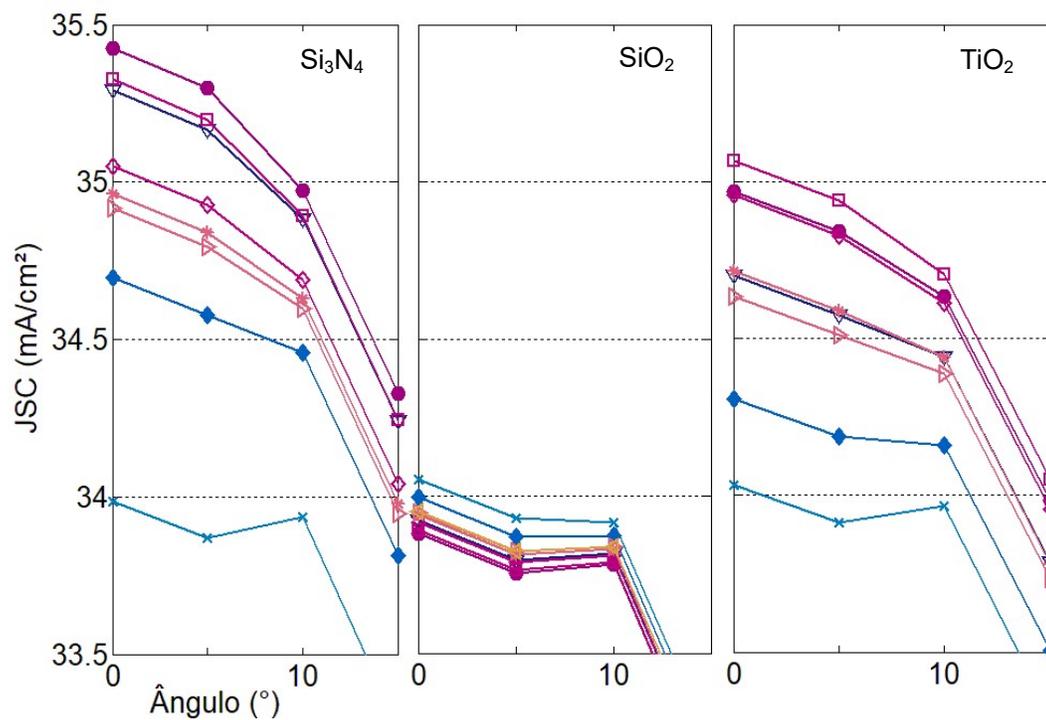


Figura 5.4 - Ampliações dos gráficos das Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente, para os filmes encapsulados.

Tabela 5-2 - Valores máximos e mínimos de  $J_{sc}$  para os três filmes encapsulados e não encapsulados, espessura de ocorrência e relação com  $J_{sc}$  ideal.

		$J_{sc}$ Máximo			$J_{sc}$ Mínimo		
		$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Espessura (nm)	$J_{sc}/37,3771$ (%)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Espessura (nm)	$J_{sc}/37,3771$ (%)
Célula (SE)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	36,8	70	98,5	31,5	10	84,2
	SiO <sub>2</sub>	36,9	10	98,8	32,8	90	87,6
	TiO <sub>2</sub>	36,3	60	97,2	31,9	10	85,4
Sist. Encaps	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	35,4	70	94,7	34,0	10	90,9
	SiO <sub>2</sub>	34,1	10	91,1	33,9	70	90,6
	TiO <sub>2</sub>	35,1	60	93,8	34,0	10	91,1

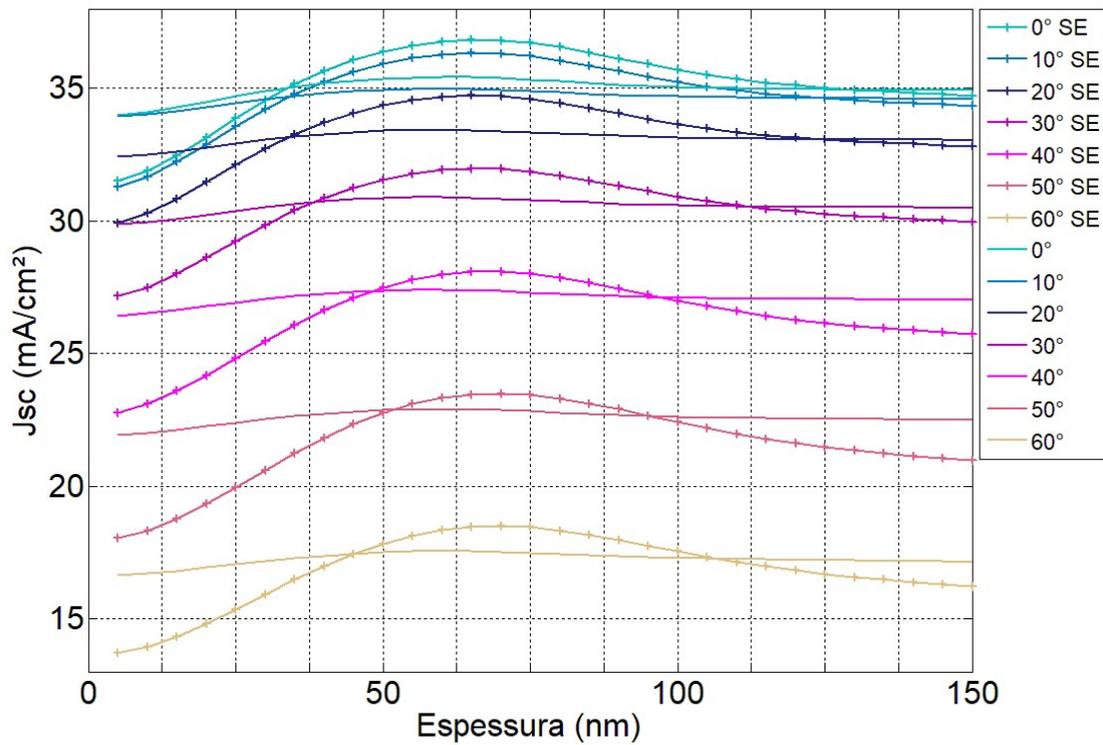


Figura 5.5 -  $J_{sc}$  produzida em função da espessura para filmes de  $Si_3N_4$ , com e sem encapsulamento (SE).

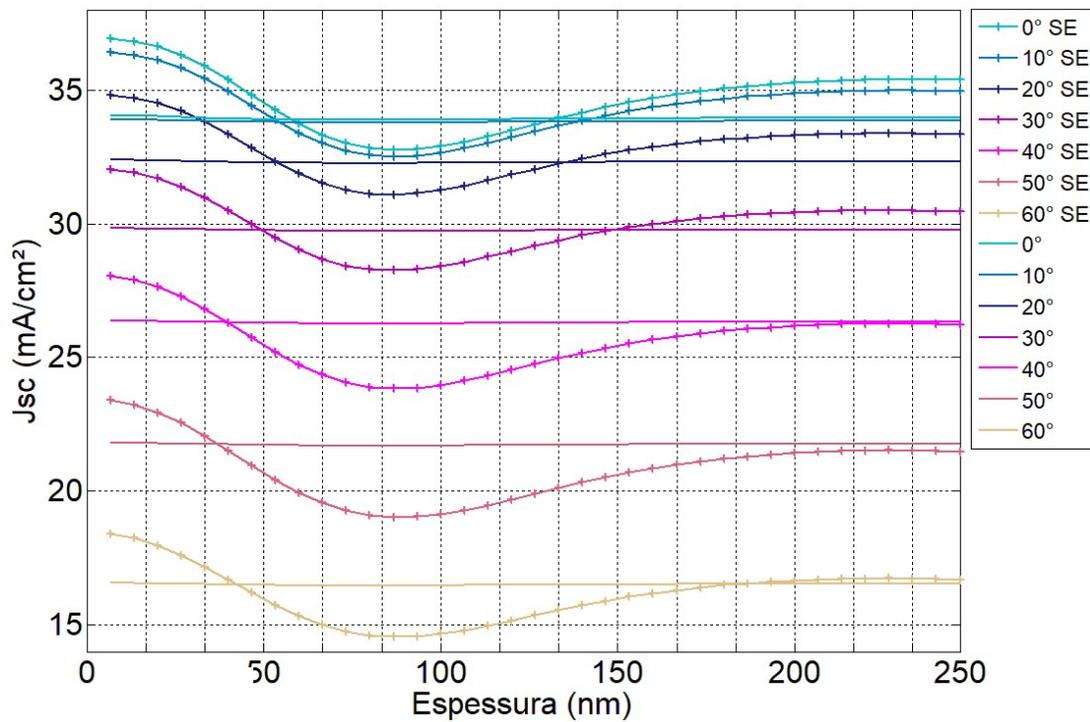


Figura 5.6 -  $J_{sc}$  produzida em função da espessura para filmes de  $SiO_2$ , com e sem encapsulamento (SE).

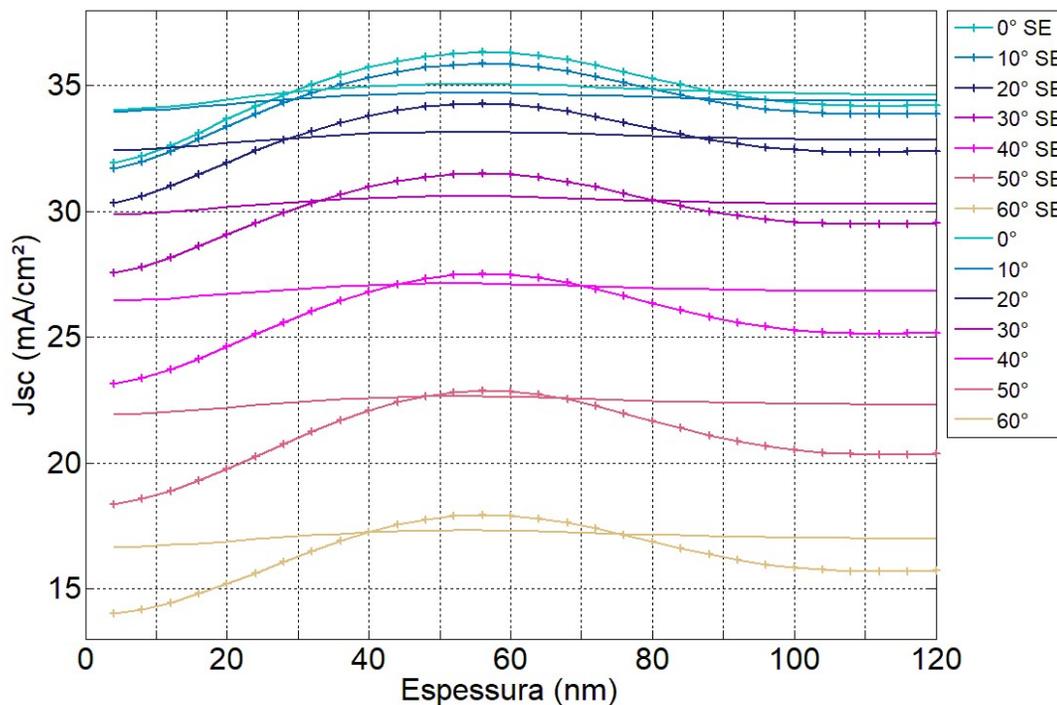


Figura 5.7 -  $J_{sc}$  produzida em função da espessura para filmes de  $TiO_2$ , com e sem encapsulamento (SE).

Nas figuras 5.8 a 5.11 é apresentado o comportamento dos sistemas em função de  $\lambda$  para  $\theta_0$  de 0° e para a primeira incidência na superfície do silício isoladamente, de modo que se pode analisar de uma forma mais aprofundada o que ocorre em cada situação. Na figura 5.8 podem ser observadas as reflexões nas interfaces superior e inferior de um filme de  $Si_3N_4$  encapsulado, e as reflexões finais, após interferência, para a espessura de maior transmissão encontrada anteriormente, de 70 nm, e para as espessuras de 50 nm e 90 nm, de modo que se possa observar o que ocorre quando a espessura é variada. As reflexões simples, nas interfaces, não sofrem nenhuma alteração em função da espessura. A  $j_{FG}$  ideal também está no gráfico, para visualização de como as curvas se sobrepõem; lembrando que, colocando de forma simplificada, a região de menor reflexão deve coincidir com a de maior  $j_{FG}$  ideal.

Nas figuras 5.9 a 5.11 são apresentados gráficos contendo novamente as reflexões nas interfaces superior e inferior e final, após interferência, para a célula encapsulada e não encapsulada, para os três filmes estudados, cada um na sua espessura ideal. Os padrões de variação estão relacionados aos índices de refração relativos das duas interfaces envolvidas em cada caso, e cada filme produz uma variação particular da reflexão em função de  $\lambda$ . As reflexões na interface superior são sempre maiores nas células não encapsuladas do que nas versões encapsuladas. E, quando a reflexão na interface superior é muito baixa, como é o caso do filme de  $SiO_2$  encapsulado, a reflexão final fica muito próxima da reflexão na interface filme-Si, porque o efeito de interferência é muito inexpressivo.

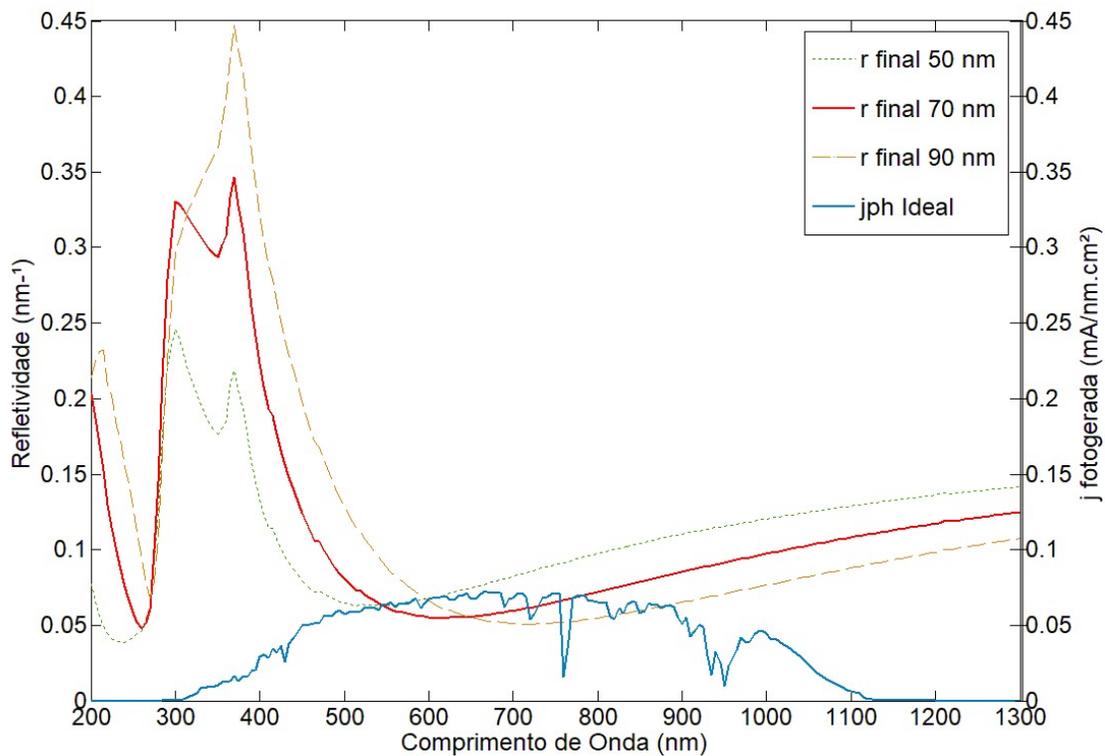


Figura 5.8 - Reflexão nas interfaces superior e inferior ao filme de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, e reflexão final, após interferência, para algumas espessuras do filme, apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.

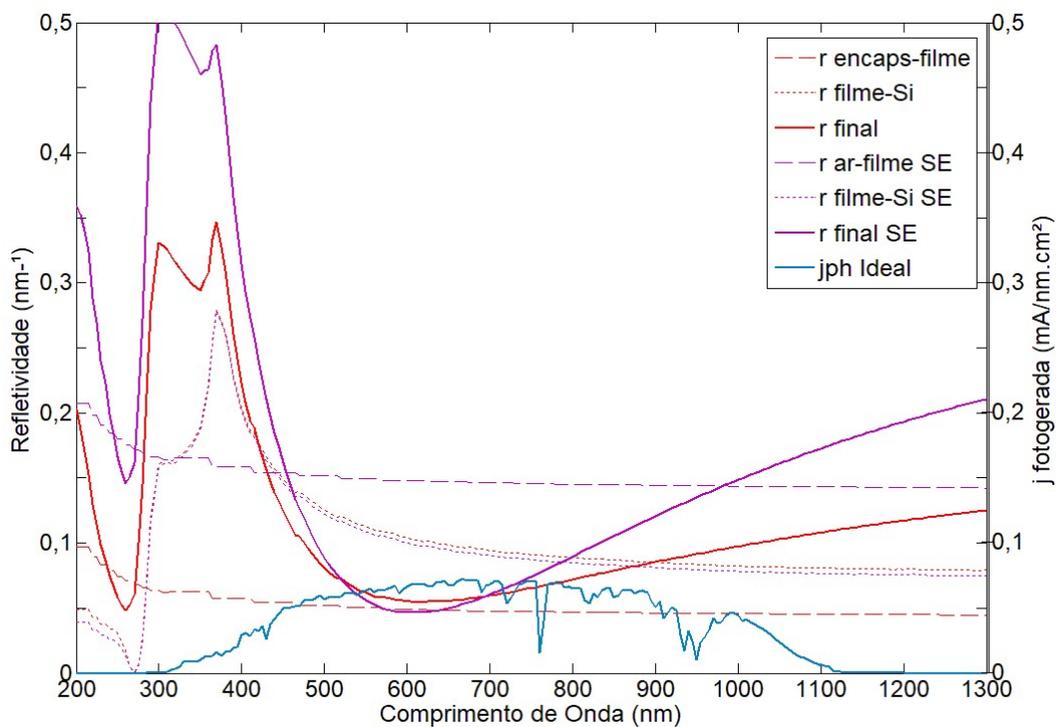


Figura 5.9 - Reflexão nas interfaces superior, inferior, e final (após interferência) na espessura ideal, para o filme de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, com e sem encapsulamento. Apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.

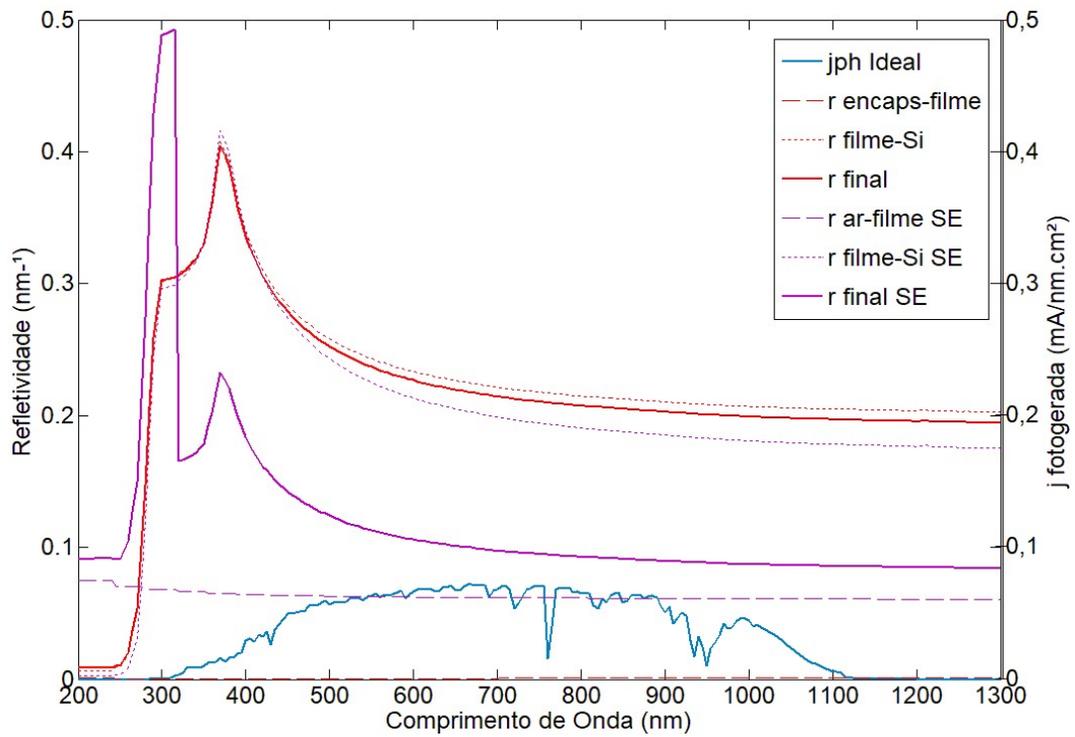


Figura 5.10 - Reflexão nas interfaces superior, inferior, e final (após interferência) na espessura ideal, para o filme de SiO<sub>2</sub>, com e sem encapsulamento. Apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.

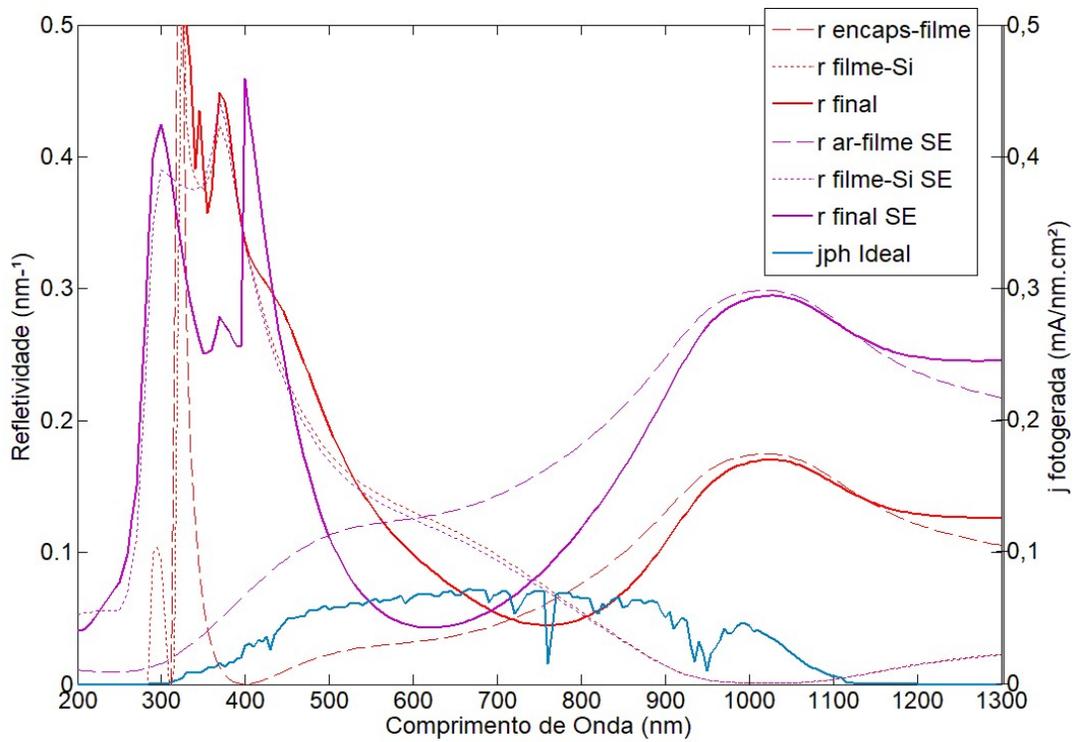


Figura 5.11 - Reflexão nas interfaces superior, inferior, e final (após interferência) na espessura ideal, para o filme de TiO<sub>2</sub>, com e sem encapsulamento. Apresentados junto à densidade de corrente fotogerada ideal.

Na figura 5.12 estão reunidas as curvas de  $J_{sc}$  dos três materiais estudados, com e sem encapsulamento. Apesar de o filme de  $\text{SiO}_2$  não encapsulado produzir a maior  $J_{sc}$ , a versão encapsulado produz a menor. O material com melhor desempenho após encapsulamento é o  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , cuja  $J_{sc}$  produzida, em incidência normal corresponde a 94,78% da  $J_{sc}$  ideal, enquanto os filmes de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$  tem os mesmos valores em 91,11% e 93,82%, respectivamente. Os filmes não encapsulados tem melhor desempenho em função da interferência destrutiva em reflexão mais efetiva.

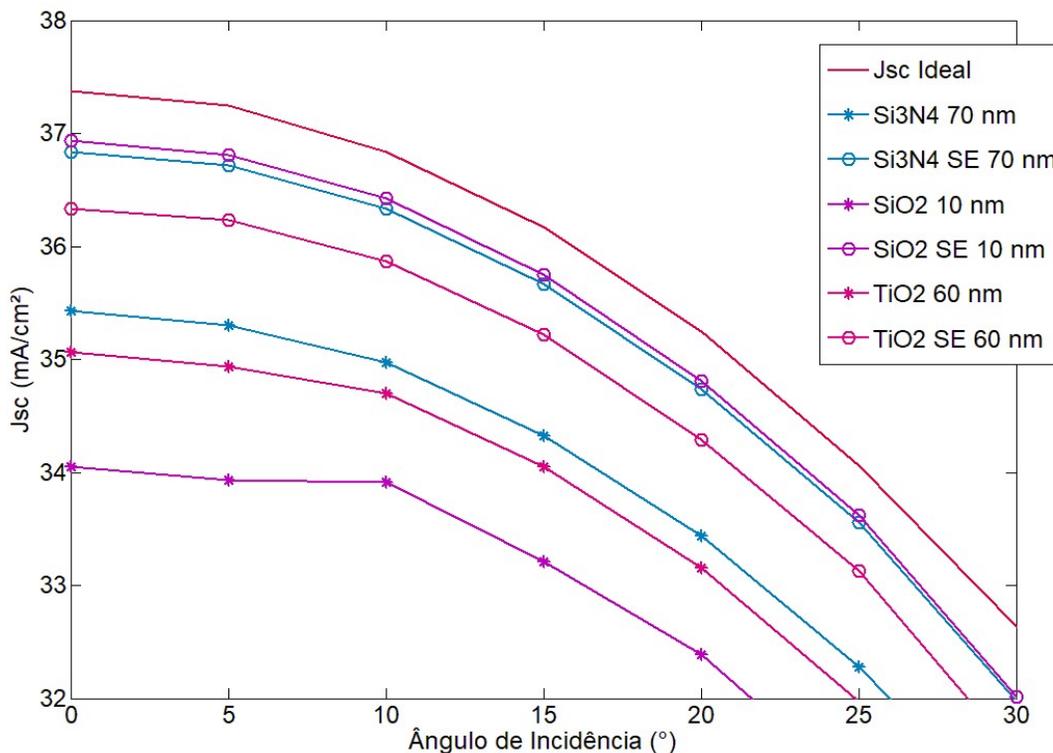
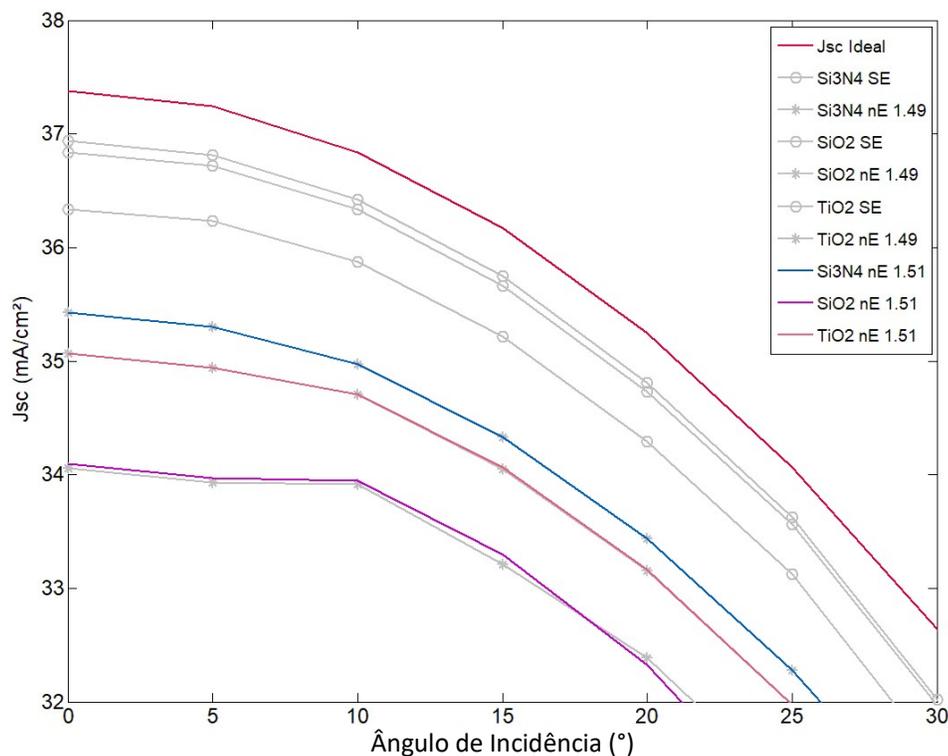


Figura 5.12 -  $J_{sc}$  relativa à espessura de melhor desempenho para cada material estudado, com e sem encapsulamento.

## 5.2. INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO ENCAPSULANTE NA TRANSMISSIVIDADE DE RADIAÇÃO NO SISTEMA

Os estudos foram até esse ponto realizados com o índice de refração do encapsulante de 1,49, porém conforme descrito no capítulo 2, existem apresentações comerciais de encapsulantes com  $n$  de 1,51. No gráfico da figura 5.13 foram geradas curvas para os mesmos três filmes do estudo anterior, porém com  $n$  de 1,51. Somente combinado ao filme de  $\text{SiO}_2$  produziu uma diferença visível, mas ainda assim pequena, um aumento de décimos de  $\text{mA/cm}^2$ . Combinado aos outros dois filmes, a diferença foi de poucos (1 a 2) centésimos de  $\text{mA/cm}^2$ . Mais especificamente, com o filme de  $\text{TiO}_2$  foi uma redução, enquanto com o filme de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , foi um aumento.



**Figura 5.13** -  $J_{sc}$  gerada por sistemas com os mesmos filmes da figura 5.12, porém com índice de refração do encapsulante de 1,51, e não mais de 1,49.

Uma segunda análise da influência do índice de refração foi uma busca pelo valor ideal, abstraindo-se a existência de apresentações comerciais existentes até o presente momento, em uma faixa que engloba índices de refração existentes em materiais poliméricos em geral, de 1,4 a 2. O estudo foi feito somente para o filme de material e espessura de melhor desempenho nos estudos anteriores, o  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com 70 nm de espessura.

Na figura 5.14 são apresentados os resultados da  $J_{sc}$  em função do ângulo, e, na figura 5.15, em função do índice de refração, de 1,49 a 1,99. O valor mais elevado de  $J_{sc}$  ocorre para o  $n$  de 1,52. A partir desse valor a  $J_{sc}$  sofre redução com o aumento de  $n$ . Na figura 5.16 é apresentada a transmissividade ponderada total ( $T_{total}$ ), e para as interfaces ar-vidro ( $T_1$ ), vidro-encapsulante ( $T_3$ ), e encapsulante-Si ( $T_{Si}$ ), para alguns dos valores de  $n$  do encapsulante dentro do intervalo estudado. Nesse gráfico pode-se entender que a transmissão total começa a decair a partir de tal valor de  $n$  do encapsulante devido à reflexão em  $T_3$ . A transmissão máxima em  $T_{Si}$  ocorre em 1,47 para incidência normal, porém a variação da transmissividade nessa interface, nessa faixa, é menos expressiva, e o aumento da transmissividade em  $T_3$ , até 1,52, é preponderante, de modo que  $T_{total}$  segue o mesmo comportamento. Além disso, para ângulos de incidência acima de  $40^\circ$ , outros índices de refração, que não o valor de 1,47, passam a produzir uma transmissividade mais elevada em  $T_{Si}$ .

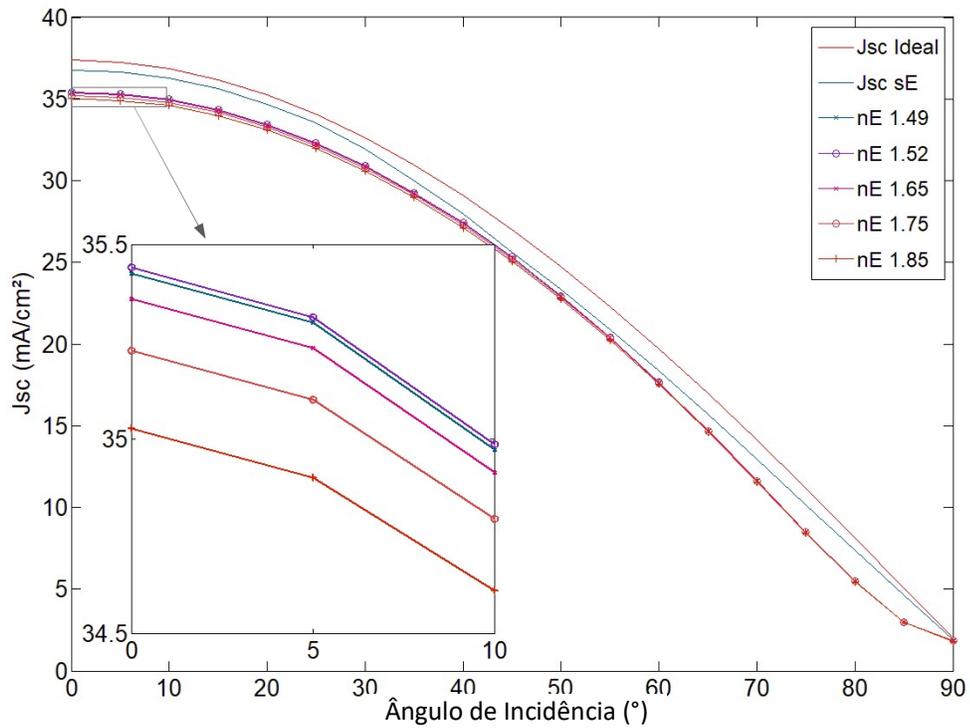


Figura 5.14 –  $J_{sc}$  gerada em função do ângulo de incidência para alguns índices de refração do encapsulante.

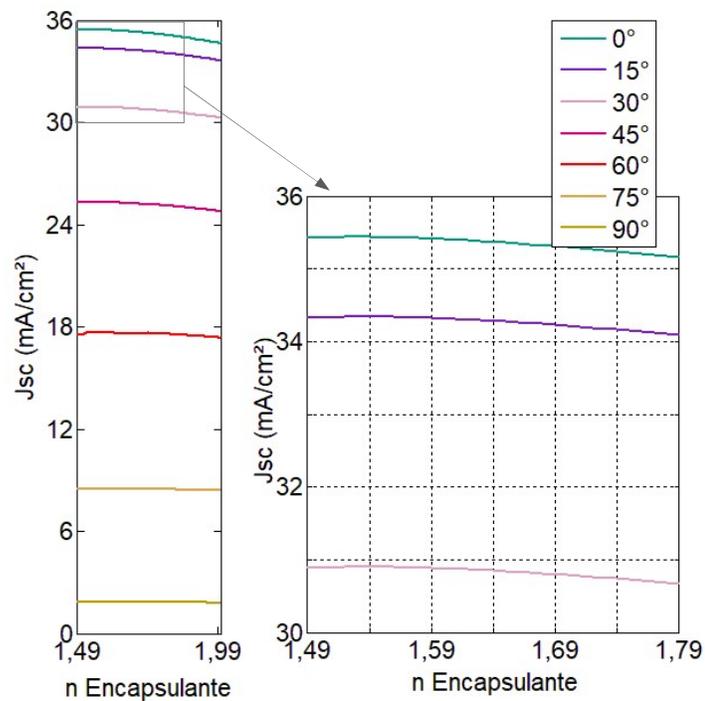


Figura 5.15 -  $J_{sc}$  gerada em função do índice de refração do encapsulante, para alguns ângulos de incidência, à esquerda, e mesmo gráfico com ampliação da região de  $J_{sc}$  de 30 a 36  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , à direita.

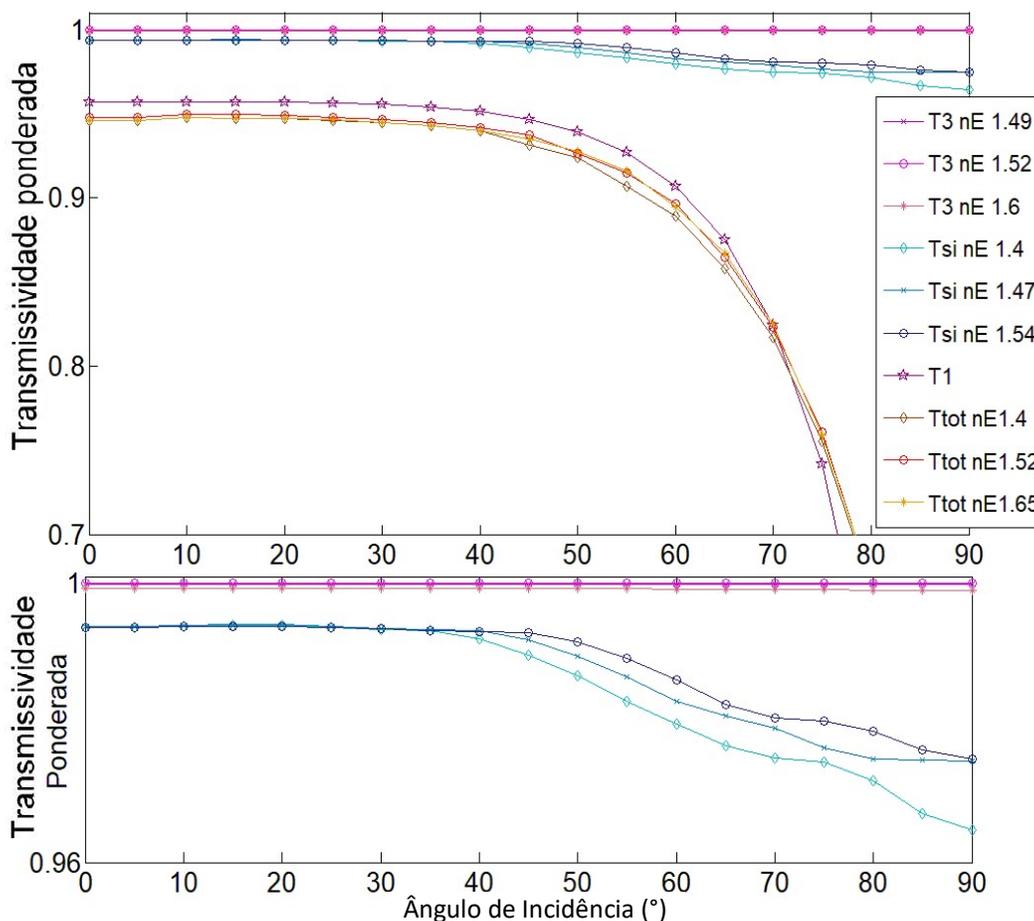


Figura 5.16 - Transmissividade ponderada nas interfaces ar-vidro (T1), vidro-encapsulante (T3), encapsulante-Silício (Tsi) e resultante do sistema (Ttotal) para alguns índices de refração do encapsulante. Abaixo, uma ampliação do mesmo gráfico no eixo da transmissividade.

### 5.3. EFEITO ÓPTICO DE UM FILME SOBRE O VIDRO E INFLUÊNCIA DA ESPESSURA

No presente estudo será analisado o desempenho óptico de aumento de transmissividade da radiação pela inserção filmes finos de  $\text{TiO}_2$  e PDMS sobre o vidro. Esses filmes têm como principal função efeito auto-limpante da superfície, porém tem potencial para funcionar também como filme anti-reflexo por mecanismo de interferência destrutiva da radiação em reflexão. Portanto, será analisada também a influencia da espessura. O filme de passivação da célula tem parâmetros fixos conforme os melhores resultados obtidos nos estudos anteriores:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  e espessura de 70 nm. O encapsulante tem índice de refração de 1,49, o mais utilizado atualmente.

Foram realizadas varreduras no intervalo de espessuras de 10 a 200 nm com resolução de 10 nm para os dois materiais. Na figura 5.17 são apresentados os resultados de desempenho total do sistema ( $J_{sc}$ ) para algumas espessuras, selecionadas para demonstrar o efeito da variação de tal parâmetro, e para o vidro sem filme, em função do ângulo de

incidência. A  $J_{SC}$  Ideal também é apresentada para comparação. Na figura 5.18 é apresentada a  $J_{SC}$  como função da espessura, para curvas relativas aos ângulos de 0 a 60°, com passo de 10°. Observando os dois gráficos de cada material verifica-se que a variação da espessura do filme de  $TiO_2$  produz um efeito mais significativo de variação da transmissividade, porém reduz a transmissividade, em relação ao vidro sem filme. Os filmes de PDMS têm um efeito menos pronunciado, mas positivo, e aumentam a transmissividade em comparação ao vidro sem filme, produzindo a máxima transmissividade na espessura de 110 nm.

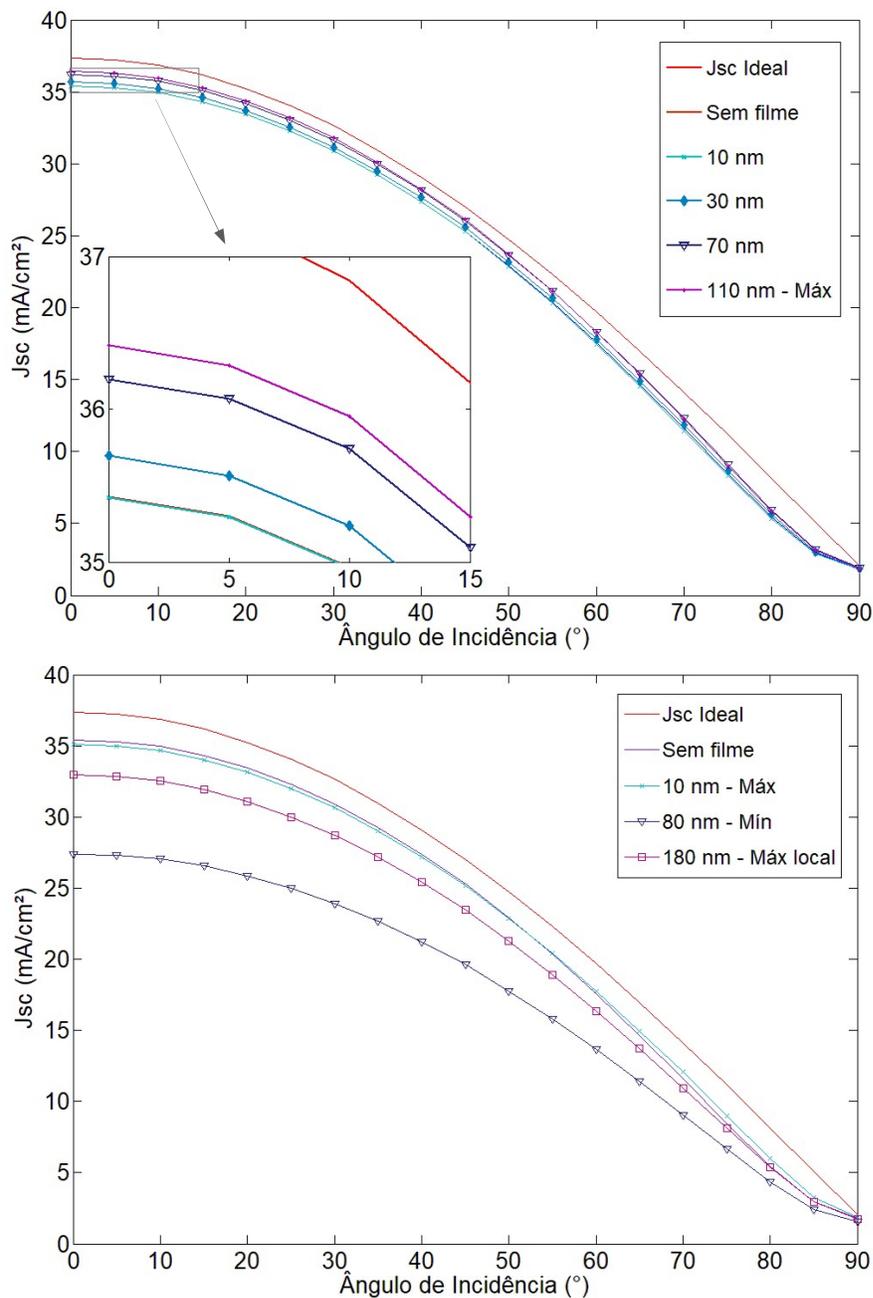


Figura 5.17-  $J_{sc}$  em função de  $\lambda$  para algumas espessuras de filme de PDMS, acima, e de  $TiO_2$ , abaixo, além das curvas, presentes em ambos, de  $J_{sc}$  ideal e  $J_{sc}$  do sistema sem filme.

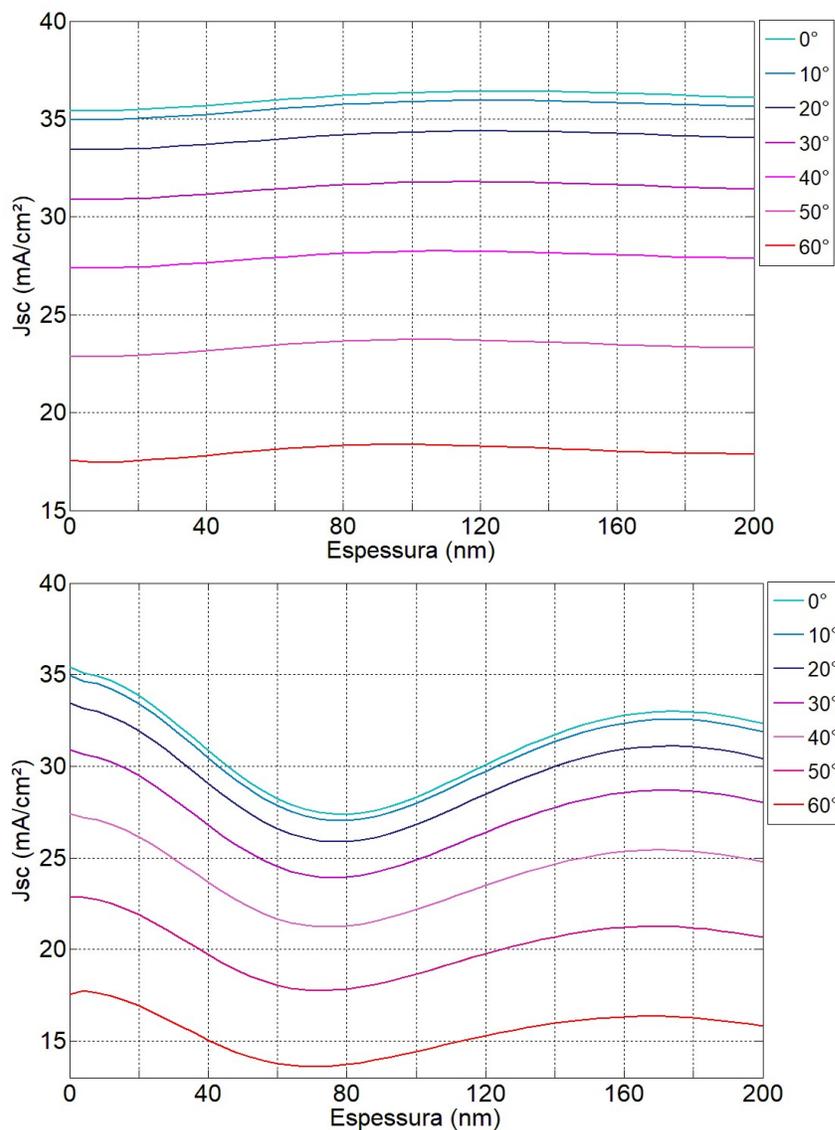


Figura 5.18 -  $J_{sc}$  em função da espessura de filme de  $0^\circ$  a  $60^\circ$ , para o PDMS, acima, e  $\text{TiO}_2$ , abaixo.

As transmissividades ponderadas das interfaces vidro-encapsulante (T3), encapsulante-Si (TSi), ar-vidro (T1), e total do sistema (Ttotal), que tem seu resultado construído a partir de todas as outras, são apresentadas para três espessuras dos filmes de PDMS, na figura 5.19 e  $\text{TiO}_2$ , na figura 5.20. Verifica-se que a alteração da transmissividade da interface ar-vidro (T1) tem uma influência grande na transmissividade total do sistema, demonstrando a importância da análise óptica de tais filmes.

Na figura 5.21 estão reunidas as curvas relativas as espessuras de  $J_{sc}$  máxima dos filmes de PDMS e  $\text{TiO}_2$ , bem como as curvas de  $J_{sc}$  do sistema equivalente sem filme, e  $J_{sc}$  ideal. A  $J_{sc}$  do sistema sem filme, para incidência normal, tem valor de  $35,43 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , que representa  $94,78\%$  da  $J_{sc}$  ideal. A  $J_{sc}$  do sistema contendo o filme de espessura otimizada de PDMS tem valor de  $36,43 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , que representa  $97,44\%$  da  $J_{sc}$  ideal; isso equivale a um aumento de  $2,66\%$  da  $J_{sc}$  em relação ao sistema sem filme. O filme de  $\text{TiO}_2$  com espessura

otimizada produz uma  $J_{sc}$  do sistema de  $35,11 \text{ mA/cm}^2$ ,  $93,93\%$  da  $J_{sc}$  ideal, o equivalente a uma redução de  $0,85\%$  em relação ao valor produzido no sistema sem filme.

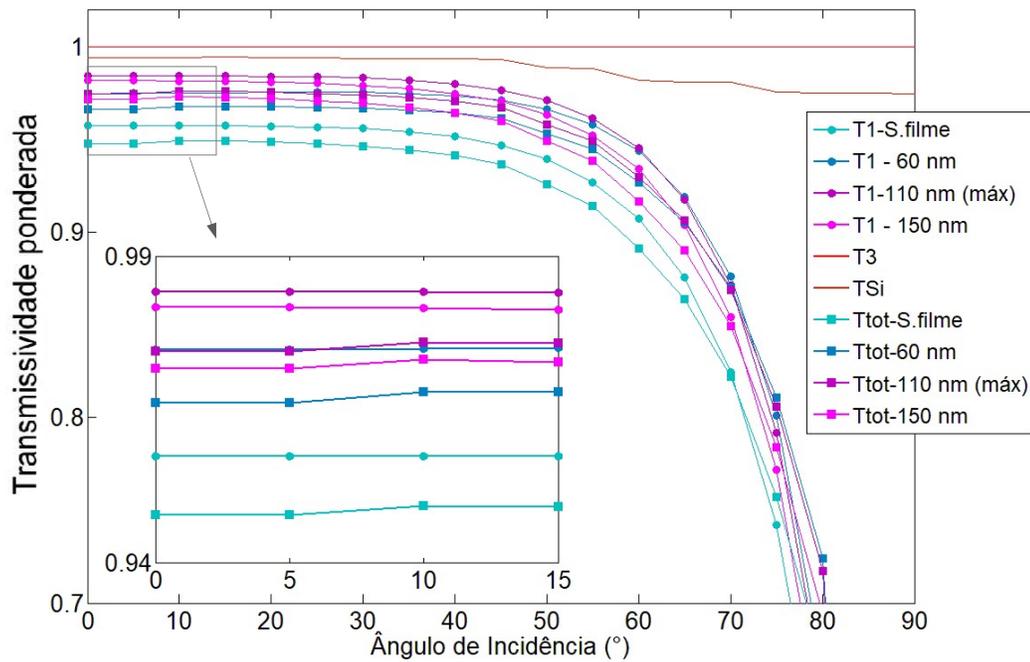


Figura 5.19 - Transmissividade Ponderada do sistema ( $T_{tot}$ ) e da interface ar-vidro ( $T_1$ ) contendo filmes de PDMS em três espessuras, da interface vidro-encapsulante ( $T_3$ ), e da interface encapsulante-Si ( $T_{Si}$ ).

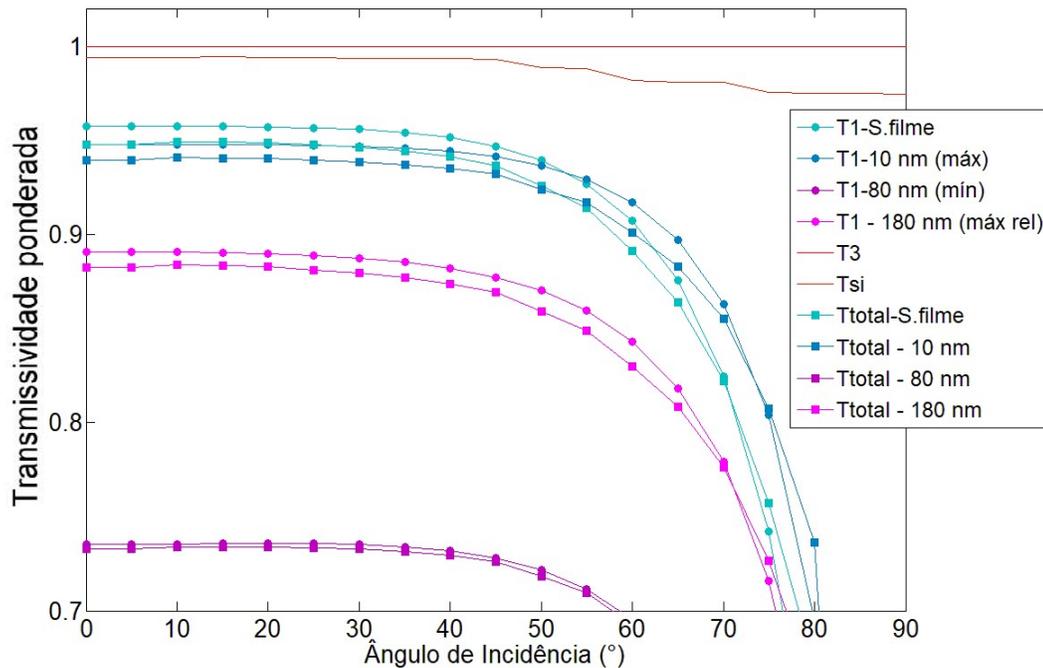


Figura 5.20 - Transmissividade Ponderada do sistema ( $T_{tot}$ ) e da interface ar-vidro ( $T_1$ ) contendo filmes de PDMS em três espessuras, da interface vidro-encapsulante ( $T_3$ ), e da interface encapsulante-Si ( $T_{Si}$ ).

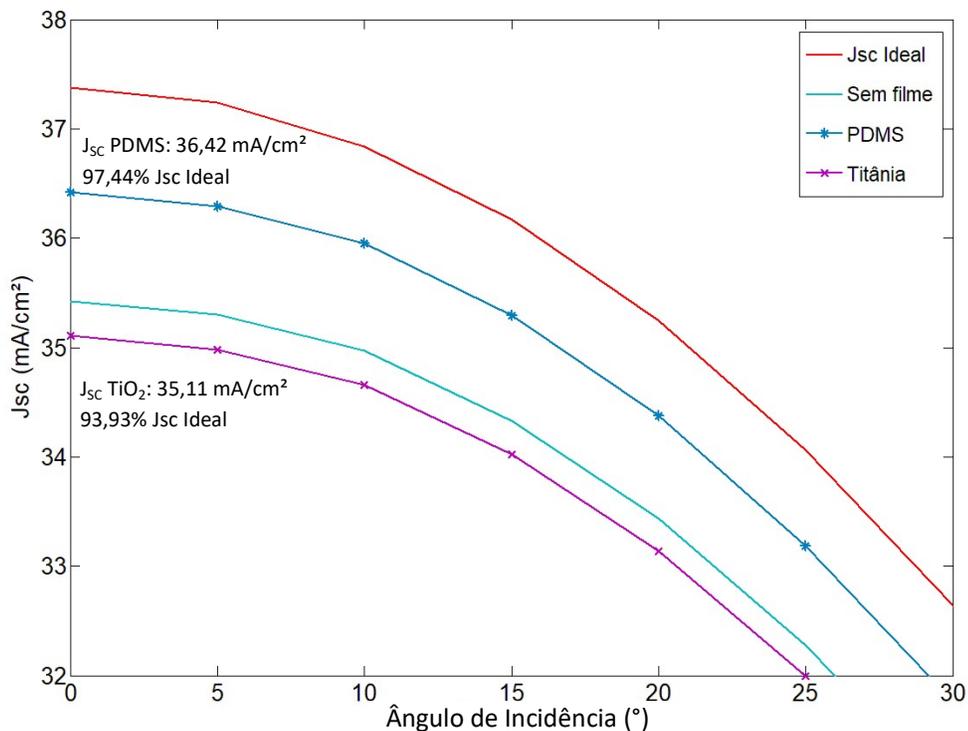


Figura 5.21 - Curvas da espessura de máxima  $J_{SC}$  dos filmes de PDMS e  $TiO_2$  e curvas de  $J_{SC}$  do sistema sem filme e  $J_{SC}$  Ideal.

#### 5.4. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE MAIS ELEVADA TRANSMISSIVIDADE PARA O ESPECTRO PADRÃO, E PARA UM ESPECTRO MÉDIO DE UM DIA DE EQUINÓCIO EM PORTO ALEGRE

Foram comparadas as  $J_{SC}$  geradas pelo espectro padrão, utilizado nos estudos anteriores, e a  $J_{SC}$  gerada por um espectro médio de um dia de equinócio em Porto Alegre (Espectro PA), descrito no capítulo 2, em um sistema óptico com propriedades definidas conforme os melhores resultados dos estudos anteriores: Sobre o vidro, filme de PDMS com espessura de 110 nm e, sobre o silício, filme de  $Si_3N_4$  com espessura de 70 nm; índice de refração do encapsulante de 1,49.

O Espectro PA tem intensidade total de **675 W/m<sup>2</sup>**, que representa 67,5% da intensidade total de **1000 W/m<sup>2</sup>** do espectro de referência, de modo que em função da intensidade, somente, espera-se uma queda da  $J_{SC}$  ideal de 32,5% quando altera-se o espectro padrão para o Espectro PA. Os valores de  $J_{SC}$  Ideal e gerada após perdas de transmissão do sistema óptico estão apresentadas na figura 5.22, para os dois espectros em questão. A partir desses dados foram geradas as transmissividades ponderadas do sistema para cada espectro, expostas na figura 5.24. Em incidência normal a transmissividade ponderada com o espectro padrão é de 97,44%, e com o Espectro PA é de 96,34%, o que representa uma redução de 1,1%. Para os dois espectros a o ângulo de mais elevada transmissão é 10°. A diferença em transmissão mantém-se constante até o ângulo de 45°,

quando começa a diminuir, até ser nula, em  $65^\circ$ . A partir desse valor a transmissão ao espectro PA passa a ser mais elevada, em função da característica espectral da sua parcela difusa, com as intensidades mais elevadas deslocadas para uma faixa de  $\lambda$  mais elevada. Observando-se os dois espectros normalizados sobrepostos na figura 5.23 esse comportamento pode ser melhor entendido.

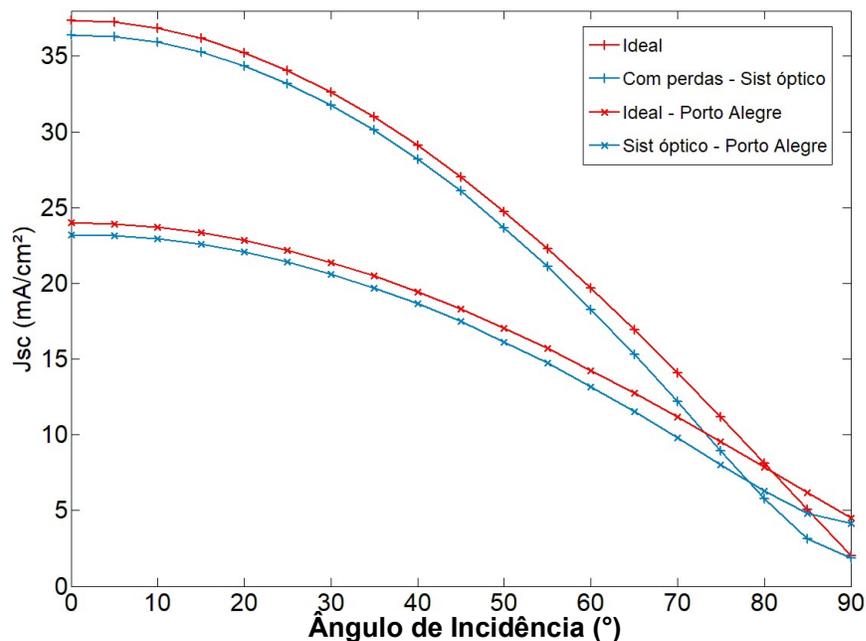


Figura 5.22 -  $J_{sc}$  ideal e após perdas por transmissão pelo sistema óptico, com dados do espectro padrão, e dados do espectro PA.

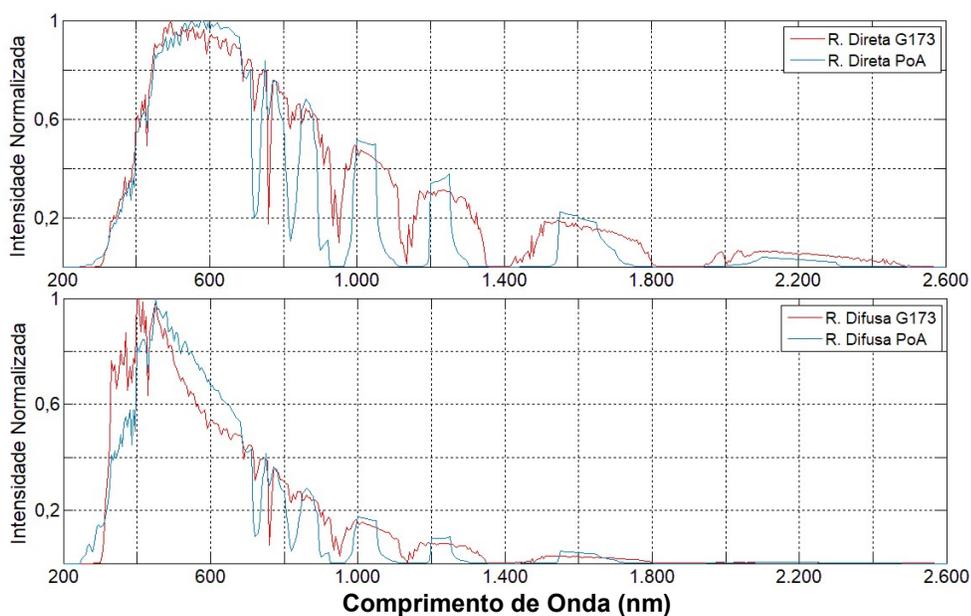


Figura 5.23 - Parcelas diretas normalizadas sobrepostas dos dois espectros em questão, acima, e parcelas difusas na mesma condição, abaixo.

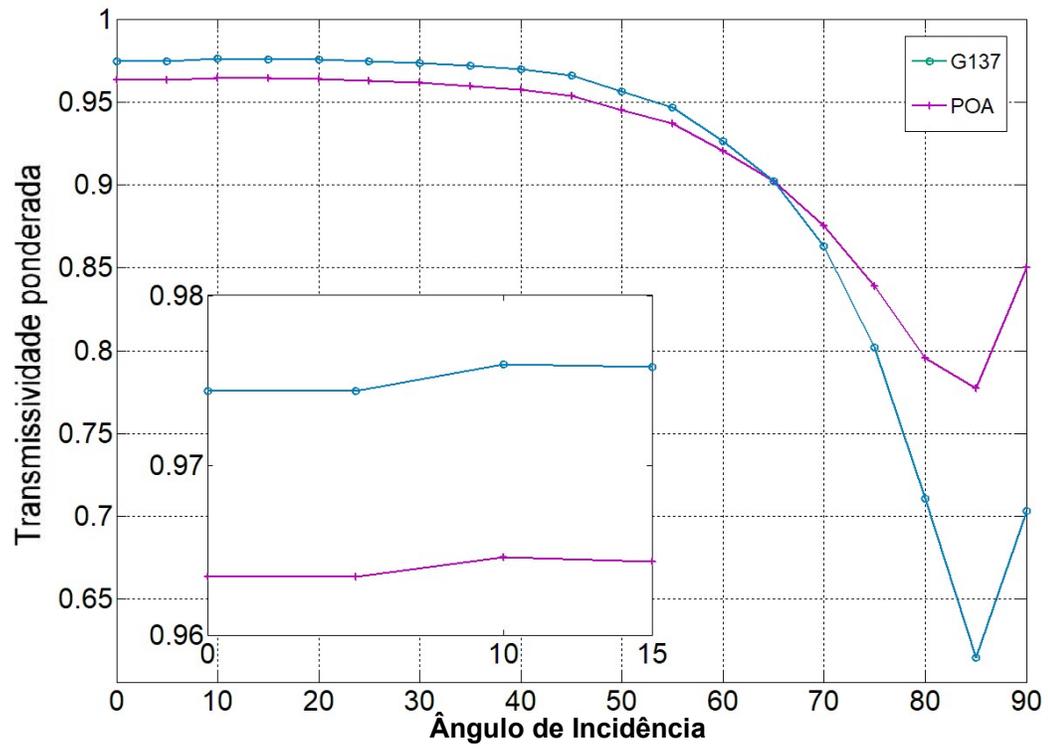


Figura 5.24 - Transmissividade ponderada da radiação no sistema óptico de melhor desempenho para o espectro de referência e para o Espectro PA.

## 6. CONCLUSÕES

Foi desenvolvida uma nova metodologia para análise óptica das camadas de encapsulamento superpostas a uma célula fotovoltaica de Si-m quando inserida em um módulo. Esta metodologia foi validada através da literatura, apresentando coerência entre os resultados e valores de referência, podendo dessa forma, ser empregada na análise de sistemas ópticos de módulos fotovoltaicos, em função do comprimento de onda da radiação incidente e ângulo de incidência. O método permitiu a geração de dados de transmissividade do sistema como um todo e por partes, interface a interface, para entradas de características ópticas de diferentes materiais que podem compor o sistema. A partir dos dados de entrada relativos às propriedades dos materiais, espectro de uma radiação incidente e resposta espectral interna foram gerados dados de densidade de corrente de curto circuito e transmissividade ponderada, permitindo a análise óptica e comparação de sistemas ópticos constituídos de diferentes conjuntos de materiais. Foram, através da nova ferramenta, produzidos 4 estudos de desempenho em transmissão dos sistemas em questão.

No primeiro deles foi estudado o desempenho óptico de sistemas para três materiais diferentes aplicados no filme de passivação da célula e suas espessuras ideais, sendo eles  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , e  $\text{TiO}_2$ . Esse elemento é responsável por elevar a transmissividade por mecanismo de interferência em reflexão. O que apresentou melhor desempenho foi o  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , na espessura de 70 nm. No estudo seguinte foram comparados os índices de refração dos polímeros encapsulantes mais frequentemente utilizados: EVA, e poliolefinico. Observou-se que a influência da variação de tal parâmetro é muito baixa, produzindo variações de centésimos de  $\text{mA}/\text{cm}^2$  na  $J_{SC}$  gerada. Em uma segunda parte desse estudo foi realizada uma varredura dos valores de índice de refração, sem limitação aos materiais disponíveis comercialmente, mas relacionada aos valores encontrados em polímeros não condutores em geral. O estudo mostrou que os produtos comerciais apresentam índices de refração muito próximos do ideal. No terceiro estudo foi analisada a diferença em transmissividade produzida na superfície do vidro pela presença de um filme fino em função do efeito de interferência da radiação em reflexão. Os materiais analisados foram  $\text{TiO}_2$  e PDMS, sendo o último o responsável pelos melhores resultados, atingindo um ganho em densidade de corrente fotogerada de 2,66% na espessura ideal, de 110 nm.

Um estudo final comparou o desempenho do sistema com a combinação de materiais que produziu a mais elevada transmissividade, produzidos com o Espectro Padrão, com valores produzidos para um espectro médio de um dia de equinócio em Porto Alegre. A transmissividade do sistema ao espectro de referência foi ligeiramente mais elevada em ângulos próximos à normal, mas a relação se inverte a partir de  $45^\circ$ . Isso se deve à característica espectral da parcela direta e da parcela difusa de cada espectro.

Frente aos estudos realizados conclui-se que o método desenvolvido apresenta limitações e, portanto, alguns erros associados aos resultados, porém possibilita um

entendimento detalhado do desempenho óptico de diferentes materiais inseridos em módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, de forma rápida e razoavelmente simples.

#### 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Expandir a descrição matemática da interação da radiação com a textura da superfície do silício para uma faixa de ângulos azimutais de incidência, de modo a produzir análises mais completas;

- Desenvolver um modelo de interação da radiação com a superfície texturizada de células de silício policristalino, para texturização alcalina, que leva à formação de uma textura de micropirâmides com inclinações em todas as direções em distribuição aleatória;

- Expandir o modelo quanto à descrição do efeito óptico de deslocamento do espectro de materiais a serem inseridos no interior das camadas, de modo que esse efeito ocorra em paralelo aos outros já previstos;

- Realizar ensaios para validação prática do método.

## REFERÊNCIAS

- AGC Solar - Folha de dados técnicos dos vidros Sunmax e Solite do fabricante AGC Solar, disponível em: <http://www.agc-solar.com/solar-technologies/solar-photovoltaics/crystalline.html>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G-173 – 03: *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*. Estados Unidos, 2012.
- CROWM Optical Simulator - Universidade de Informações disponíveis na página do LPVO – Universidade de Ljubjana. <http://lpvo.fe.uni-lj.si/en/software/crowm/>
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª Edição, New Jersey: Wiley. 2013.
- DUPONT. **What makes up a solar panel?** Disponível em: <http://www.dupont.com/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/what-makes-up-solar-panel.html>
- HAAG, Rafael. *Desenvolvimento de um Radiômetro Espectral e Metodologia para Caracterização do Espectro Solar*. 2007. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- HAAG, Rafael. *Estimativa da Distribuição Espectral da Radiação Solar sobre o Território Brasileiro através de Análise Multiinstrumental*. 2012. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- HECHT, Eugene. *Óptica*. 2.ª Edição. Lisboa: Calouste Gulbenkain. 2002.
- KANO, Kanaan. *Semiconductor Devices*. Nova Jersey: Prentice-Hall. 1998.
- KRAUTER, S., HANITCH, R. *Actual optical and thermal performance of PV-modules*. Berlin, Alemanha. **Solar Energy Materials and Solar Cells** v. 41/42 p. 557-574. 1996.
- KRAUTER, S., GRUNOW, P. *Optical Simulation to Enhance PV Module Encapsulation*. Berlin, Alemanha. **Photovoltaic Institute Berlin**. 2006.

KRAUTER, Stefan. *Solar Electric Power Generation – Photovoltaic Energy Systems*. Berlin: Springer. 2006.

MAGNIN, V., HARARI, J. *Angle-dependent ray tracing simulations of reflections on pyramidal textures for silicon solar cells*. França. **Solar Energy**. V. 110 p. 378-385, 2014.

MARKVART, T; CASTAÑER, L. *Solar Cells – Materials, Manufacture and Operation*. 1.ª Edição. Londres: Elsevier. 2005.

MEHMOOD, U.; AL-SULAIMAN, F. A. *Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: A critical review*. Arábia Saudita. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. V. 157 p. 604-623, 2016.

MME, *Capacidade instalada de geração atinge 152.980 MW em junho*. Notícias - Ministério de Minas e Energia. 02 de agosto de 2017.

PALIK, Edward. *Handbook of Optical Constants of Solids*. São Diego: Academic Press. 1998.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar – Projeto SWERA*. 2ª Edição. São José dos Campos. 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Produzido pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB – CEPEL). Rio de Janeiro. 2014.

*PV5400 DuPont* - Folha de dados técnicos do material, disponível em <http://www.dupont.com/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/photovoltaic-encapsulants.html>

RUBIN, M. (1985) *Optical Properties of Soda Lime Silica Glasses*. *Solar Energy Materials*. **12**: 275-288.

Solar Cell Operation – Plataforma PVEDUCATION. Disponível em [www.pvcdrom.org](http://www.pvcdrom.org)

SolarPower Europe (2016). *Global Market Outlook for Solar Power/2016-2020*. Material disponível em: [www.solarpowereurope.org](http://www.solarpowereurope.org).

TUCHER, N., EISENLOHR, J. *Optical simulation of photovoltaic modules with multiple textured interfaces using the matrix-based formalism OPTOS*. Alemanha. **Optics Express**. V. 24, Nº 14. 2016.

YAMADA, T., NAKAMURA, H. *Reflection Loss Analysis by Optical Modeling of PV Module*.  
Japão. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. v. 67 p. 405-413, 2001.

3M EVA9110T EVA9120B – Folha de dados técnicos dos materiais, disponível em  
[http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/Renewable/Energy/Product/Films/Solar-Encapsulant-Film/](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Renewable/Energy/Product/Films/Solar-Encapsulant-Film/)